



---

**Universidad de Valladolid**

PROGRAMA INTERUNIVERSITARIO DE DOCTORADO  
EN LÓGICA Y FILOSOFÍA DE LA CIENCIA

TESIS DOCTORAL  
EL CARÁCTER ÚNICO DEL RIESGO NUCLEAR Y RADIOLÓGICO

Presentada por Argel Calcines Pedreira  
para optar al grado de Doctor por Universidad de Valladolid

Dirigida por:  
D. Alfredo F. Marcos Martínez

2021



A mis dos padres, Ramón Augusto y Alexander Petróvich,  
y por extensión a sus dos nietos, Oleg y Alexander,  
quienes nacieron poco tiempo después de Chernobyl.

A mi hijita Lidia Sofía, quien nació ya en la sociedad del riesgo global.



*Riesgo no es sinónimo de catástrofe. Riesgo significa anticipación de la catástrofe.*

Ulrich Beck

*Aunque se sabe que una planta nuclear sólo explota cada doce millones de años, esto podría acontecer mañana y mañana y, de nuevo, mañana.*

Niklas Luhmann

*No sabemos lo que el dominio de la técnica atómica, que progresa hasta lo inquietante, tiene como propósito.*

Martin Heidegger



## Agradecimientos

Este trabajo de tesis doctoral ha sido concebido gracias a que, con ayuda de una Beca Santander, pude cursar primeramente el Máster de Lógica y Filosofía de la Ciencia en la Universidad de Valladolid. Sea mi agradecimiento a todos sus profesores, pero en especial a mi fraterno tutor, Alfredo Marcos; a María de la Concepción Caamaño, coordinadora de dichos estudios de posgrado, y a Wenceslao J. González, quien también me estimuló.

A mi amiga María Antonia Virgili, gracias infinitas, y también a sus colegas de la Sección de Historia y Ciencia de la Música, en especial a Mariví, Jon y Mikel.

A mi amigo Josemaría Setién, quien me infundió esperanzas con su ejemplo, amistad y ayuda invaluable.

A mi amiga Pilar Muñoz por su revisión y ayuda con el inglés.

A mi amigo René Ávila, quien me apoyó siempre.

A Chinolope y Esperanza por su inspiración.

A Manuel Baquedano por sus clases de Ecología Política.

A Enrico Turrini, defensor ineludible del camino del Sol.

A José Altshuler y su hijo Ernesto Altshuler, ejemplos de honestidad científica.

A Jorge Núñez Jover, precursor de los estudios CTS en Cuba.

A mis amigos Camilo Mesa y Rubén Ferro, así como a todos mis compañeros de estudios en el Instituto Energético de Moscú.

A mi amigo Alexánder Moiséev, quien apoyó mis estancias en Rusia. Y, por supuesto, al académico Anatoli Gueorguevich Nazárov, mi consultor e invaluable contrapartida en los temas de Chernobyl. Asimismo, al académico Pável V. Florensky por sus consejos y revelaciones.

Al Padre Savva Gaglóev y a la *mátushka*, por su infinita bondad.

A Ernesto Litvínov, artista erudito, en memoria de su padre.

Un agradecimiento especial a D. Eusebio Leal Spengler, a quien acompañé hasta el final de su vida como amigo y colaborador, al igual que lo hicieron la Dra. Miriam Escudero, Yohany Le-Clerc y otros colegas de la Oficina del Historiador de La Habana que me resultan entrañables.

Por último, a mi madre por su siempre atinada corrección editorial; a mi hermano Carlo y, por supuesto, a Lizzett, mi esposa, quien asumió conmigo todos los riesgos en condiciones de incertidumbre radical.





# ÍNDICE

Resumen/Sumario/13

Abreviaturas más utilizadas/15

Figuras, infografías y tablas/16

Introducción/19

Capítulo 1/ El dilema del doble uso: átomos para la «paz sin paz»/38

1.1/ La bomba atómica, artefacto inherentemente político/46

1.2/ La deformación del *ethos nuclear*. Predominio del consecuencialismo/50

1.3/ El riesgo de proliferación nuclear. Las salvaguardias del OIEA/53

1.4/ El nexo intratécnico entre industria militar y energética nuclear/59

1.5/ De los reactores industriales (militares) a los reactores energéticos (civiles)/66

1.5.1/ El Chicago Pile-1: primer reactor nuclear/71

1.5.2/ Generaciones de reactores nucleoenérgicos/74

Capítulo 2/ El dilema «ubicación y seguridad» (*siting and safety*): ¿Pueden explotar los reactores nucleares?/79

2.1/ Kyshtym y Windscale: los primeros grandes accidentes nucleares/87

2.2/ La defensa en profundidad: enfoques determinista y probabilista/90

2.2.1/ El WASH-1400 o informe Rasmussen/94

2.2.2/ De la «DiD clásica» a la «DiD con riesgo informado»/97

2.3/ Three Mile Island: error humano y fallo de causa común (*common-cause failure*)/101

2.3.1/ Caracterización técnica de TMI-2/103

2.3.2/ Accidentes normales, alta fiabilidad y comportamiento humano/110

2.4/ Chernobyl: primera catástrofe sociorradioecológica de magnitud global/113

2.4.1/ El RBMK-1000: «cazar dos liebres de un tiro»/117

2.4.2/ El INSAG-7: versión oficial del accidente/123

2.4.3/ El RBMK-1000 y sus paradojas de la seguridad/131

2.4.4/ La doble explosión: su naturaleza indefinida/136

2.4.5/ El testimonio inconcluso del académico Legásov/139

2.5/ Fukushima Daiichi: primer desastre sociorradioecológico *NaTech* (*Natural Hazard Triggering Technological Disaster*)/146

2.5.1/ Incertidumbre, predicción y vulnerabilidad tecnológica/152

Capítulo 3/ El dilema de las radiaciones ionizantes (dilema socio-radioecológico): «tan bajo como sea razonablemente alcanzable»/158

- 3.1/ La protección radiológica: evolución histórica de un paradigma en crisis/166
  - 3.1.1/ El enigma de las curvas dosis-respuesta: radiobiología *versus* radioepidemiología/168
  - 3.1.2/ Las dosis permisibles: ética *versus* conmensurabilidad/171
- 3.2/ Etapa de la «dosis de tolerancia» (desde 1928 hasta 1954)/175
- 3.3/ Etapa de la «máxima dosis permisible» (desde 1954 hasta 1977)/178
  - 3.3.1/ El Life Span Study: su fundamento epidemiológico /180
  - 3.3.2/ Posibilidad de efectos genéticos heredables/184
- 3.4/ Etapa del Sistema de Limitación de Dosis (desde 1977 hasta la actualidad) /186
  - 3.4.1/ Magnitudes limitadoras de los efectos estocásticos /189
  - 3.4.2/ Juicios de valor para la optimización: antes y después de Chernobyl/195
  - 3.4.3/ La frustración de los radioproteccionistas soviéticos/201
- 3.5/ ¿Aceptabilidad o tolerabilidad?: el criterio ALARA en la encrucijada/208
  - 3.5.1/ Resumen diacrónico de las dosis permisibles/209
  - 3.5.2/ Generalización del criterio ALARA a los accidentes nucleares/213

Capítulo 4/ El dilema regulación/promoción: *How Safe is Safe Enough?* (¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?)/226

- 4.1/ El *riesgo aceptable*: ingenieros nucleares *versus* científicos sociales/230
  - 4.1.1/ Preferencias reveladas *versus* preferencias expresadas/233
- 4.2/ La aceptabilidad del riesgo como problema transcientífico/239
  - 4.2.1/ Arreglo tecnológico (*technological fix*) y propuesta *De minimis*/242
  - 4.2.2/ La Segunda Era Nuclear/245
- 4.3/ La aceptabilidad del riesgo desde la antropología cultural/246
  - 4.3.1/ La tipología retícula/grupo (*grid/group typology*)/249
- 4.4/ La construcción social del riesgo en la incertidumbre/253
  - 4.4.1/ Taxonomía de la incertidumbre/256
  - 4.4.2/ Conocimiento lego y participación pública/262
- 4.5/ La politización del riesgo aceptable: antes y después de Three Mile Island/266

## Capítulo 5: De Chernobyl a Fukushima Daiichi: la energética nuclear en el tránsito hacia la sociedad del riesgo global/269

- 5. 1/ El dilema regulación/promoción como *incertidumbre manufacturada*/275
  - 5.1.1/ Disfuncionalidad de la Escala Internacional de Suceso Nucleares/281
  - 5.1.2/ Posibilidad de catástrofe sociorradicológica por implosión informativa/287
- 5.2/ La comunicación social del riesgo: su abordaje sistémico-constructivista/295
  - 5.2.1/ Bosquejo de la teoría constructivista de los sistemas sociales/297
  - 5.2.2/ La incomunicación del riesgo nuclear y radiológico después de Chernobyl/318
  - 5.2.3/ El punto ciego de Fukushima Daiichi: ¿Cuán vulnerable es lo suficientemente seguro?/334

Conclusiones: ¿El átomo pacífico salvará al mundo? La energética nuclear entre la guerra y la paz, el bien y el mal/341

Bibliografía/351

Bibliografía rusa/386

Anexo/391



## Resumen/Sumario

A partir del accidente de Three Mile Island (1979) se puso de manifiesto el desfase entre la promoción de la energética nuclear y la capacidad societal y/o institucional para garantizar su seguridad mediante mecanismos reguladores. La máxima expresión de este dilema *regulación/promoción* fue la catástrofe sociorradioecológica de Chernobyl (1986), al punto de ser valorada como inicio del tránsito hacia la «sociedad del riesgo global», seguida por el desastre natural y tecnogénico de Fukushima Daiichi (2011). Ante la posibilidad siempre latente de que pueda ocurrir otro peor accidente en el futuro, esta tesis doctoral aborda críticamente el desafío epistemológico que plantea al campo de estudios Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS) el carácter único del riesgo nuclear y radiológico debido a su excepcional potencial catastrófico.

Luego de analizar mediante un balance histórico-sistemático que esos grandes accidentes históricos han provocado giros sucesivos en la «filosofía práctica» de la seguridad nuclear y de la protección radiológica, se ofrece un panorama resumido del *Risk Analysis* y de las diversas teorías sociológicas del riesgo como disciplinas que nacieron en el interregno entre Ciencia, Tecnología y Sociedad, con los ingenieros nucleares de un lado, y los científicos sociales del otro. Al afianzarse en sus respectivas posturas epistemológicas (intratécnica y extratécnica), el antagonismo entre ambas partes devino la antinomia «realismo versus constructivismo social». Aunque pareciera solamente una cuestión filosófica, esta escisión tiene una importancia crucial en la gestión y/o gobernanza del riesgo tecnológico y su relación ontológica con la incertidumbre.

Con un enfoque integrador y equidistante con respecto a esa división filosófica, se asume una perspectiva metateórica propia para contribuir al desarrollo de una epistemología política de la tecnociencia nuclear, legitimando la necesidad de su abordaje crítico sobre una base conceptual que incorpore los aspectos empíricos de la actividad ingenieril. Especial significado se otorga a la necesidad de concientizar la *vulnerabilidad* como dimensión antropológica que debe priorizarse a partir de las experiencias con las tecnologías nucleares accidentadas. Finalmente se conjetura sobre la posibilidad de una «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa». Esto con vistas a proponer un nuevo marco analítico de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico desde una perspectiva de los estudios CTS que propicie la avenencia entre el realismo empírico de los ingenieros nucleares y el socioconstructivismo de los científicos sociales.



## Abreviaturas más utilizadas:

- AEC: Atomic Energy Commission (Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos)
- ALARA: As Low As Reasonably Achievable (Tan bajo como sea razonable alcanzable)
- BDBA: Beyond Design Basis Accident (Accidente superior a la base de diseño)
- BWR: Boiling Water Reactor (Reactor de agua en ebullición)
- CEN: Centrales Electronucleares
- ECCS: Emergency Core Cooling System (Sistema emergente de enfriamiento del núcleo)
- HRC: Human Reliability Analysis (Análisis de Fiabilidad Humana)
- HROT: High Reliability Organizations Theory (Teoría de las Organizaciones de Alta Fiabilidad)
- IAEA: International Atomic Energy Agency (Organismo Internacional de la Energía Atómica)
- ICRP: International Commission on Radiological Protection (Comisión Internacional de Protección Radiológica)
- ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements (Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas)
- INSAG: International Nuclear Safety Advisory Group (Grupo de Consulta Internacional para la Seguridad Nuclear)
- JCAE: Joint Committee on Atomic Energy (Comité Conjunto del Congreso de los Estados Unidos sobre Energía Atómica)
- LNTM: Linear No-Threshold Model (Modelo Lineal Sin Umbral)
- LOCA: Loss-of-Coolant Accident (Accidente de pérdida de refrigerante)
- LSS: Life Span Study (Estudio sobre duración de la vida)
- LWR: Light Water Reactor (Reactor de agua ligera)
- MCA: Maximum Credible Accident (Máximo accidente creíble)
- NRC: Nuclear Regulatory Commission (Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos)
- OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica
- PRA: Probabilistic Risk Assessment (Evaluación probabilista de riesgo)
- PSA: Probabilistic Safety Assessment (Evaluación probabilista de la seguridad)
- PWR: Pressurized Water Light Reactor (Reactor de agua ligera a presión)
- RMBK: Reaktor Bolshoi Moshchnosti Kanalny (Reactor de gran potencia con canales)
- SAA: Severe Accident Analysis (Análisis de accidentes severos)
- SMA: Severe Accident Management (Gestión de los accidentes severos)
- UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones)

## Figuras, infografías y tablas:

Figura 1: Estructura del trabajo/23

Figura 2: Esquema de las centrales electronucleares con ciclo térmico (directo e indirecto)/40

Figura 3: Los dilemas morfogénicos de la energética nuclear/40

Figura 4: Diagrama simplificado del alcance de las actividades nucleares en virtud de un acuerdo de salvaguardias amplias (ASA) y un protocolo adicional/56

Figura 5: Esquema simplificado del sistema de barreras físicas para la contención radiactiva en los reactores LWR (segunda generación)/93

Figura 6: Estado final del reactor PWR de TMI-2 con los daños causados por la fusión parcial de su núcleo/108

Figura 7: Puesta en marcha de reactores nucleares por tipologías en la Unión Soviética/122

Figura 8: La radiología como campo interdisciplinar/159

Figura 9: El enigma de las curvas dosis-respuesta/169

Figura 10: Tendencia de los excesos de leucemia y cánceres sólidos en sobrevivientes de las bombas atómicas/182

Figura 11: Adecuación de la noción de «tolerabilidad» del riesgo al sistema de protección radiológica basado en los tipos de situaciones de exposición/223

Figura 12: Marco analítico del dilema regulación/promoción de la energética nuclear/228

Figura 13: Estructura de la relación beneficio-riesgo por exposición involuntaria/234

Figura 14: Tipología *grid/group* de la teoría cultural/250

Figura 15: Taxonomía de la incertidumbre según Brian Wynne/258

Figura 16: Distinciones *sistema/entorno* en teoría general de sistemas/300

Figura 17: Concepto de *forma* según Niklas Luhmann, basándose en Spencer Brown/321

Figura 18: Nuevo marco analítico de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico/337

Infografía 1: El ciclo de combustible nuclear como nexo intratécnico entre energética nuclear e industria militar (dilema de doble uso)/65

Infografía 2: Algunas nociones básicas sobre el funcionamiento de un reactor nuclear térmico/72

Infografía 3: Relación cronológica de los principales accidentes históricos con las épocas de la energética nuclear, la evolución de la seguridad nuclear y las generaciones de reactores nucleoenérgicos/83

Infografía 4: Evolución del principio de «defensa en profundidad» en las centrales electronucleares con arreglo a las lecciones de los accidentes históricos/99

Infografía 5: Caracterización del accidente de Three Mile Island (1979)/104

Infografía 6: Reactor RBMK-1000 y elementos constructivos de su zona activa/120

Infografía 7: Caracterización del accidente de Chernobyl (1986)/132

Infografía 8: Versiones de la doble explosión del RBMK-1000/137

Infografía 9: Caracterización del accidente de Fukushima Daiichi (2011)/150



Infografía 10: Clasificación convencional de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes/164

Infografía 11: Primeras nociones básicas para la cuantificación energética de las radiaciones ionizantes/176

Infografía 12: Concepción del Sistema de Limitación de Dosis/188

Infografía 13: Magnitudes limitadoras y operacionales para riesgo de efectos estocásticos/191

Infografía 14: Evolución histórica del Sistema de Limitación de Dosis (antes y después de Chernobyl)/210

Infografía 15: Transformaciones conceptuales del sistema de protección radiológica después de Chernobyl/218

Infografía 16: Aplicación de la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES)/284

Infografía 17: Nociones de la teoría constructivista de sistemas sociales de Niklas Luhmann/302

Infografía 18: La palabra *riesgo*: etimología y primeras evidencias de su empleo en Europa/326

Tabla 1: Redefiniciones de las magnitudes limitadoras para efectos estocásticos/190

Tabla 2: Variaciones de los coeficientes nominales de riesgo ajustados al detrimento/200



## INTRODUCCIÓN

Esta tesis doctoral iba a estar dedicada íntegramente a la tragedia de Chernobyl, pero sucedió Fukushima Daiichi. Si ya era difícil abordar el tema de la energética nuclear para tratar de entender su enorme y contradictoria influencia en el desarrollo de la civilización industrial y postindustrial, la tarea se hizo mucho más ardua debido a los nuevos desafíos ontológicos y epistemológicos que planteó ese más reciente desastre tecnológico, al ser precedido por un desastre natural. Para colmo, ya revisando el texto de esta memoria para su entrega final, comenzó la pandemia del coronavirus (COVID-19). En dependencia de cuáles sean las consecuencias de esta «pesadilla global», mi hipótesis del carácter único del riesgo nuclear y radiológico podría ganar o perder en validez explicativa. Sin embargo, profundas razones me impulsaron a no cejar en el empeño mientras pasaban los días y aún no se avizoraba el regreso a la añorada normalidad.

¿Y si en lugar del Sars Cov-2, para el cual hubiera sido suficiente una vacuna que nos inmunizara a tiempo, se tratara de una enorme contaminación radiactiva que condenara inexorablemente a las generaciones presentes y futuras? Aunque pudiera enarbolarse esta interrogante como un motivo suficiente para justificar la pertinencia del tema escogido, las actuales circunstancias me obligan a revelar otros factores motivantes de índole personal. Yo pertencí al último grupo de estudiantes extranjeros del Instituto Energético de Moscú (MEI) que hizo sus prácticas de cuarto año de la carrera Centrales Atómicas e Instalaciones en la electronuclear Vladimir Ilich Lenin de Chernobyl, apenas unos meses antes de ocurrir la explosión del RBMK-1000 de su cuarto bloque. Un turno de madrugada, bajé junto a un grupo de operarios soviéticos a cambiar flujómetros en las tuberías que conducían el agua de enfriamiento hacia la zona activa de ese aciago reactor nuclear, entonces detenido en mantenimiento parcial. Nunca pude olvidar aquella tremenda experiencia y, al cumplirse el décimo aniversario de haber sucedido el desastre, conté mis vivencias en un artículo publicado mientras trabajaba como redactor-reportero de la Agencia Prensa Latina, en su redacción de Ciencia y Técnica. Recordé entonces cuando desde mi habitación en el hotel Polissya, que significa «espiga» en ucraniano, cada mañana al asomarme a la hermosa ciudad de Prípiat, yo veía la inmensa pancarta roja con la frase: «El átomo pacífico salvará al mundo»<sup>1</sup>.

Se ha dicho que la tragedia de Chernobyl partió en dos mitades la vida de millones de personas. Salvando las distancias con respecto a sus víctimas reales, yo podría contarme entre uno de sus afectados. También como reportero de Prensa Latina, aprovechando mi condición de ingeniero, fui enviado a la Central Electronuclear (CEN) de Juraguá para informar sobre el estado de su construcción, poco tiempo antes de detenerla en 1992. Situada en la localidad del mismo nombre, en la provincia sureña de Cienfuegos, a unos 245 kilómetros de La Habana, se le había bautizado como la «Obra del Siglo». Allí pude constatar con mis propios ojos que el equipamiento instalado comenzaba a

---

<sup>1</sup>Luego de ser transmitido por la Agencia Latinoamericana de Noticias Prensa Latina, este artículo fue publicado en la revista cubana *Bohemia* (Calcines, 1996). Puede consultarse en el anexo de esta tesis doctoral.

herrumbrarse y las enormes vasijas donde iría el combustible nuclear se habían quedado vacías para siempre. Cada vez que he regresado a esa bella ciudad costera, mi vista se pierde en lontananza hasta avizorar las cúpulas de sus reactores nucleares que nunca funcionaron. ¿Qué hacer con esa instalación abandonada? «Convertirla en un museo», me respondió uno de los hermanos Kennedy cuando lo entrevisté durante su visita a La Habana junto a un grupo de expertos nucleares estadounidenses<sup>2</sup>. Tenía razón. Tal vez Juraguá sea uno de los restos simbólicos más representativos de la Guerra Fría y su inusitado colofón: el derrumbe del otrora campo socialista soviético. ¿Hasta qué punto influyó la catástrofe de Chernobyl en ese desenlace? Todavía no lo sabemos explicar a ciencia cierta, pero si me preguntaran respondería sin dudar: «Fue crucial».

Este trabajo de tesis doctoral pudiera entenderse como una continuación de las vivencias antes apuntadas, pero con un discurso mucho más elaborado y fundamentado conceptualmente sobre el carácter único del riesgo nuclear y radiológico. Como una interpelación a mí mismo en mi carácter dual de ingeniero en centrales atómicas, historiador y periodista me he propuesto adoptar una perspectiva metateórica propia que contribuya a esclarecer lo que considero grandes insuficiencias en el análisis de la energética nuclear por la historia, filosofía y sociología de la ciencia. Para ello, primeramente, me sumé en la teoría del riesgo y la incertidumbre, tratando de establecer una relación entre los problemas filosóficos y los problemas concretos, estos últimos relacionados con los aspectos empíricos de la actividad tecnocientífica nuclear. Pero en lugar de optar *a priori* por un autor o tendencia de pensamiento para fundamentar mis puntos de vista, me interesó más vivir en carne propia cuáles habían sido los cambios en la «filosofía práctica» de la seguridad nuclear y de la protección radiológica desde que yo había terminado mis estudios en la extinta Unión Soviética. Este deseo me hizo regresar a la especialidad para actualizarme con el *ethos* nuclear.

A pesar de haber pasado tantos años de darse por concluida la Guerra Fría, nuevos vientos de una gelidez notable comenzaban a batir alrededor del tema de la proliferación nuclear, cuando ya había irrumpido una nueva forma de riesgo en la escena mundial: el terrorismo. Y aunque el dogma de la «neutralidad» pareciera cada vez más insostenible, aun así gran parte de los expertos nucleares (específicamente, los ingenieros) seguían con su visión tradicional de la tecnología, considerando «pacífico» —o, cuando menos, «neutral»— el empleo controlado de la fisión atómica para fines civiles. En lugar de relegar este aspecto al final de mi tesis, como hace la mayoría de los libros más actuales dedicados a la energética nuclear, me impuse desde un inicio encarar el dilema ontológico del doble uso (civil y militar) para sostener que esta opción energética debe su condición de «riesgo global» al imperativo bélico de su morfogénesis; concretamente a la decisión estadounidense de lanzar las bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki.

---

<sup>2</sup>El 19 de febrero de 1996 el presidente cubano Fidel Castro recibió a un grupo de expertos estadounidenses, entre los que se encontraban los hermanos Michael y Robert Kennedy, sobrinos del presidente John F. Kennedy e hijos del también asesinado senador Bob Kennedy, quienes le recomendaron abandonar el proyecto de la CEN de Juraguá.

La preocupación por el dilema de doble uso adquirió una renovada actualidad luego de los sucesos de Fukushima Daiichi en 2011. Al reencontrarse con un pasado que había borrado hasta de sus libros de texto escolares, la sociedad japonesa se enfrentó a la contingencia histórica de haber sido la primera y única en sufrir las consecuencias perjudiciales de la energía nuclear por partida doble: militar y civil. Con el título «La responsabilidad de Fukushima», Kenzaburo Öe lanzó un sentido alegato antinuclear, pensando sobre todo en las mujeres —las jóvenes madres— que sufrirían los presumibles efectos dañinos de la radiactividad artificial. Con sencillas palabras, el gran escritor expresó la magnitud del drama a manera de interrogantes: «Estamos endosando nuestras cargas a las generaciones futuras. ¿Cuándo abandonó la humanidad los principios morales que nos impedían hacer algo así? ¿Hemos superado un punto de inflexión fundamental en la historia? (Öe, 2011).

Al sensibilizarme con ese alegato moral, tanto o más que la «neutralidad» preconizada por los ingenieros, me desconcertaba que a partir de cierto momento se hubiera evitado y hasta rechazado el abordaje crítico de la energética nuclear por los Estudios de Ciencia, Tecnología y Sociedad (ECTS). Salvo excepciones, tal pareciera como si la atención de los científicos sociales se hubiera redirigido totalmente hacia las consecuencias del cambio climático y, luego de 2006, hubiera desaparecido prácticamente toda instancia crítica con respecto al riesgo nuclear y radiológico. Ese año se dieron a conocer las conclusiones del Fórum de Chernobyl, auspiciado por el OIEA y otros organismos internacionales, aprovechando que se cumplía el veinte aniversario de aquel «accidente grave». Al argüir que el número de sus víctimas reales se había sobrevalorado, se desestimaba cualquier alusión al rango de «catástrofe», aun cuando millones de personas fueron evacuadas y millones de hectáreas quedaron contaminadas radiactivamente. Desde entonces, se impulsó el renacimiento de la energética nuclear como la única solución posible al calentamiento global.

«Chernobyl no es una buena idea para una tesis doctoral», me insistía el reconocido académico Anatoli Gueorguevich Nazárov en referencia a que era un tema demasiado enrevesado y complejo. Siendo una de sus víctimas reales, radiogeólogo desde muy joven, había sido transfundido en dos ocasiones para evitar la leucemia y, como un cilicio perenne, el estroncio radiactivo taladraba la tibia de su pierna izquierda. Menciono este testimonio porque es el trasfondo no revelado de esta tesis doctoral: las conversaciones con importantes especialistas ex-soviéticos que me resultaron sumamente valiosas para percibir el conflicto humano que subyace a la tragedia. Pero una vez relegada aquella infausta experiencia, aprendidas supuestamente sus lecciones, la energética nuclear de Rusia se proyecta con denodado optimismo hacia un futuro que le permitiría —entre otros importantes objetivos estratégicos— la conquista de los tesoros naturales del Mar Ártico. Anclada en aquellas aguas heladas, la planta nuclear flotante *Akademik Lomonósov* fue puesta en operación, el 22 de mayo de 2020, en la lejana península septentrional de Chukotka.

Por esos mismos días, se conocían los planes de renuncia de la administración norteamericana a sus compromisos con el Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos

Nucleares, firmado por 184 naciones en 1996; precisamente cuando se cumplía el décimo aniversario de Chernobyl. ¿Podríamos despertarnos un día próximo con la noticia de que Irán ha detonado su propia bomba nuclear, al igual que lo hizo Corea del Norte en 2006?<sup>3</sup>

Siempre me ha parecido de una ingenuidad preocupante que, para tratar de validar la neutralidad de la ciencia como saber, aunque no como actividad humana, un prestigioso filósofo como Evando Agazzi minimice la importancia del doble uso de la energía nuclear en su libro *El bien, el mal y la ciencia. Las dimensiones éticas de empresa científico-tecnológica* [1992] (1996). Su argumento consiste en que todos los conocimientos científicos o precientíficos se han empleado siempre para destruir a los hombres, porque hasta un instrumento «contemplativo» como el telescopio fue promovido por Galileo para avizorar a las naves enemigas. Si bien reconoce que la energía atómica constituye un peligro de destrucción potencial para la humanidad entera, Agazzi se expresa de manera optimista a su favor cuando asevera que «tras no muchos años podría resultar la principal fuente de supervivencia, una vez que llegase a ser “segura”» (Agazzi, 1996: 79). Me pregunto: ¿a qué plazo temporal en años se refiere Agazzi y qué significa para él «segura» como científico social, siendo también físico de formación? Mi preocupación es que, con ese tipo de ejemplos reduccionistas como el del telescopio, se contribuya a que la filosofía de la ciencia y la tecnología termine supeditándose a la «filosofía práctica» de los ingenieros nucleares. A esta inquietud filosófica obedece en gran medida el cometido de esta tesis doctoral.

### *Problemáticas de investigación y estructura capitular*

Esta tesis doctoral se propone un análisis filosófico crítico de la energética nuclear y sus tecnologías accidentadas. Con este primer metaobjetivo, se ha adoptado una metodología propia de doble enfoque (intratécnico y extratécnico) que combina el abordaje sincrónico con la secuencialidad diacrónica del propio objeto de investigación: los grandes accidentes nucleares históricos. *¿Es cada uno de esos accidentes un caso independiente por sus causas y consecuencias o, vistos en su conjunto, arrojan características comunes por las cuales podría vislumbrarse una tendencia en la incertidumbre?*

Para tratar de responder a esta interrogante se adopta el enfoque intratécnico en los tres primeros capítulos, en los que se examina cómo ha ido transformándose la filosofía práctica de la seguridad nuclear y de la protección radiológica en correspondencia con ese derrotero accidentado: Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) y Fukushima Daiichi (2011). Mediante un balance histórico-sistemático, distinguimos tres dilemas ontológicos o morfogenéticos que rigen la tendencia catastrófica de esa opción energética: el dilema del

---

<sup>3</sup>Tanto Rusia como Estados Unidos han modernizado su armamento nuclear en años recientes, recolocándolo en el centro de sus estrategias de seguridad militar. Que ambas potencias hubieran renunciado al tratado bipartita sobre liquidación de los misiles de corto y medio alcance, firmado por Mijail Gorbachev y Ronald Reagan en 1987, fue el primer síntoma de la pérdida de confianza mutua y del inicio de una nueva escalada nuclear que involucra también a China. Por eso Donald Trump, eludiendo establecer un compromiso solamente con la contraparte rusa, exigía que el gigante asiático también firmara el acuerdo New Star sobre limitación de armas nucleares estratégicas. Durante su primera conversación, los presidentes Vladimir Putin y Joe Biden decidieron renovar este último tratado, único que queda en vigor entre sus dos países, cuando ya estaba a punto de expirar en febrero de 2021. La cuestión de Irán y Corea del Norte son temas pendientes.

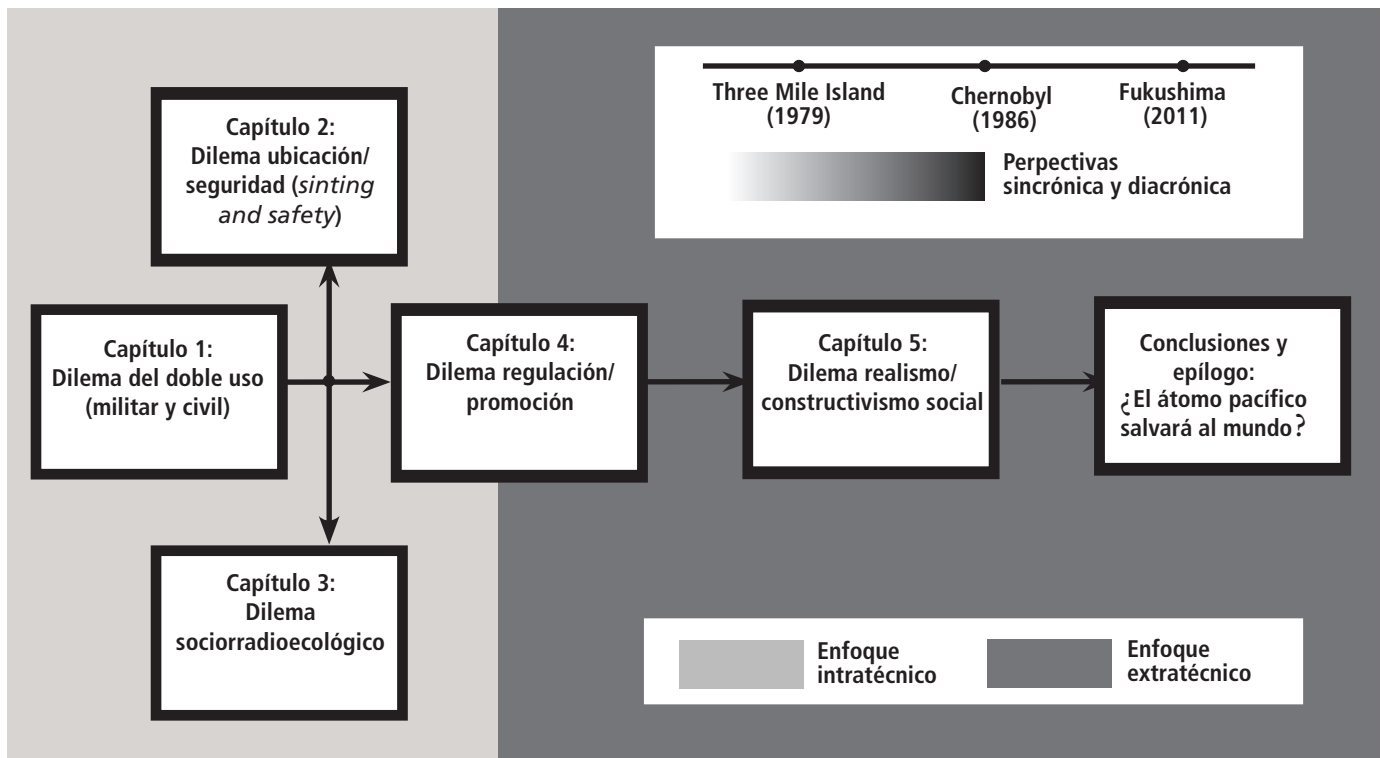


Figura 1: Estructura capítular de la tesis

doble uso (civil y militar) y, supeditados a este, el dilema «ubicación/seguridad» (*siting and safety*) y el dilema de las radiaciones ionizantes (sociorradioecológico). Cuando decimos «dilemas ontológicos o morfogenéticos» tenemos en cuenta su carácter de disyuntivas irresolubles que, si bien son construidas socialmente, tienen un origen o causa real: el poder destructivo, absoluto y subitáneo de la energía nuclear a partir de la fisión del uranio y el plutonio. A estos dilemas responde la estructura capítular con sus respectivas problemáticas particulares de investigación (ver figura 1):

*Dilema del doble uso: civil y militar* (capítulo 1): ¿Es posible una energética nuclear que sea netamente pacífica desde el punto de vista tecnológico?

*Dilema ubicación/seguridad* (*siting and safety*) (capítulo 2): ¿Pueden explotar los reactores nucleares a pesar de sus sistemas de seguridad?

*Dilema sociorradioecológico* (capítulo 3): ¿Cuál sería la base científica para proteger al público durante una contaminación radiactiva, teniendo en cuenta que coexisten varios puntos de vista antagónicos sobre los efectos estocásticos de las bajas dosis de radiación ionizante (menores de 100 mSv) por encima del fondo natural?

Vista como una unidad sintética, esa triada dilemática conforma el dilema *regulación/promoción*, que consideramos el dilema de los dilemas de la energética nuclear. A partir del cuarto capítulo, la caracterización de este gran dilema se abre a la reflexión sociológica: *¿Hasta qué punto los tres grandes accidentes superiores a la base de diseño (Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima Daiichi) son resultado de un desfasaje entre la promoción de la energética nuclear y la capacidad societal y/o organizacional para garantizar su seguridad mediante mecanismos reguladores?*

Con este planteamiento se logra enlazar —a manera de pivote— el enfoque intratécnico de la primera parte de la tesis doctoral con la perspectiva extratécnica de la segunda parte. Esta última aborda el desafío epistemológico que supone a los ECTS la cuestión de si puede aspirarse a la aceptabilidad social de la energía nuclear a pesar de su esencia dilemática. Se exhorta a encarar las siguientes disyuntivas, considerándolas irresolubles tanto para los expertos nucleares como para los científicos sociales:

*Dilema regulación/promoción* (capítulo 4): ¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?

*Dilema realismo/constructivismo social* (capítulo 5): ¿Qué ha hecho cambiar a la sociedad postindustrial con respecto al pasado: la realidad de los nuevos riesgos o la construcción social de los mismos?

Mientras la visión intratécnica tiene un alto componente filosófico práctico ingenieril, en lo adelante se prioriza la visión humanística: psicológica, sociológica, cultural, política... De hecho pueden leerse antes los capítulos cuarto y quinto como una unidad, y después cualesquiera de los tres primeros, ya que todos responden al análisis sincrónico y diacrónico de los tres grandes accidentes nucleares históricos. Este ha sido el propósito de la estructuración capitular y obedece a la postura epistemológica y metodológica de procurar la observación de segundo orden (observación de la observación): el científico social observa al ingeniero, y viceversa, tratando de señalarse mutuamente cuáles son sus respectivos «puntos ciegos».

#### *Plausibilidad teórica y fundamentación empírica*

Cuando se dialoga con un ingeniero nuclear sobre el riesgo tecnológico, necesariamente debe adoptarse un enfoque realista, de lo contrario no habría aceptación de la comunicación. Paradójicamente, como mejor se entiende esta improbabilidad comunicativa es profesando el constructivismo social más radical. Al proponer un enfoque equidistante con respecto a la antinomia filosófica «realismo *versus* constructivismo social», esta tesis doctoral se propuso —como segundo metaobjetivo— contribuir a la superación del que identifica como principal obstáculo epistemológico para el abordaje de la energética nuclear por los ECTS: *¿Puede conciliarse la noción realista de riesgo de los expertos nucleares (específicamente, los ingenieros) con la noción constructivista de riesgo que tienen los científicos sociales, y si quisiéramos que sí, sobre qué base entonces cabría propiciar esa avenencia?*

Si unimos este segundo metaobjetivo al primero ya señalado de efectuar un análisis filosófico crítico de la energética nuclear y sus tecnologías accidentadas, este trabajo puede clasificarse por su plausibilidad teórica y fundamentación empírica como una investigación cualitativa que se inscribe dentro de los ECTS dedicados a la temática del riesgo y la incertidumbre, pero que a su vez reflexiona filosóficamente sobre el estancamiento de este campo de estudios. Las preguntas de investigación y material empírico se refieren fundamentalmente a la práctica realista de los ingenieros nucleares como observación de primer orden (enfoque intratécnico), mientras que el cumplimiento de ambos metaobjetivos responde a una observación de segundo orden (enfoque extratécnico) con énfasis en el aprovechamiento de la epistemología sistémico-



constructivista. Para aclarar esta dualidad de enfoques (intratécnico/extratécnico = observación de primer orden/ observación de segundo orden) vale la pena adelantar una de nuestras principales conclusiones: la imposibilidad de resolver las antinomia filosófica «realismo *versus* constructivismo social», pero la inevitabilidad de tenerla en cuenta por los ECTS para sobrepasarla como conflicto metateórico.

Esto para nada significa encontrar un punto medio entre realismo y constructivismo social; o lo que en nuestro caso equivale a decir: un consenso filosófico entre ingenieros nucleares y científicos sociales. De lo que se trata es de incorporar esa distinción dilemática en los debates sobre la energética nuclear, reconociendo que la brecha epistemológica entre sus partidarios y detractores tiene un motivo filosófico, además de político. Todo hace indicar que los partidarios acérrimos de la energética nuclear suelen ser realistas empíricos, mientras que sus máximos detractores suelen ser constructivistas sociales. Al establecer esta diferenciación tan drástica en términos netamente heurísticos, estoy consciente que oscilaré entre esos dos polos opuestos sin que mi posición como autor quede por fin explicitada. Aunque este aspecto sea un «punto débil» de nuestra investigación <sup>4</sup>, no lo es tanto mientras se carezca de una orientación teórica que haya «amigado» esos paradigmas en conflicto, echándose todavía en falta una taxonomía transdisciplinaria de ambas perspectivas del riesgo: realista (objetiva) y socioconstructivista (subjetiva) (Renn, 1992; Aven y Renn, 2010).

Manteniendo esa equidistancia como premisa, hemos encarado las tensiones ontológicas y epistemológicas con ayuda de una heurística positiva de la argumentación que se interesa en la exploración comparativa de autores bien representativos de cada tendencia (realismo y constructivismo social) para entender la especificidad de sus posiciones con respecto al riesgo nuclear y radiológico. El propósito no ha sido integrarlos metateóricamente, sino establecer cuáles son los motivos y problemas comunes de sus puntos de vista, entre los cuales aparece siempre la indefinición conceptual de las nociones de *riesgo* e *incertidumbre*. ¿Significan lo mismo esas categorías; incluye una a la otra, o son como las distintas caras de una misma moneda? Al no haber tampoco una respuesta unívoca, todo depende de cuál sea la base probatoria de nuestras declaraciones, ya sean realistas o socioconstructivistas.

Aunque se sostenga una ontología realista, resulta obvio que el «mundo de ahí afuera» y nuestro conocimiento del mismo nunca pueden ser isomorfos debido al papel intermedio de la percepción humana, incluidas nuestras sensaciones y emociones. Por eso cabe plantearse la epistemología del riesgo y la incertidumbre como un continuo teórico —a modo de círculo nunca cerrado— que se extiende desde el realismo/objetivismo al relativismo/subjetivismo. Un extremo sería el *paradigma positivista*, para el cual el riesgo real (objetivo) puede ser mensurado probabilísticamente, mientras que la incertidumbre es apenas un residuo del cálculo matemático; entiéndase como cálculo ingenieril cuando se trata de tecnología. El otro extremo sería el *paradigma constructivista*, cuya versión

---

<sup>4</sup>La Dra. Marta I. González García, en calidad de experto informante, señaló muy justamente este «punto débil» de la presente tesis doctoral. Aquí se aprovecha para responder a ese señalamiento, reconociéndolo y agradeciéndolo, pero exhortando a entenderlo como una «vulnerabilidad», incluso positiva, a tenor con la tesis filosófica del propio trabajo.

más fuerte rehúye definir el riesgo por considerarlo algo percibido (subjetivo), tratándolo en todo caso como un grado de incertidumbre, cuya manifestación más profunda es la indeterminación: se ignora lo que se ignora.

Para tener un asidero metateórico que englobe conceptualmente el binomio riesgo-incertidumbre, el sociólogo estadounidense Eugene A. Rosa propuso la siguiente definición: «El riesgo es una situación o evento en que algo de valor humano (incluyendo los humanos mismos) ha sido puesto en juego y el resultado es incierto» (Rosa, 1998: 28)<sup>5</sup>. Esta definición es la piedra angular de su Realismo Reconstruido (Reconstructed Realism, RR), una propuesta metateórica que combina realismo ontológico (RO) con jerarquismo epistemológico (JE); de ahí que se conozca con el acrónimo ROJE. De esta manera, Rosa se propuso tender un puente entre la teoría y la práctica para el análisis del riesgo, abarcando como «análisis» a cuatro fases separadas: identificación del riesgo (o mejor, del peligro), estimación del riesgo, evaluación del riesgo y gestión del riesgo.

El ROJE reconoce la falibilidad de todas las afirmaciones cognoscitivas, pero subraya que algunas son más fiables que otras. Aunque se carezca siempre de certeza o verdad absoluta, hay grados de aproximación a la verdad en dependencia del tipo y calidad del conocimiento. Mediante los criterios de *ostensibilidad* («¿Ves lo que yo veo?») y *repetibilidad* («Espera y tendrás otra oportunidad para observar lo que yo veo»), pueden lograrse acuerdos de intersubjetividad que permiten identificar un riesgo a partir de las evidencias empíricas, así como juzgar su ubicación en el continuo epistemológico realismo-constructivismo social. Este principio de demarcación posibilita saber también hasta qué punto ese riesgo puede ser estimado con las herramientas metodológicas a disposición de los expertos; por ejemplo, mediante la clásica ecuación ingenieril: el riesgo es igual al producto de la probabilidad del daño y su magnitud. A medida que se estrecha la evidencia empírica, aumenta la aplicabilidad del constructivismo social, ya sea como teoría cultural, análisis del discurso u otros sistemas de conocimiento. Consecuentemente, se incrementan los reclamos participativos para involucrar a todas las partes interesadas, aunque sean profanas en materia científica.

Como ingeniero que abraza una ontología realista, nos parecía promisorio concordar con el RR y su propuesta ROJE, pero luego dudamos de su pertinencia metateórica, sobre todo cuando se adopta una epistemología socioconstructivista. Esta duda nuestra atañe al modo de concebir la relación entre riesgo e incertidumbre como un problema de gradación del conocimiento de los expertos, sin tener en cuenta que este conocimiento —por muy realista que sea— puede ser él mismo una gran fuente de riesgo e incertidumbre. Sería el caso de la energética nuclear y su derrotero accidentado debido a la irresolubilidad de sus dilemas ontológicos. De ahí que renunciáramos al RR/ROJE y su brazo metodológico: la llamada «ciencia postnormal» (Postnormal Science), una concepción desarrollada por Silvio Funtowicz y Jerome R. Ravetz, ambos filósofos con formación matemática (Funtowicz y Ravetz, 1990, 1992, 2000). A fin de cuentas decidimos actuar heurísticamente con una

---

<sup>5</sup> *Risk is a situation or event where something of human value (including humans themselves) has been put at stake and where the outcome is uncertain* (Rosa, 1998: 28).

perspectiva propia, sin ceñirnos a ningún programa de investigación por la razón de fuerza mayor que exponemos a continuación.

Todo hace indicar que los estudios CTS sobre el riesgo y la incertidumbre —en especial, la ciencia postnormal— se han concentrado en responder a la teoría realista reflexiva de Ulrich Beck sobre el advenimiento de la «sociedad del riesgo global». Pero no puede entenderse la evolución del pensamiento beckiano sin tener en cuenta que responde en gran medida a las invectivas de su coterráneo Niklas Luhmann, quien tenía una visión totalmente diferente del riesgo, entendiéndolo como constructo comunicacional. La obra de este último ha sido mucho más difícil de traducir del alemán al inglés por la complejidad de su aparato teórico<sup>6</sup>. Esto explicaría que esa polémica se haya desbalanceado en la dominante literatura anglófona a favor de la tesis macrosociológica de Beck, soslayando la teoría sistémica constructivista de Luhmann sobre la heterarquía de la sociedad funcionalmente diferenciada, así como su importante llamado a salirse del esquema riesgo-seguridad.

Uno de nuestros más firmes propósitos fue aprovechar las aportaciones de ambos pensadores alemanes, justipreciándolas por igual, para abordar críticamente la nefasta aplicación de la Escala Internacional de Sucesos Nucleares (INES por sus siglas en inglés) durante los sucesos de Fukushima Daiichi. Cuando esa herramienta de comunicación global fue concebida luego de Chernobyl por los expertos de la OIEA, asignando niveles de gravedad en retroactivo a los accidentes pasados, jamás se pensó que su máxima calificación de siete niveles tuviera que otorgarse nuevamente —y en tiempo real— a otro desastre semejante o hasta superior. Entre los fines de esta tesis doctoral, su resultado esperado más importante sería fundamentar la necesidad de diálogo entre los ingenieros nucleares y los científicos sociales para abordar la comunicación social del riesgo durante una gran contaminación radiactiva transfronteriza o, incluso, ante la inminencia de un ataque nuclear, como ocurrió en octubre de 1962 cuando la crisis de los misiles soviéticos en Cuba.

Cuando se traspasa el umbral de catástrofe, el carácter único del riesgo nuclear y radiológico exacerba la dubitación filosófica hasta un grado tal, que he optado por atenerme a un «agnosticismo epistemológico», aunque como ingeniero siguiera profesando una ontología realista. Esta reticencia cognitiva se justificaría todavía más de ampliar el diapason teórico, incluyendo otros campos del conocimiento que son también válidos, pero desbordan el marco analítico de nuestra investigación, como son la caología y la teoría de catástrofes, o incluso —¿por qué no?— las versiones más serias de relativismo epistémico y hasta el idealismo. Prefiero inclinarme entonces hacia la existencia de una dimensión del riesgo que permanece abierta hacia la perspectiva cultural y la contingencia histórica a escala societal. O lo que es decir: el riesgo es un constructo humano —y, por ende, social— en vínculo inextricable con la incertidumbre.

---

<sup>6</sup> Por suerte existen buenas traducciones italianas y, sobre todo, españolas de los libros de Luhmann gracias a la proeza editorial de su alumno y discípulo mexicano Javier Torres Nafarrate. A este se debe la temprana edición hispana de *Soziologie des Risikos* (Luhmann, 1991), publicada al año siguiente de ver la luz en alemán. Lanzado en 1986, el primer libro de Beck sobre su teoría de la sociedad del riesgo tardaría hasta 1992 y 1998 en salir traducido al inglés y español, respectivamente.

### *Objetivos específicos y resultados esperados*

De acuerdo con todo lo antes expuesto, se impone precisar lo que considero principales resultados esperados de esta tesis doctoral. En primer lugar, se ha logrado sistematizar los problemas más acuciantes de la energética nuclear, identificándolos «desde adentro y desde afuera» como dilemas ontológicos que se han ido acrecentando con su derrotero accidentado. Salvo el antecedente del reconocido ingeniero estadounidense Alvin Weinberg, quien abordó la problemática del *Regulator's Dilemma* después del accidente de Three Mile Island para fundamentar la necesidad de una moratoria de la energética nuclear, no conozco otra reflexión crítica que haya empleado ese tipo de doble enfoque (intratécnico y extratécnico) luego de Chernobyl y, menos aún, después de Fukushima Daiichi.

Lo que abunda desde la práctica ingenieril es el análisis comparativo de esos accidentes históricos, dando por sentado que sus lecciones han permitido disminuir el riesgo nuclear y radiológico mediante el fortalecimiento de la «cultura de seguridad» (*safety culture*). A cuestionar este esquema riesgo-seguridad, definiéndolo como el filosofema práctico de los ingenieros nucleares, se dedica nuestro enfoque crítico mediante el análisis sincrónico y diacrónico de tales accidentes. Para lograr este primer metaobjetivo, fueron formulados varios objetivos específicos —o, mejor decir, parciales— entre los cuales podríamos destacar los cinco siguientes:

—revisar la ingente bibliografía sobre la historia de la energética nuclear, su génesis militar y sus accidentes históricos, incluyendo la literatura rusa que no ha sido traducida a otros idiomas. Esto con vistas a identificar cuáles aspectos continúan siendo polémicos sobre las causas tecnológicas de Chernobyl y la magnitud de sus consecuencias radiológicas. Para ello se entrevistó personalmente a científicos, ingenieros y otros protagonistas de la tragedia;

—analizar comparativamente las regulaciones y normativas relacionadas con la seguridad nuclear; en especial, la documentación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Esto con vistas a contextualizar sus sucesivas modificaciones luego de cada accidente histórico, de manera que pueda tenerse una idea de cómo ha variando el principio de Defensa en Profundidad (*Defence in Depth, DiD*) en las centrales electronucleares;

—analizar comparativamente las normativas de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) para saber hasta qué punto existen divergencias y confusiones entre los propios expertos sobre su aplicación en los casos de accidente nuclear, incluyendo el empleo desacertado de las magnitudes radiológicas (radiométricas, dosimétricas, limitadoras y operacionales) y sus unidades de medida;

—corroborar que la noción de «catástrofe» no se maneja como categoría por la ICRP en sus normativas, ni tampoco por el OIEA en su documentación técnica, salvo excepcionalmente cuando conviene hacerlo desde el punto de vista legislativo para adjudicar la responsabilidad en caso de contaminación transfronteriza. Esto con vistas al análisis crítico de la escala INES y las graves deficiencias de su aplicación en tiempo real durante los sucesos de Fukushima Daiichi;

—dilucidar por qué los ingenieros nucleares son tan remisos a aceptar la *vulnerabilidad* como propiedad intrínseca de los sistemas tecnológicos complejos, reconociéndola solamente con respecto a sucesos externos como los desastres naturales. Este fue el principal motivo de mi participación en varios encuentros sobre seguridad nuclear en Rusia y Cuba, atreviéndome a exponer el tema hasta donde fue posible (Kalsines, 2013; Calcines, 2016)<sup>7</sup>.

Tratar de cumplir esos objetivos parciales o específicos no ha sido simple ni breve, pues requirió la exhumación y cotejo de múltiples documentos e instrucciones, además de los grandes tropiezos con las traducciones. De hecho, estoy perfectamente consciente de que puedo haber incurrido en alguna pifia sobre cuestiones técnicas que suscitan dudas hasta a los propios expertos. Pero aun así, esto no restaría validez a nuestro empeño de fundamentar que esos documentos técnicos, supuestamente neutrales, traslucen la intencionalidad política de las decisiones adoptadas por el sistema tecnocientífico nuclear a raíz de los grandes accidentes históricos.

Es así que, en su más profundo fuero interno, esta tesis doctoral defiende la libertad de los pensadores no técnicos para discutir asuntos técnicos, en tanto les corresponde legítimamente ese derecho como respuesta a la inobjetable politización de la ciencia y la tecnología por los propios ingenieros y científicos nucleares. De esta manera sintonizamos con las reflexiones críticas de Langdon Winner cuando clama por el desarrollo de una «filosofía política de la tecnología» en su obra *La ballena y el reactor* (Winner, 2008), específicamente en su ensayo «*Do artifacts have politics?*» («¿Tienen política los artefactos?»), publicado por primera vez en 1996. Inspirado en ese trabajo, asumo su concepto de «tecnología inherentemente política» para sostener que la energética nuclear es el ejemplo más representativo, tanto por las relaciones de poder y autoridad que son inherentes a ese sistema tecnocientífico, como por el hecho de que la sociedad debió reorganizarse en función de las condiciones de operatividad de dicha tecnología, independientemente del sistema socioeconómico vigente: capitalismo o comunismo.

Paralelamente fue encarado el segundo metaobjetivo de esta tesis doctoral: cómo sobreponerse a los escollos epistemológicos que limitan el abordaje crítico de la energética nuclear por los estudios CTS. Para lograrlo, entre otros objetivos específicos o parciales debían cumplirse los cinco siguientes:

—refrendar el *Risk Analysis* como disciplina que significó el debut de los ingenieros nucleares en calidad de «sociólogos empíricos», logrando extrapolar su filosofema práctico del riesgo aceptable (*acceptable risk*) desde el ámbito técnico al ámbito social. Esto con vistas a establecer nuestro propio marco analítico del dilema regulación/promoción de la energética nuclear bajo la pregunta dilemática: *How safe is safe enough?* (¿Cuán suficiente es la seguridad adoptada?; o mejor: ¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?<sup>8</sup>), reconociéndola como el problema fundamental de la seguridad tecnológica.

---

<sup>7</sup>La bibliografía transliterada del ruso se ha separado del resto, por eso mi apellido aparece escrito de distinta manera.

<sup>8</sup>Esta segunda traducción es la empleada por José A. López Cerezo y José Luis Luján en *Ciencia y política del riesgo* (2000), una obra de referencia para adentrarse en el tema desde una perspectiva crítica e interdisciplinar que se adscribe dentro de la mejor tradición de los ECTS.

—definir cuáles sistemas de conocimiento pueden clasificarse bajo el genérico ECTS, aprovechando para recordar que este campo de estudios surgió —entre otras razones— como manifestación académica de la reacción pública contra el secretismo de ascendencia militar, cuando los parlamentos de las democracias occidentales tomaron conciencia de la necesidad de regular y dirigir las aplicaciones de la tecnociencia nuclear. Esto con vistas a destacar el trasfondo político que acompaña siempre a toda polémica sobre esa opción energética, incluso a la reflexión de índole científica o filosófica;

—proporcionar una visión panorámica del *Risk Analysis* y las teorías sociológicas que han abordado el riesgo nuclear y radiológico para ilustrar el continuo teórico desde el paradigma positivista hasta el paradigma constructivista. Esto con vistas a sostener la imposibilidad de consensuar tales paradigmas en conflicto debido a su distinta interpretación del riesgo y su relación con la incertidumbre.

—profundizar en las teorías macrosociológicas del riesgo que apuntan hacia un desenlace catastrófico a nivel global, contrastando los puntos de vista de Ulrich Beck y Niklas Luhmann sobre las razones que propiciarían tamaña contingencia. Esto con vistas a conjeturar la posibilidad de una «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa».

—validar conceptualmente la distinción *riesgo/vulnerabilidad* como contrapartida a la distinción *riesgo/seguridad*. Esto con vistas a recomendar un nuevo marco analítico de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico que propicie una voluntad de diálogo permanente entre expertos técnicos y científicos sociales.

Tal vez el resultado más polémico de esta tesis doctoral sea su exhortación a diferir la problemática de la aceptabilidad social del riesgo nuclear y radiológico, replanteándola como improbabilidad de la comunicación debido a la indefinición del umbral de catástrofe sociorradioecológica. Esta recomendación presenta retos importantes que habrían requerido una mayor elaboración, pero preferimos dejarla como conclusión de llamada a la necesidad de un enfoque constructivista-posibilista de los científicos sociales que sea paralelo — ¡y no contrapuesto! — al enfoque realista-probabilista de los expertos nucleares. Unos y otros se enfrentan al gran desafío de la comunicación del *no-saber* en una sociedad cada vez más globalizada y, al mismo tiempo, más funcionalmente diferenciada, por lo que otro desastre nuclear podría cumplir los peores vaticinios tanto de Luhmann como de Beck.

### *Hipótesis, contribuciones y limitaciones*

Una vez explicada la lógica de la estructura capitular a partir de las problemáticas de investigación que plantea cada dilema ontológico, así como los objetivos y resultados esperados de esta tesis doctoral, ofrecemos ahora una sinopsis orientativa de sus cinco capítulos con sus hipótesis específicas, contribuciones y algunas de sus limitaciones. Al redundar en algunos aspectos ya señalados anteriormente, se aprovecha para ilustrar que todos encajan entre sí, de ahí que se haya logrado la claridad expositiva.

*Capítulo 1:* Su hipótesis es la imposibilidad tecnológica de una energética nuclear que sea netamente pacífica mientras dependa de la fisión del uranio y el plutonio. Debido a

la naturaleza de estos materiales físis, que los hace potencialmente bélicos, el riesgo de proliferación del arma atómica se encuentra urdido en el ciclo de combustible nuclear. Esto explica que el vínculo intratécnico con la industria militar sea congénito a esta opción energética, aun cuando se haya desarrollado con fines declaradamente civiles.

La principal contribución de este capítulo es sentar la pauta ontológica del dilema de doble uso (militar y civil) para descartar de antemano el supuesto de la neutralidad científica, contraponiéndole la problemática de la «resistencia a la proliferación» (*proliferation resistance*) como un fenómeno de contingencia histórica que, desde sus orígenes, borra los límites entre la política y la tecnociencia nuclear. Por eso el secretismo que acompañó el desarrollo de la opción atómica durante la Guerra Fría: esa suerte de «paz sin paz» que el escritor británico George Orwell vislumbró en su artículo «You and the Atomic Bomb» (Orwell, 1945).

Entre las limitaciones del capítulo estaría no haber podido fundamentar mejor que los argumentos para sostener la idoneidad futurista de la energética nuclear resultan ficticios cuando soslayan precisamente esa dependencia del complejo militar industrial. En el caso de Rusia —por ejemplo— se reconoce sin tapujos el papel del factor nuclear militar para el sostén de su seguridad energética como potencia mundial. A partir de esta motivación geoestratégica se entiende por qué la nueva generación de reactores rusos sigue siendo altamente plutonígena en dos sentidos: puede aprovechar el desmantelamiento de las ojivas nucleares para alimentarse de combustible, pero si llegara el caso esos mismos reactores podrían revertirse para la producción armamentista.

*Capítulo 2:* Dedicado al análisis de los tres grandes accidentes históricos en su carácter de accidentes superiores a los previstos por diseño (Beyond Design Basis Accidents, BDBA), este segundo capítulo plantea como hipótesis que la energética nuclear arrastra dificultades tecnológicas específicas desde su morfogénesis debido a la premura en la conversión de los reactores de origen militar para su empleo con fines civiles. Esto ha llevado a que los expertos nucleares terminen aceptando públicamente algunas incertidumbres de sus modelos deterministas y probabilistas de evaluación de riesgos, aunque todavía se resisten a reconocer la vulnerabilidad intrínseca del principio de Defensa en Profundidad (Defence in Depth, DiD). Sin embargo, existen problemas irresueltos como la explosividad del hidrógeno y el comportamiento invaluable de la fusión del combustible dentro del reactor, cuando este pierde totalmente el enfriamiento. Estos procesos irreversibles pueden deparar sorpresas tecnológicas y, aunque se considere harto improbable, ya no puede descartarse una explosión por supercriticidad incontrolada de la reacción de fisión nuclear en cadena.

La principal contribución de este capítulo es haber fundamentado la dimensión ontológica del dilema ubicación/seguridad (*siting and safety*), explicando que cada uno de esos BDBA trajo consigo un giro correspondiente en la filosofía práctica de la seguridad nuclear. De ahí que puedan manejarse cuatro etapas bien delimitadas cronológicamente: desde los accidentes de Windscale y Kyshtym (1957) hasta el accidente de Three Mile Island (1979); luego de Three Mile Island hasta la catástrofe de Chernobyl (1986); desde Chernobyl hasta la catástrofe de Fukushima Daiichi (2011), y de Fukushima Daiichi en

adelante. Esta periodización se fortalece cuando a la evolución de la seguridad nuclear se yuxtaponen las cuatro generaciones sucesivas de reactores nucleoeenergéticos.

Aunque se ha sido muy riguroso al consultar la documentación ingenieril, no se descartan algunas inexactitudes durante la caracterización técnica de cada BDBA. Al reconocer esta insuficiencia mía como ingeniero, a la par aprovecho para señalar que el científico social difícilmente pueda dilucidar problemas técnicos que resultan debatibles y polémicos hasta para los propios expertos nucleares, como es la fiabilidad de los análisis probabilísticos. Pero esta misma limitación epistemológica resulta fructífera porque ha propiciado las reflexiones teóricas o escuelas de pensamiento sobre las causas de los accidentes desde el ámbito de las ciencias sociales; en especial: la Teoría de los Accidentes Normales (Normal Accident Theory, NAT), la Teoría de las Organizaciones de Alta Fiabilidad (High Reliability Organizations Theory, HROT) y el Análisis de la Fiabilidad Humana (Human Reliability Analysis, HRA). Al valernos de estas aportaciones sociológicas, contrastándola con la perspectiva ingenieril, nuestro enfoque intratécnico se propuso evidenciar que ningún BDBA ha quedado esclarecido totalmente cuando se analizan en conjunto sus causas tecnológicas y el papel del error humano u organizacional. O sea, perduran distintas versiones en dependencia de cuáles hayan sido los criterios aplicados para la evaluación retrospectiva de tales accidentes.

*Capítulo 3:* Si desde el capítulo anterior ya habíamos catalogado a Chernobyl y Fukushima Daiichi como catástrofes sociorradioecológicas —y no meramente como accidentes superiores a la base de diseño (BDBA)—, es porque tuvieron consecuencias irreversibles sobre la salud humana y el medio ambiente. Nuestra hipótesis al respecto es que ninguna concepción de la protección radiológica resulta medianamente satisfactoria para hacer frente a tales desastres nucleares, por lo que siempre ha prevalecido la connivencia entre la experticia científica y los grupos políticos para la toma de decisiones con arreglo a juicios de valor: económicos, sociales, morales, culturales...

La principal contribución de este capítulo es haber logrado sistematizar un abordaje problemático de la protección radiológica, caracterizándola como conflicto «radiobiología versus radioepidemiología» que deviene conflicto «ética *versus* conmensurabilidad» cuando se trata de proteger a los damnificados por desastre o emergencia nuclear, especialmente a los niños y mujeres embarazadas. Sentado este presupuesto, se ofrece un panorama histórico y conceptual del sistema internacional de la protección radiológica desde sus orígenes hasta llegar a las actuales normativas de la ICRP. Esto con vistas a explicar el por qué se impuso el Modelo Lineal Sin Umbral (en inglés LNTM, de Linear No-Threshold Model) como paradigma y fundamento del Sistema de Limitación de Dosis mediante su principio de optimización ALARA.

Nuestro propósito es subrayar la politización raigal del dilema sociorradioecológico, de la cual son ejemplos fehacientes las dos bruscas reducciones de los límites de dosis permisible: en 1964, ante la alarma pública por los ensayos nucleares militares, y en 1991, en medio de la incertidumbre social que primó durante los cinco años siguientes al desastre de Chernobyl. Al gran impacto social de la Publicación 60 (ICRP, 1991) sobre el



curso de los acontecimientos en la Unión Soviética se dedica especial atención, así como a la desafortunada aplicación de la Publicación 103 (ICRP, 2007) durante los sucesos de Fukushima Daiichi. Del análisis comparativo de ambas recomendaciones de la ICRP se concluye que el sistema internacional de protección radiológica se encuentra en la encrucijada de ser más científico o más social, en tanto el propio LNTM ya resulta un paradigma en crisis. Sin embargo, ponemos en duda que otro modelo alternativo pudiera sustituirlo, ni siquiera la propuesta *De minimis* para establecer un valor fijo de dosis límite por debajo del cual los efectos nocivos de la radiación son tan insignificantes que debieran ser descartados, al no haber manera de probarlos científicamente.

Como limitación de este capítulo podría señalarse el no haber conseguido ahondar más en las insuficiencias del LNTM como constructo socioprobabilístico basado en la estadística epidemiológica del cáncer radioinducido en los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki. En su lugar preferimos esclarecer las magnitudes radiológicas (radiométricas, dosimétricas, limitadoras y operacionales), así como sus unidades de medida, ya que son motivo de discrepancias y hasta confusión entre los propios radioproteccionistas. Aunque es un tema agreste, que por su complejidad se restringe a la discusión entre especialistas, hemos tratado de airearlo para entender la importancia de la «incertidumbre dosimétrica» como uno de los factores decisivos en la inconmensurabilidad del riesgo nuclear y radiológico.

*Capítulo 4:* Ofrece un panorama resumido de algunas teorías sociológicas del riesgo desde que surgió el *Rysk Analysis* como disciplina para facilitar la negociación del «riesgo aceptable» (*acceptable risk*). Este criterio fue socializado por el experto nuclear Chauncey Starr para responder a la cuestión: *How safe is safe enough?* (¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?), reconociéndola como el problema fundamental de la seguridad tecnológica. Nuestra aportación consiste en fundamentar que, bajo el prisma de esta misma interrogante, puede configurarse el marco analítico del dilema *regulación/promoción*, entendiéndolo como el paulatino desfase entre la promoción de la energética nuclear y la capacidad societal y/o institucional para garantizar su seguridad mediante mecanismos reguladores. Este proceder heurístico nos permite enlazar el enfoque intratécnico con el enfoque extratécnico y, entreverándolos, afrontar el desafío metateórico que supone la pretensión de aspirar a la aceptabilidad social del riesgo nuclear y radiológico a pesar de su esencia dilemática.

Si bien el empleo de la fisión atómica es concientizada como un «objeto de riesgo global», nuestra hipótesis es que los ECTS seguirán estancados dentro del marco analítico del dilema *regulación/promoción* mientras continúe creyéndose que la energética nuclear podrá conseguir su seguridad plena en el futuro. Por múltiples razones se olvida que este marco analítico fue impuesto por la filosofía práctica ingenieril y su aspiración de convertir esa opción energética en la única fuente de supervivencia de la humanidad. En el mejor de los casos, al dominante realismo empírico de los ingenieros nucleares —cuyos máximos exponentes son Chauncey Starr y Alvin Weinberg— se fue contraponiendo un fuerte constructivismo social gracias a autores como la antropóloga Mary Douglas y el sociólogo Brian Wynne. Estos últimos han sido prolíficos en alertar a la sociedad sobre la imposición

dictatorial de un encuadre falsamente apolítico y/o neutral del riesgo tecnológico por parte de los expertos nucleares, quienes se resisten a reconocer que su concepción de «cuán seguro es lo suficientemente seguro» ya fracasó y debiera revisarse en profundidad.

Esta tirantez entre los ingenieros nucleares y los científicos sociales bajo el dilema regulación/promoción ha arreciado con cada gran accidente histórico. Al afianzarse en sus respectivas posturas epistemológicas (intratécnica y extratécnica), el antagonismo entre ambas partes exacerbó la antinomia «realismo *versus* constructivismo social». Aunque pareciera solamente una cuestión filosófica, este conflicto ontológico dificulta la conciliación política del riesgo aceptable, estando en el trasfondo de las controversias entre expertos técnicos y no expertos (laicos o profanos), y entre decisores políticos y *stakeholders* (partes interesadas). ¿Es posible romper ese nudo dilemático que sigue tensándose con cada accidente nuclear superior a la base de diseño? ¿O será necesario esperar —una y otra vez— por un nuevo desastre radiactivo? A esta disyuntiva dedicamos el quinto y último capítulo.

*Capítulo 5:* Su hipótesis es que, luego de Chernobyl, la problemática de la aceptabilidad del riesgo tecnológico quedó suplantada por la problemática de su estructuración a nivel societal. Una vez que ha sucedido Fukushima Daiichi, ahora se impone continuar reflexionando sobre el papel que jugará la energética nuclear como «incertidumbre manufacturada» en el tránsito hacia la *sociedad del riesgo global*, que ha sido también definida como *sociedad del conocimiento, de la información o de redes*. Esta cuestión primordial se trata de dilucidar confrontando las divergencias ontológicas y epistemológicas entre el realismo reflexivo de Ulrich Beck y su mayor oponente: el socioconstructivismo radical de Niklas Luhmann, a quienes valorizamos como los máximos representantes de la macrosociología del riesgo. Aunque sus conclusiones respectivas parezcan irreconciliables, consideramos que se complementan entre sí cuando se trata de analizar la posibilidad de otra catástrofe nuclear de nuevo tipo que denominamos «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa».

Así arribamos a la necesidad de que los ETCS asuman la dualidad de enfoques (realista y constructivista social), si se quiere reconocer en toda su amplitud el carácter único del riesgo nuclear y radiológico. Este radica no ya solamente en su potencial catastrófico cuando se libera a la atmósfera un cierto número de terabecquerelios (TBq) de radiactividad, como estipula la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES, por sus siglas en inglés). Junto a la incertidumbre real por los efectos imprevisibles de las bajas dosis de radiación artificial sobre la salud humana, habría que tener en cuenta la improbabilidad de la comunicación social cuando se trate de evacuar a miles y hasta millones de personas, incluidos niños y mujeres embarazadas. El riesgo nuclear y radiológico se abriría a la contingencia y a la complejidad sociales; o lo que es decir, a la incertidumbre socialmente construida: *¿Podrá la sociedad de la incertidumbre manufacturada no ya evitar, sino lidiar comunicativamente con otros desastres sociorradioecológicos de magnitud global?*

Si las hipótesis específicas de cada capítulo fueran resueltas, se conseguiría entreverar los enfoques intratécnico y extratécnico, a la par que se consuma el análisis sincrónico y diacrónico de los grandes accidentes históricos. Así quedaría fundamentada nuestra hipótesis principal sobre el carácter único del riesgo nuclear y radiológico en los planos ontológico, epistemológico, semántico, axiológico y deontológico. Esta ha sido la metodología adoptada para que esta tesis doctoral sirva tanto a ingenieros nucleares como a científicos sociales. Para ello se emplea el recurso de las infografías que, a modo de resúmenes, hacen más asequible el contenido técnico a esos potenciales receptores. Esto se comprobó cuando algunos resultados parciales fueron presentados en dos ediciones consecutivas del Encuentro Internacional «Energía nuclear, seguridad y sociedad», celebradas en Moscú bajo el auspicio de Rosatom en 2013 y 2014, respectivamente, así como en el XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear, celebrado en La Habana en 2018, este último auspiciado por la ICRP.

Por último, además de los libros ya mencionados de Agazzi y de Winner, quisiera destacar tres obras que influyeron también en mi propósito de adoptar un punto de vista propio. En primer lugar, de Alfredo Marcos, su libro *Ciencia y acción. Una filosofía práctica de la ciencia* (2000), al que debo la noción de «filosofía práctica» para entender la ciencia como acción humana y social. De Wenceslao González, su obra *La predicción científica: concepciones filosófico-metodológicas desde H. Reichenbach a N. Rescher* (2010), gracias a la cual conocí el método de reconstrucción histórico-sistemática. Y, especialmente, de José A. López Cerezo y José Luis Luján, su *Ciencia y política del riesgo* (2000), que me sirvió de primer referente para la reflexión filosófica en coordenadas ECTS sobre la energía nuclear. Al explicar cómo influyen los factores sociales sobre la estimación del riesgo —o sea, el riesgo en contexto—, estos dos autores traen a colación un ejemplo que me toca bien de cerca:

En Cuba ocurre algo similar con la energía nuclear. Solo existe una central nuclear en la isla, la de Juragúa, en la bahía de Cienfuegos. Con la caída del muro, los soviéticos la dejaron medio construida, y los cubanos, a pesar de su esfuerzo científico y económico, no encuentran los recursos para terminarla en el contexto del bloqueo norteamericano. Desde la mentalidad occidental uno no puede dejar de pensar en la suerte que, después de todo, tuvieron los cubanos. Pero un cubano, sencillamente, no entiende nada de los riesgos de la energía nuclear, y no por ignorancia sino porque está harto de soportar apagones para el ahorro de combustible y otros cientos de privaciones diarias. Hablarle a un cubano del riesgo nuclear es como hablarle a un etíope de los riesgos de los aditivos alimentarios (López Cerezo y Luján, 2000: 74).

Gústenos o no la aspereza de los términos, pero aceptando que en Cuba nunca ha existido discusión pública sobre el riesgo de la energía nuclear<sup>9</sup>, esta tesis doctoral se propone romper ese vacío y ofrecer un asidero para la reflexión crítica, por si otra vez

---

<sup>9</sup>Aquí se aprovecha para subrayar que el abordaje crítico de esta tesis doctoral se restringe al empleo de la fisión atómica basada en el uranio y el plutonio debido al dilema del doble uso (militar y civil). Como ingeniero nuclear soy consciente de los beneficios del uso de isótopos radiactivos en la medicina, la agricultura, la minería, etc. Pero dedicar un capítulo a esta faceta provechosa de la tecnociencia nuclear hubiera complicado nuestro doble enfoque intratécnico-extratécnico.

se propusiera a los cubanos retomar esa opción energética o se tratara de convertir a la inconclusa CEN de Juraguá en un cementerio de desechos radiactivos<sup>10</sup>. En este último caso, seguiría siendo válida nuestra argumentación sobre los dilemas morfogénéticos, solo que cambiaría el enfoque intratécnico. Cuestiones no menos complejas como el trasiego y almacenamiento de esos elementos altamente contaminantes ocuparían el lugar de los grandes accidentes nucleares históricos.

Ha sido ese atisbo de renacimiento nuclear el acicate mayor para convencerme de la validez de perseverar en este empeño académico en mi dualidad personal de ingeniero, historiador y periodista. Esto me ha llevado a retornar a las vísperas de Chernobyl, una y otra vez, para asomarme de nuevo a la ventana de aquel hotel de Prípiat y evocar aquella frase escrita en la gran pancarta roja, pero ahora interrogativamente: *¿El átomo pacífico salvará al mundo?*

---

<sup>10</sup>Cuatro años después de ser detenida indefinidamente la construcción de la CEN de Juraguá en 1992, la injerencista Ley Helms-Burton estipuló en 1996 que su continuación sería considerada un acto de agresión a los Estados Unidos. Sin embargo, en diciembre de 2000, durante su primera visita a Cuba, el presidente ruso Vladimir Putin ofreció terminar el primer reactor invirtiendo 800 millones en seis años. Posteriormente, el presidente Fidel Castro anunció que la isla ya no estaba interesada (Mutis Gómez, 2019). En 2015 fueron anunciados planes de remodelación para convertir esa inconclusa instalación en Confinatorio Nacional de Desechos Peligrosos, incluyendo desechos radiactivos y productos químicos residuales de la industria farmacéutica (Cubadebate, 2015). En 2019, medios de prensa independientes filtraron la disposición del gobierno ruso a continuar un proyecto atómico conjunto con fines energéticos si las autoridades cubanas dieran su beneplácito, aunque esta noticia no tuvo ninguna confirmación oficial por ninguna de las partes.



Convenamos de inmediato que nuestro enfoque sobre el riesgo nuclear y radiológico se refiere a la decisión de emplear con fines civiles el desprendimiento de energía durante la *reacción en cadena de fisión atómica*, manteniendo el control operativo de ese proceso termofísico en el llamado «reactor nuclear», concretamente en sus prototipos energéticos para la obtención de electricidad, calefacción y otros usos industriales. Sin embargo, fue por compulsión militar —no civil— que el diseño de este artefacto constituyó la primera aplicación tecnológica de los conocimientos consustanciales a la mecánica cuántica (física de partículas y teoría nuclear), así como a la radioquímica, en tanto ciencias básicas que habían logrado refrendar experimentalmente una nueva formulación teórica del mundo subatómico, utilizando sus propias técnicas y metodologías de investigación.

Puestos en práctica para «ingeniar» la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial en el plazo más breve posible, esos saberes fueron desarrollados hasta conformar un complejo teórico-experimental-ingenieril sin precedentes, al cual se supeditaron los conocimientos provenientes de múltiples disciplinas también imprescindibles para conseguir ese objetivo bélico: la metalurgia y la química industrial, entre otras. A ese conjunto de saberes teóricos y aplicados es lo que llamaremos genéricamente «tecnociencia nuclear», mientras que denominamos «energética nuclear» a los procesos y sistemas tecnológicos que aprovechan la fisión del átomo con fines energéticos declaradamente civiles, aunque a la postre la tecnociencia nuclear no puede desligarse de su vínculo militar por un imperativo ontológico. Este es uno de los puntos de partida de nuestro análisis, y obedece a la necesidad de asumir una ontología realista para encarar la problemática del riesgo, a la par que una epistemología sistémico-constructivista, como se explicará en su momento.

La destrucción de Hiroshima y Nagasaki (el 6 y el 9 de agosto de 1945, respectivamente) empleando un tipo de bomba atómica para cada una de esas ciudades japonesas (una de uranio enriquecido y la otra de plutonio) dio lugar a que, con perplejidad, la sociedad identificara el uso de la energía nuclear como una fuente de peligros cuantitativa y cualitativamente diferentes a los ya conocidos. Por eso, aunque querramos restringir el estudio de la energética nuclear a su cometido como actividad civil, debemos enfrentar el problema de su vínculo genésico con el complejo militar industrial. Este último se manifiesta hasta hoy día en el llamado «dilema del doble uso» (*dual-use dilemma*), en el sentido de que la tecnociencia nuclear puede emplearse potencialmente para hacer el mal o conseguir el bien (Agazzi, 1996). No es que las categorías de bien/mal y civil/militar sean reflejas, sino que en este caso se emparentan debido al poder destructivo, absoluto y subitáneo de esa forma de energía.

Sobre este dilema reflexionó precursoramente Vladímir Ivánovich Vernadski (1863-1945), creador de la teoría de la *noosfera* (del griego *noos*, inteligencia), definiéndola como la tercera fase del desarrollo de la Tierra, después de la geosfera (materia inanimada) y de la biosfera (vida biológica). Según ese geólogo y humanista ruso-soviético, al intervenir en la biosfera

y transformarla con ayuda del pensamiento científico, la actividad humana se convierte en una «nueva fuerza geológica», ya que es capaz de acelerar, modificar y tomar el control de lo «natural», como es el caso de la energía liberada durante la desintegración radiactiva del uranio. Al respecto, Vernadski reflexiona en 1922:

No está lejos el momento en que el hombre tenga en sus manos la energía nuclear, una fuente tal de energía que le dará la posibilidad de construir su vida como quiera... ¿Sabrá el hombre utilizar esta fuerza, dirigiéndola hacia el bien, y no hacia la autodestrucción? ¿Ha crecido hasta el punto de saber utilizar esa fuerza que la ciencia le dará inevitablemente? Los científicos no deberían cerrar los ojos a las consecuencias de su trabajo científico, del progreso científico. Ellos deben sentirse responsables por todas las consecuencias de sus descubrimientos (Vernadski, 1922: 11)<sup>1</sup>.

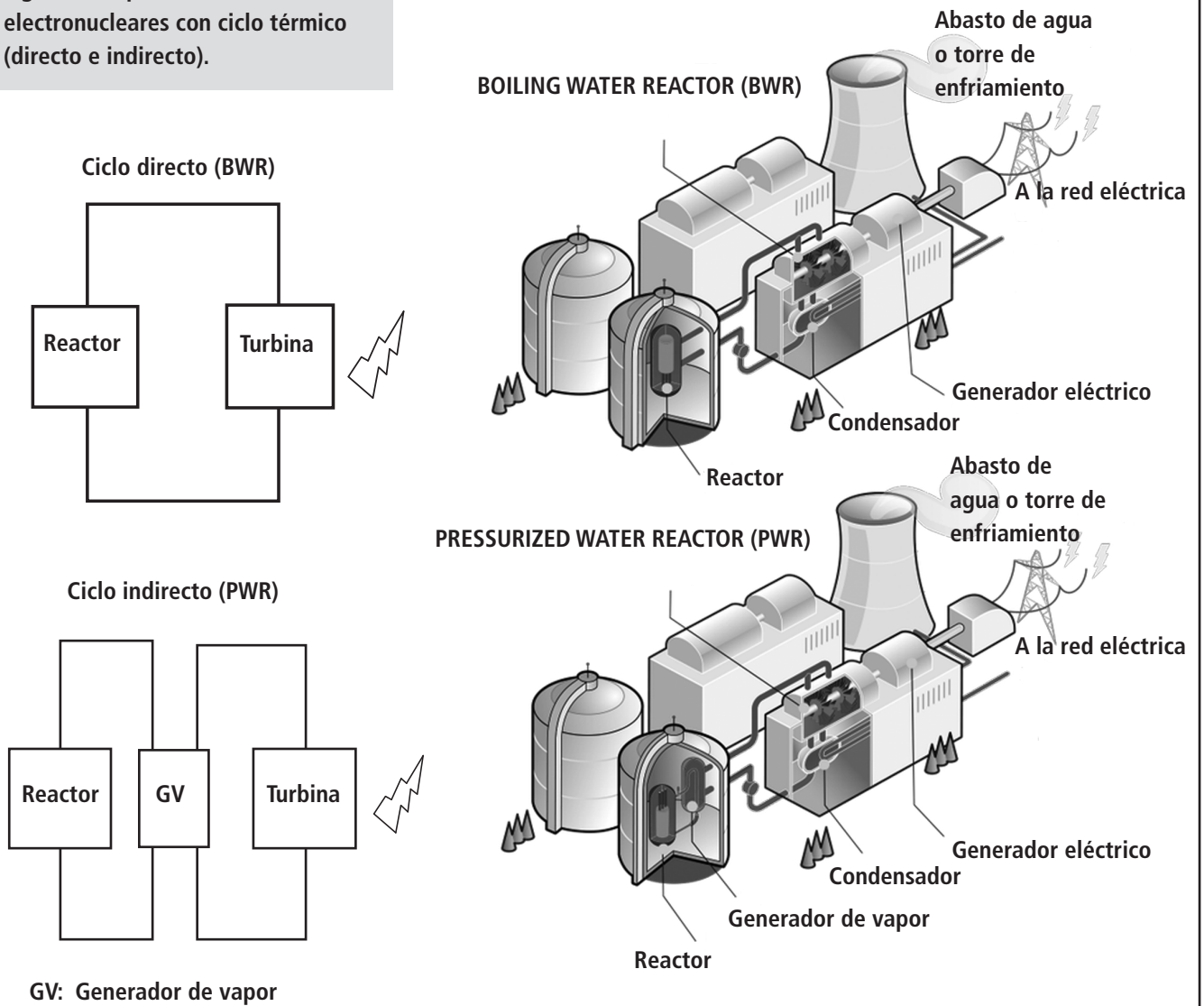
A partir de esa y otras preocupaciones vernadskianas, que alertaron proféticamente sobre el peligro real de una pérdida del equilibrio ecológico por causa antropogénica (Tarasova y Mustafin, 2013), podemos afirmar que el riesgo nuclear y radiológico implica desde sus inicios un dilema ético ostensible, sin parangón con ninguna otra actividad científico-técnica. No en balde, el estreno y ulterior desarrollo bélicos de la energía nuclear sumieron a sus creadores en una profunda introspección sobre la responsabilidad moral y ética de la ciencia. Este es el otro punto de partida de nuestro análisis: la necesidad de situarnos de inmediato en el plano axiológico y deontológico, lo cual resulta indispensable para esclarecer el grave problema de la atribución de responsabilidades en los desastres nucleares. Y es que, pese a la confirmación dramática de su potencial destructivo, el dominio de la fisión atómica contribuyó también a la profesión de una fe ilimitada en el poder de ese saber científico-técnico, el cual se avenía con las expectativas de la sociedad industrial y su énfasis en la producción a gran escala (megaproyectos).

¿Por qué no aprovechar para producir electricidad y calefacción lo que había debutado como engendro de las circunstancias bélicas? Con desmesurado optimismo, solo explicable en virtud de un acto de contrición, los científicos y tecnólogos nucleares acogieron esa oportunidad de encauzar el dominio del átomo hacia el progreso y la paz. Significó el brusco advenimiento de la era atómica. La caldera convencional fue sustituida por la usina nuclear, cuyo prototipo de finalidad militar debió ser ajustado para concordarlo con el turbogenerador, según el esquema tradicional de aprovechamiento del vapor de agua como fuerza motriz para obtener electricidad (ver figura 2). Surgieron así las Centrales Electronucleares (CEN) y otras instalaciones análogas: una hibridación de la novísima máquina (reactor atómico) y los medios técnicos de la era «preatómica», o sea, correspondientes al nivel tecnológico heredado. Pero esa simbiosis encerraba una incompatibilidad que terminó embrollando el proceso de generación calorífica en las CEN hasta nuestros días: la naturaleza del material

---

<sup>1</sup>Hemos separado la bibliografía en ruso del resto de las fuentes consultadas con vistas a facilitar su identificación, ya que se trata en su mayoría de literatura no traducida a otras lenguas, si acaso únicamente sus títulos y resúmenes al inglés. La traducción de los textos citados es totalmente de mi autoría.

Figura 2: Esquema de las centrales electronucleares con ciclo térmico (directo e indirecto).



GV: Generador de vapor

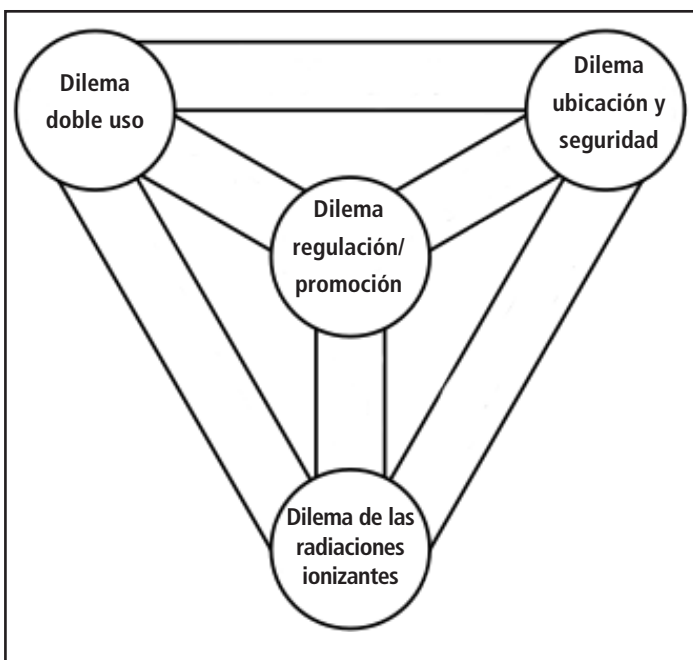


Figura 3: Los dilemas morfogénéticos de la energética nuclear. Fuente: elaboración propia.



nuclear fisible (uranio y plutonio) y la incertidumbre con respecto a los efectos biológicos de la radiactividad artificialmente inducida.

Reconocemos estos factores ontológicos como «dilemas de morfogénesis», en referencia a la compleja interdependencia entre ciencia, tecnología, política y sociedad que, desde sus orígenes, subyace a la tecnociencia nuclear como actividad humana, incluyendo su dimensión ética y moral. Junto al dilema del *doble uso*, identificamos otros dos dilemas ontológicos que atañen ya más explícitamente a la energética nuclear en sí: el dilema *ubicación y seguridad* (*siting and safety*) y el dilema de las *radiaciones ionizantes* (*sociorradioecológico*). Aunándolos, esos tres dilemas ontológicos tributan a un cuarto y último: el dilema *regulación/promoción* (ver figura 3). Considerando que ese nudo dilemático se ha seguido tensando hasta nuestros días, acometemos un balance historiográfico de la energética nuclear y sus grandes accidentes históricos, tratando de aunar dos enfoques complementarios entre sí: el «intratécnico», que se ubica bajo el prisma de la filosofía ingenieril de la tecnología (Perrow, 1984, 1999; Weinberg, 1985; Mitcham, 1994; Quintanilla, 2005; Vermaas, 2008), y el «extratécnico», en el sentido de construcción social de la tecnología (Bijker *et al*, 1987; Hecht, 1998; Hughes *et al*, 2001), priorizando el abordaje sociológico del riesgo y la incertidumbre (Beck, 1986, 2006, 2009; Luhmann, 1984, 1991; Douglas, 1982, 1985; Wynne, 1992; Rosa, 1998; Funtowicz y Ravetz, 2000; Renn, 2008a, 2008b). Este es el punto de partida para adoptar una metodología propia, evitando cualquier manifestación de determinismo tecnológico.

Mediante el primer enfoque —o sea, el intratécnico— nos referiremos al proceso evolutivo del reactor nuclear como un artefacto de origen militar que fue rediseñado aceleradamente para su implementación comercial, quedando asumidos sus peligros bajo la convicción de que podían ser controlados con medidas de seguridad (*safety*) y la evaluación de riesgos (*risk assessment*). Sin embargo, tal empeño tecnológico era mucho más complejo de lo previsto y, aun cuando pronto surgieron las primeras adversidades, difícilmente los expertos nucleares imaginaron que la evolución de la energética nuclear sucumbiría a la contingencia de sus accidentes más importantes: Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) y Fukushima -Daiichi (2011).

Hasta qué punto esos grandes accidentes son el resultado de un desfasaje entre la promoción de la energética nuclear y la capacidad societal y/o institucional para garantizar su seguridad mediante los organismos reguladores, es la cuestión medular del análisis extratécnico. Nosotros preconizamos una epistemología política del riesgo nuclear y radiológico que, teniendo en cuenta los dilemas ontológicos ya mencionados, se concentre en el dilema *regulación/promoción* como inherente a la energética nuclear desde que se inicia su proceso de institucionalización (Balogh, 1991; Walker, 2000a; Foasso, 2003). Así, uno de los principales objetivos de este balance historiográfico es ilustrar cómo la legitimación política de esa opción energética ha traído siempre consigo el carácter conflictual de la interacción entre los expertos técnicos y los llamados «legos», «laicos» o «profanos» (o sea, no expertos) en torno a la seguridad nuclear y la protección radiológica. Esto se expresaría a manera de tensión permanente entre el secretismo por razones de Estado y la resolución

de controversias públicas, cuyas clausuras —unas veces, a favor de la opción nuclear; otras veces, en contra— influyeron en la asunción del riesgo nuclear y radiológico a escala societal.

Bajo esa dicotomía secretismo/publicidad se consumó el proceso político de la gestión del riesgo (*risk management*) en los Estados Unidos, con un momento crítico a raíz de la avería de Three Mile Island (1979), mientras que en la URSS imperó el absoluto secretismo estatal hasta unos años después de ocurrida la tragedia de Chernobyl (1986). A partir de ese momento la energética nuclear tendrá una importancia crucial en el tránsito hacia el reconocimiento de la «sociedad del riesgo global» (Beck, 1986). Ese tránsito continúa con la catástrofe de Fukushima Daiichi en 2011, mientras se configura una nueva situación geopolítica que recuerda los tiempos de la llamada «Guerra Fría», esa suerte de «paz sin paz» que el escritor británico George Orwell presagió en su artículo «You and the Atomic Bomb» (Orwell, 1945). Al término de la Segunda Guerra Mundial, dividido el mundo en dos bloques antagónicos (occidental-capitalista y oriental-comunista), ambos sistemas se enfrentaban diametralmente en todos los órdenes: político, ideológico, económico, social, tecnológico, militar, informativo, cultural y hasta deportivo. Así, en el campo militar, a la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), creada en 1948, se le opuso el Pacto de Varsovia, firmado en 1955, mientras que en lo económico, al Plan Marshall de 1947 se contrapondría el Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME), fundado en 1949 (Rodríguez García, 2014).

Dicho antagonismo quedó normalizado como una nueva forma de convivencia, teniendo como trasfondo el doble uso de la energía nuclear, mientras se intentaba ejercer el control de sus aplicaciones tecnológicas a todos los niveles, desde el individual hasta el institucional, tanto nacional como internacionalmente. De hecho, puede afirmarse sin vacilación que la ciencia y tecnología nucleares contribuyeron a la configuración del orden geopolítico actual como ninguna otra actividad científico-tecnológica en la historia. Obviamente, esa condición del doble uso incidió desde un primer momento en la percepción del riesgo nuclear y radiológico por el amplio público, ante las nefastas evidencias de su estreno bélico.

Asimismo, al estar responsabilizados con la existencia de la bomba atómica, los expertos nucleares sufrieron fuertes presiones políticas e ideológicas, como no había recibido nunca otra colectividad del saber. Con semejanzas y diferencias en cada país, tales circunstancias influyeron en la conformación del sistema científico-tecnológico nuclear y su pretendida búsqueda de autonomía con respecto a los demás sistemas sociales: el militar, en primera instancia. Hasta qué punto esa autonomía era posible, es lo que veremos a continuación, aunque sea someramente, centrándonos en el rol de Estados Unidos como primera potencia nuclear y única en haber empleado el arma atómica contra los seres humanos. Cuando venga al caso, nos referiremos a cómo esto ocurrió en la Unión Soviética, relacionándolo con las circunstancias que conllevaron a la tragedia de Chernobyl.

A poco de cumplirse un año de que el presidente Harry S. Truman tomara la decisión de lanzar sendas bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki, este firmó en 1946 la Ley de Energía Atómica (Ley de McMahon) que, aprobada por el Senado, disponía cómo el gobierno federal controlaría y gestionaría la tecnología nuclear desarrollada con cierta colaboración de

Gran Bretaña y Canadá, sus aliados en la Segunda Guerra Mundial. Puesta en vigor el 1 de enero de 1947, esa ley federal transfirió el control de la energía atómica de manos militares a manos civiles, y dispuso la creación de la United States Atomic Energy Commission (U.S. AEC), la cual se encargaría de fomentar y controlar el desarrollo de la ciencia y la tecnología nucleares, bajo la supervisión del Congreso, específicamente del Joint Committee on Atomic Energy (JCAE) (Walker, 2000a). Sin embargo, como las preocupaciones militares seguían predominando en el escenario de postguerra, ese corpus legislativo introdujo el estatuto de «información restringida» (*Restricted Data*), aplicándolo a toda cuestión relacionada con la producción o utilización de armas atómicas, así como con la obtención de material fisionable y su empleo para la generación de energía. En cuanto al filón energético, ya entonces se pensaba en el diseño de reactores nucleares para la fuerza aérea y naval, con énfasis en su implementación para la propulsión de submarinos, los cuales así podrían permanecer mayor tiempo debajo del agua (Hewlett y Duncan, 1974).

Aprovechando su posesión exclusiva del arma atómica, el gobierno norteamericano también sopesaba distintas opciones para evitar que la Unión Soviética lograra obtenerla, aunque dudaba de que esta pudiera hacerlo en un corto plazo. Esas opciones se manejaron inicialmente en el llamado Informe Acheson–Lilienthal (1946), el cual proponía básicamente dos cosas: a) la creación de una Atomic Development Authority, bajo control de la Organización de Naciones Unidas, que asumiera toda la propiedad del material fisible y lo distribuyera en pequeñas cantidades, bajo estricto control, a todos los países para el desarrollo pacífico de la energía nuclear, y b) la renuncia por parte de Estados Unidos a la política del secreto para compartir los conocimientos con quienes se comprometieran a no fabricar la bomba atómica.

Poco después de su redacción, ese mismo año 1946, dicho informe fue modificado para convertirlo en el denominado Plan Baruch, entre cuyos requisitos estaba ya no solamente que la URSS debía renunciar a la bomba, sino que aceptara incondicionalmente las inspecciones norteamericanas y, en caso de violación, pudiera imponérsele sanciones sin derecho a veto en la ONU. Tales requisitos fueron tachados de inaceptables por los soviéticos y, en contraposición, estos propusieron la destrucción de todas las existencias de material fisible (hasta entonces circunscritas a los Estados Unidos) como paso previo a una convención para el control de la proliferación nuclear (Tımerbaev, 2003; Igorevna, 2014). Como Estados Unidos detentaba el monopolio de la producción de plutonio y uranio enriquecido, y ni siquiera estaba dispuesto a compartirlo con sus aliados Inglaterra y Canadá, estos dos últimos países también emprendieron por sí mismos sus propios proyectos nucleares en secreto, al igual que Francia (Foasso, 2003).

Este panorama cambió radicalmente tras detonar los soviéticos su primera bomba atómica durante la madrugada del 28 al 29 de agosto de 1949 en el polígono de pruebas de Semipalátsinsk, hoy Kazajistán, y tan solo cuatro años después, el 12 de agosto de 1953, su primera bomba de hidrógeno o termonuclear (Dyachenko, 2008). Aunque los norteamericanos habían probado antes el funcionamiento de este último tipo de artefacto

(1ro de noviembre de 1952), los rusos se adelantaron técnicamente al detonarlo ya disponible como una bomba transportable (Khariton *et al*, 1996). Junto a la constancia terrible de que la humanidad podría autoaniquilarse con las bombas termonucleares, mucho más destructivas que las lanzadas sobre las ciudades japonesas, en la opinión pública estadounidense primó una gran consternación al sentir que su país había perdido la ventaja estratégica y, por consiguiente, también era vulnerable a un ataque nuclear (Kennedy-Pipe, 2007).

La politología de la Guerra Fría otorga un significado crucial a ese momento histórico, llegando incluso a manejarlo como «revolución termonuclear» (1952-1962), porque condujo a una nueva visión sobre el papel de la guerra, el equilibrio de poder y la diplomacia en las relaciones internacionales: «En última instancia, la tecnología de las armas nucleares provocó una condición de la globalidad» (Munster y Sylvest, 2013). Existe una amplia literatura que analiza las consecuencias geopolíticas de esa escalada nuclear (Gaddis, 1999; Coleman y Siracusa, 2006), incluyendo los peligros asociados a la misma, ya sea por un descuido en el manejo de las armas atómicas o porque las circunstancias quedaran fuera de control, como estuvo a punto de ocurrir durante la crisis de los misiles en Cuba, en octubre de 1962 (Blair, 1994; Sagan, 1993). Por su parte, los estudios sociales de la ciencia y la tecnología han abordado cómo la innovación tecnológica militar —nuclear, en primer lugar— conllevó a la interacción de los científicos e ingenieros con los políticos y el análisis político, hasta conformar las redes sociotécnicas militares (*military sociotechnical networks*) (Smit, 2005). Con una visión antropológica, siguiendo el enfoque sociológico de Robert K. Merton, otros autores han indagado en cómo los físicos e ingenieros nucleares (tanto norteamericanos como soviéticos) se plantearon a sí mismos el conflicto de haber sido responsables de la creación de tales armas de destrucción masiva, o sea: cuánto peso tuvo el componente ético y moral en la conformación del «*ethos* nuclear» (Gusterson, 1998; Vizguin, 2005).

Si algo concitan esos trabajos, desde sus enfoques respectivos, es la necesidad de ubicarnos en la filosofía de la disuasión nuclear (*nuclear deterrence*), entendida como una doctrina de amenaza mutua para mantener la estabilidad internacional entre las dos superpotencias rivales (Timerbaev, 2003). No podría entenderse el carácter único del riesgo nuclear y radiológico sin tener en cuenta que la abrupta apertura hacia el uso civil del átomo fue una iniciativa expresamente política de los Estados Unidos para buscar una contrabalanza a la proliferación indefinida del armamento nuclear, una vez perdido el monopolio de su posesión. El 8 de diciembre de 1953, en la Asamblea General de la ONU, el presidente Dwight D. Eisenhower —sucesor de Truman— pronuncia su discurso *Atoms for Peace*, una de cuyas frases más citadas resume la idea antes expuesta:

No es suficiente quitar estas armas de las manos de los soldados, estas deben ser puestas en las manos de quienes conocen cómo ponerlas al servicio de la paz y del bienestar de la Humanidad, en manos de aquellos que sabrán despojarlas de su carácter militar y adaptarlas al arte de la paz. Los Estados Unidos saben que las fuerzas destructivas de las armas nucleares pueden ser revertidas y utilizadas para el beneficio de la Humanidad (Eisenhower, 1953).

La alocución de Eisenhower es valorada como el acta bautismal de los usos pacíficos de la energía nuclear, en tanto exhortó a la creación de la actual International Atomic Energy Agency (IAEA); OIEA por sus siglas en español: Organismo Internacional de la Energía Atómica. Su misión era promover y velar porque esos fines pacíficos se cumplieran, propiciando que todos los países del mundo accedieran a los conocimientos y medios hasta entonces secretos, incluido el material fisionable (Fischer, 1997). En otro sentido, ese discurso es también considerado el inicio de la retórica ideológica durante la Guerra Fría (Medhurst, 1997; Chernus, 2012). Y es que, si bien expresa rechazo a las armas nucleares y reconoce los estragos que ellas infligirían durante una agresión por sorpresa, justifica la necesidad de la hegemonía militar estadounidense como garante de la libertad, insinuando que el peligro todavía proviene del comunismo: «El mundo libre, al menos ligeramente consciente de estos hechos, se ha embarcado naturalmente en un gran programa de sistemas de defensa. Ese programa nuclear será acelerado y continuará creciendo» (Eisenhower, 1953).

Pocos días después de esas declaraciones, el 21 de enero de 1954, es botado en el río Thames, en Connecticut, el *USS Nautilus* (SSN-571), primer submarino propulsado por un reactor nuclear de agua a presión, construido por la Westinghouse Electric Corporation para la US Navy (Hewlett y Duncan, 1974). Y será tras la detonación de una bomba termonuclear estadounidense en el atolón Bikini (islas Marshall), en marzo de ese mismo año, a consecuencia de la cual muere un tripulante del barco atunero japonés *Daigo Fukuryu Maru*, que se desaten las primeras manifestaciones de activismo antinuclear, difundándose la alerta sobre el peligro de la llamada «lluvia radiactiva» como producto de esos *tests* nucleares (Wittner, 1993; Toshihiro, 2005).

Debido principalmente a los cambios políticos en la Unión Soviética tras el fallecimiento de Iósif Stalin, el 5 de marzo de 1953, las autoridades de este país se demoraron en responder a la propuesta de Eisenhower sobre la «pacificación» del átomo (Timerbaev, 2003). Finalmente saludaron la idea de un acuerdo entre ambas potencias para la no proliferación del armamento nuclear y, sobre la base de ese compromiso, aceptaron llevar adelante negociaciones conjuntas (Orlov, 2002). Enseguida los soviéticos activaron su aparato propagandístico: en primera plana, el periódico *Pravda* reveló que, el 27 de junio de 1954, en la ciudad de Óbninsk, había sido conectada a la red de distribución eléctrica la primera central nuclear del mundo, construida bajo la dirección del científico Ígor Vasílievich Kurchátov, creador de la bomba atómica rusa. Aquel pequeño reactor nuclear, llamado AM-1 por las siglas de *Atomny Mir* (Átomo Pacífico, en ruso), tenía una potencia calorífica de apenas 29 megavatios térmicos (MWt), los cuales debían garantizar 5 megavatios eléctricos (MWe) de potencia turbogeneradora. Comenzaba así el programa energético nuclear soviético bajo estricto control estatal, considerándose una fuerza productiva imprescindible para construir la base técnico-material del comunismo. El AM-1 fue el embrión del RBMK (*Reaktor Bolshoi Moshchnosti Kanalnyi*), el aciago reactor de gran potencia con canales que, diseñado para un doble propósito (civil y militar), escapó de control en Chernobyl (Burlakova *et al*, 2006).

Concebido como un modelo híbrido para la generación de energía eléctrica y plutonio con fines militares, el RBMK-1000 es el ejemplo paradigmático del nexo intrínseco entre el arma atómica y la energética nuclear como «tecnología inherentemente política». A profundizar historiográficamente en cómo se produjo esa interpenetración entre lo técnico y lo político dedicamos los subcapítulos que siguen, antes de abordar el riesgo de proliferación nuclear y sus maneras de enfocarlo en la actualidad: extratécnica e intratécticamente. Luego adoptamos una perspectiva ingenieril para explicar cómo ocurrió el paso acelerado de los reactores industriales (militares) a los reactores civiles (energéticos).

### *1.1/ La bomba atómica, artefacto inherentemente político*

Fueron en realidad los científicos participantes en la creación del arma atómica (Niels Bohr, Leó Szilárd y Robert Oppenheimer, entre otros) quienes propusieron la reorientación creativa de la energía nuclear hacia los usos civiles, como una manera de contrarrestar el interés básicamente militar por su poder destructivo. Asimismo, teniendo en cuenta la posibilidad del doble uso (civil y militar), ellos también fueron los primeros en alertar sobre la necesidad de establecer un control internacional sobre la energía nuclear, una vez concluida la Segunda Guerra Mundial, de manera que quedara excluido su uso en perjuicio de la humanidad. Esto no significa que cuestionaran la obtención de la bomba atómica, pues había sido un imperativo ante la amenaza de que la Alemania nazi pudiera haberla logrado antes (Rhodes, 1986). De hecho, fue a petición de Szilárd —previa consulta a los también físicos Edward Teller y Eugene Wigner, los tres húngaros de ascendencia judía— que Albert Einstein envió cartas al presidente Franklin D. Roosevelt en agosto de 1939, alertándole sobre ese peligro inminente y, por tanto, instándole a que apoyara cuanto antes las investigaciones en materia de fisión nuclear (Vallentin, 1954; Clark, 1971).

Esa misma aversión al fascismo había animado a todos los científicos inmigrados que trabajaron para la consecución del arma nuclear en el Proyecto Manhattan (1942-1946), bajo la dirección científica de Oppenheimer —por este motivo, reconocido como el «padre de la bomba atómica»— y bajo el mando militar del coronel Leslie Groves, ambos estadounidenses de nacimiento, o sea, no inmigrantes. Únicamente el físico británico de origen polaco Jozef Rotblat renunció al proyecto estadounidense cuando, en 1944, se supo que hacía dos años el programa nuclear nazi había escorado (Kelly, 2007). A partir de ese momento, los científicos involucrados en la consecución del arma nuclear comenzaron a preocuparse sobre qué pasaría cuando esta fuera obtenida. Sus escrúpulos humanistas chocaban con las exigencias militares, ideológicas y políticas en medio de los recelos por la filtración de información sensible debido al espionaje soviético (West, 2004). Estos factores terminaron influyendo en sus tomas de posición con respecto al problema más acuciante: ¿era necesario lanzar la bomba atómica sobre Japón? (Alperovitz, 2013).

Unos se mostraron a favor de esa opción, como fue el caso de Oppenheimer, aunque luego se arrepentiría: «Los físicos han conocido el pecado y este es un conocimiento que ya no pueden perder» (Oppenheimer, 1947: 11). Otros científicos se manifestaron en

total desacuerdo y así lo expresaron, con Szilárd a la vanguardia, junto a otros seis colegas que habían creado un comité para el análisis de los problemas políticos y sociales en el Metallurgical Laboratory (Met Lab) de la Universidad de Chicago (Lanouette y Silard, 1992). Aquí fue donde bajo la dirección del físico italiano Enrico Fermi —también considerado «padre de la bomba atómica»— comenzó a funcionar en 1942 el primer reactor nuclear del mundo: el Chicago Pile-1 (CP-1). Diseñado para comprobar que la reacción de fisión nuclear era sostenible neutrónicamente, este reactor experimental fue el prototipo base para la obtención a escala industrial del plutonio-239 con destino a la bomba *Fat Man* lanzada sobre Nagasaki y el artefacto análogo que fue detonado antes, a modo de comprobación, en la prueba *Trinity* (Rhodes, 1986; Bankston, 2003).

En junio de 1945, Szilard y los demás científicos discordantes plasmaron por escrito sus opiniones y las enviaron a la Secretaría de Guerra a manera de informe: el Franck Report, así llamado porque el *chairman* de dicho comité era el físico alemán James Franck, premio Nobel en 1925. Sugerían que la bomba atómica fuera detonada solamente con carácter demostrativo en algún lugar deshabitado, con previo aviso a las autoridades niponas y ante delegaciones de los aliados y otros países firmantes de la Declaración de las Naciones Unidas. La esencia de esta petición era que, una vez conocida la bomba, otros países también lograrían producirla, incluida la Unión Soviética. De ahí que apelaran a un gesto moral y civilizado de los Estados Unidos para evitar la futura proliferación del armamento nuclear, mostrando que «estamos dispuestos a renunciar a su uso militar y destructivo si otras naciones, todas, se unen en un acuerdo pleno para controlarlas y evitar el terrible daño a la Humanidad» (Lemmerich y Hentschel, 2011: 319). Según el radioquímico Glen Seaborg, firmante del Franck Report, todo hace indicar que la decisión de bombardear a Japón ya había sido tomada antes de que ese documento llegara a Washington (Seaborg y Corliss, 1971).

Igual suerte corrió una carta que, también redactada por iniciativa de Szilárd y rubricada por 69 científicos, fue enviada con fecha 17 de julio de 1945 por los canales oficiales al presidente Truman (Lanouette y Silard, 1992). El día anterior, en el desierto de Alamogordo, Nuevo México, había sido realizada exitosamente la ya mencionada prueba *Trinity*, con la detonación de la primera bomba atómica (de plutonio) en la historia, denominada *Gadget*. La novedad fue transmitida con urgencia a Truman, quien se encontraba en la conferencia de Postdam, cuyo inicio había logrado retrasar para contar con ese resultado durante el rejuego diplomático con los otros dos líderes de la colisión antihitleriana: Winston Churchill y Iósif Stalin; sobre todo con el deseo de sorprender a este último. Pero el mandatario estadounidense no logró su propósito, porque ya para ese momento los soviéticos tenían conocimiento de la bomba y habían avanzado en el desarrollo de la misma (Timerbaev, 2003)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>El 28 de septiembre de 1942, Stalin firmó la resolución gubernamental sobre la organización de los trabajos para comprobar la posibilidad de construir la bomba atómica con base en la fisión del uranio. La historiografía rusa reconoce que las labores del espionaje jugaron un papel crucial en esa toma de decisión, sobre todo el reclutamiento del físico británico Klaus Fuch. También influyó el hecho de que, a partir de ese año, las revistas científicas —*Physical Review*, entre ellas— dejaron de publicar abruptamente su serie de artículos sobre los más recientes descubrimientos en la investigación del átomo. De este silencio se dio cuenta el físico Gueorgui Fliórov, quien escribió una carta a Stalin (Goncharov y Rabiev, 2001).

La decisión de lanzar las bombas atómicas sobre las ciudades japonesas ha sido uno de los temas más discutidos por la historiografía occidental sobre la Guerra Fría (Walker, 2005), arguyéndose que tenía el propósito de intimidar a la Unión Soviética para disuadirla de sus pretensiones hegemónicas con respecto a Europa occidental. Estos debates se incrementaron desde que, a mediados de la década de 1990, fueron desclasificados los archivos secretos de Rusia en materia nuclear hasta el año 1954 (Cochran *et al*, 1995). Interesa a los historiadores hasta qué punto el espionaje fue decisivo para que los soviéticos consiguieran la bomba atómica en un plazo mucho más breve de lo previsto. Esta duda se remonta a 1946, cuando fueron descubiertos los primeros espías comunistas, y se recrudeció en 1950 tras el arresto del físico británico Klaus Fuchs y del matrimonio estadounidense Rosenberg, que fue condenado a muerte tres años después, el 19 de julio de 1953 (Holloway, 1994).

Con esos episodios alcanza su paroxismo el temor rojo (*Red Scare*) o macarthismo, como se denomina el periodo de intensa sospecha que, instigada por el senador Joseph R. McCarthy, supuso la infiltración de comunistas en todos los ámbitos de la sociedad estadounidense, incluidas las más altas esferas del poder. A instancias del FBI y el Comité de Actividades Antiestadounidenses (House Un-American Activities Committee; HUAC), esa cruzada anticomunista se cernió también sobre la comunidad tecnocientífica nuclear, contando con el apoyo de la Atomic Energy Commission (U.S. AEC), la cual investigó entre 1947 y 1952 a miles de sus empleados para comprobar su lealtad (Wang, 1999; Badash, 2000). Ese proceso depuratorio se enfocaría en la Federation of Atomic Scientist (luego, Federation of American Scientist), cuyos miembros fundadores —todos procedentes del proyecto Manhattan— habían desplegado un vigoroso activismo político, llevando a debate público el significado de la bomba atómica, conscientes de que esta había cambiado para siempre las relaciones entre ciencia y sociedad (Wang, 1999).

Su prédica a favor del control internacional del arma nuclear, entre otros temas relacionados con la seguridad global, era realizada a través de charlas y conferencias en la radio y televisión, así como en el *Bulletin of the Atomic Scientists*, cuyo editor y fundador fue el biofísico Eugene Rabinowitch, coautor junto a Szilárd del informe Franck. Otra iniciativa importante fue la publicación del folleto *One World or None* (1946), con ensayos escritos por Einstein, Bohr, Szilárd, Oppenheimer..., entre otros científicos prominentes que aprovecharon para exteriorizar sus temores y preocupaciones ante el carácter ineludible del hecho nuclear. Ese sentimiento de responsabilidad colectiva inspiraría, años más tarde, el manifiesto Russell-Einstein (1955) y las conferencias Pugwash (1957), primer foro internacional del antinuclearismo científico, configurado desde el principio como un encuentro entre pares para conjurar de manera informal, pero científica y técnicamente rigurosa, los peligros de la proliferación nuclear y contribuir a la seguridad mundial, la paz y el desarme (Wittner, 1993).

Fue mayormente sobre los físicos teóricos que la campaña anticomunista terminó ensañándose, considerándolos más proclives a revelar el «secreto atómico», ya sea por sus antecedentes étnicos —entiéndase, judíos—, o porque tendían a ser «ilusos» y, por ende, susceptibles a la propaganda comunista, entre otros estereotipos que sublimaban el



conflicto ideológico (Kaiser, 2005). El caso más importante fue el proceso que, iniciado en 1953 con apoyatura del FBI, acusó de deslealtad a Oppenheimer por su presunta filiación comunista, aunque sin pruebas para demostrar que fuera realmente un espía soviético, como se pretendió en un primer momento (Hewlett y Howl, 1989). Siendo uno de los miembros fundadores de la U.S. AEC, presidente de su General Advisory Committee (Comité Asesor General), al ser inquirido sobre la puesta en marcha del proyecto termonuclear en 1949, Oppenheimer se había mostrado remiso en un primer momento, aduciendo confusamente resquemores morales y argumentos técnicos que —a la postre— le costaron ser acusado de haberlo entorpecido. A exacerbar esa sospecha contribuyeron Lewis Strauss, presidente de la U.S. AEC, y el senador Brien McMahon, autor de la Ley de Energía Atómica, secundados por Edward Teller, quien resultó finalmente el artífice de la bomba de hidrógeno norteamericana (Hewlett y Howl, 1989). Este último fue el único científico que testificó en forma desfavorable a Oppenheimer en la audiencia a la que él mismo decidió someterse para enfrentar los cargos de traición y demostrar así su lealtad. Ese testimonio adverso de Teller contribuyó significativamente al escarnio político de Oppenheimer y a la revocación presidencial de su credencial de seguridad —lo cual fue confirmado el 28 de junio de 1954— por ser una persona ambigua, a quien no podían confiársele secretos de Estado.

El proceso inculpativo contra Oppenheimer buscaba repercutir de manera ejemplarizante sobre el sector más liberal de la comunidad tecnocientífica nuclear estadounidense, una representación significativa de la cual expresó su indignación —a la que se sumó Einstein, entre otros grandes científicos—, tributándole un gran apoyo moral a su colega en desgracia. Consecuentemente, Teller sufrió un desprecio proporcional y, desde entonces, quedó marginado del ámbito académico, según el mismo reconociera en sus memorias (Teller y Shoolery, 2001). Sin embargo, entre el personal científico de los laboratorios y universidades no se produjeron renunciaciones o éxodos masivos que comprometieran el programa nuclear estadounidense. La historiografía oficial de la U.S. AEC sugiere que solamente hubo un cambio sutil, pero permanente, en esa comunidad científica:

Ocho años antes los científicos habían visto a la Comisión como su agencia, una institución nueva y tolerante que podía, entre otras cosas, liberar a los científicos de las restricciones e indignidades del control militar. La Comisión había justificado esa fe, pero el caso Oppenheimer había sembrado semillas de duda. No era probable que una agencia que había destruido la carrera de un líder como Oppenheimer pudiera disfrutar de nuevo de la plena confianza de los científicos de la nación. Los efectos del caso Oppenheimer fueron permanentes y perjudiciales hasta ese punto (Hewlett y Howl, 1989: 112).

Otras aristas pueden colegirse de ese episodio, si se tiene en cuenta que el enjuiciamiento del físico de marras transcurrió mientras el presidente Eisenhower preparaba calladamente su ya citado programa *Atoms for peace*, con ayuda de Strauss y otros miembros del lado conservador de la U.S. AEC (Hewlett y Howl, 1989). Les servía de referencia un informe del

propio Oppenheimer que recomendaba iniciar conversaciones con la Unión Soviética para limitar el arsenal atómico de ambas potencias, luego de comprobarse que, habiendo ya logrado la bomba termonuclear, aquella era capaz de lanzar un ataque por sorpresa sobre Estados Unidos, con poder suficiente para destruir la mayoría de sus ciudades industriales y centros militares. Sugería, además, que los resultados de dichas pláticas, incluida la información sobre el poderío atómico estadounidense y su tasa de crecimiento, fueran conocidos públicamente para alertar a la ciudadanía autóctona y, a la vez, disuadir a los soviéticos de que podrían asestar un golpe de gracia, sin recibir una réplica igualmente desastrosa.

Aunque llamó la atención de Eisenhower, este albergó serias dudas sobre cuál era el verdadero propósito de la *Operación Candor*, como se denominó a esa propuesta de Oppenheimer. Teniendo en cuenta este precedente, resulta aún más claro que la revocación de su credencial de seguridad fue la manera de transmitir a sus colegas liberales el siguiente mensaje: los científicos nucleares debían renunciar a todo protagonismo en la esfera pública, máxime tratándose de cuestiones que atañen a la seguridad nacional. De ellos solamente se recabaría el asesoramiento científico, y si resultaba errático, este acarrearía un alto precio a pagar. A fin de cuentas, lo que desgració a Oppenheimer fue que los soviéticos hubieran logrado la bomba termonuclear que él mismo se había negado a diseñar; de ahí que toda recomendación suya pareciera cuando menos sospechosa (Bird y Sherwin, 2005).

Llegado a este punto, se necesitaría un correlato desde el lado soviético para comprender en toda plenitud cómo la profunda interpenetración entre lo científico y lo político de la tecnociencia nuclear obedece a ese sustrato militar genesiaco o «pecado original» de la bomba atómica, que la convierte en «el ejemplo más obvio de artefacto inherentemente político» (Winner, 2008: 74). En ambos casos, independientemente del sistema social vigente (capitalismo o comunismo), al plantearse el desafío antropológico de que la experiencia horrenda de Hiroshima y Nagasaki no podía repetirse nunca más —de lo contrario estaría en peligro la especie humana—, el dilema del doble uso de la energía nuclear subyació como meollo de la Guerra Fría, insuflando la confrontación ideológica y su retórica especular a favor de la paz, mientras secretamente eran incrementados los arsenales atómicos por ambas partes. Al abordar la tragedia de Chernobyl, obligatoriamente tendremos que referirnos a la consecución de la bomba atómica soviética, ya que —como se ha dicho antes— el modelo híbrido del reactor nuclear RMBK fue diseñado como un productor potencial de plutonio para fines bélicos, además de su función principal como productor de energía.

### 1.2/ *La deformación del ethos nuclear. Predominio del consecuencialismo*

Vista hacia el interior de cada comunidad científica nuclear, durante el transcurso de la Guerra Fría, esa interpenetración entre lo científico y lo político terminaría deformando el *ethos* original de los físicos nucleares, tanto estadounidenses como soviéticos. Aunque es difícil aquilatar cómo cambiaron sus patrones de conducta éticos a lo largo de los años, los estudios sociológicos coinciden en que la mayoría de los participantes en el proyecto Manhattan —y su homólogo soviético: la operación Borodino— terminaron justificando

su responsabilidad por haber estado supeditados a los imperativos del deber patriótico-militar (Gusterson, 1998; Vizguin, 2005). Para ejemplificarlo acudimos al testimonio del artífice teórico de la bomba termonuclear soviética, Andrei Sájarov. Deportado a Siberia por su disidencia política en la década de 1980, tras ser rehabilitado por el gobierno soviético durante el proceso conocido como *perestroika*, el gran físico ejerció un importante activismo social que incluyó su contribución al esclarecimiento público de la catástrofe de Chernobyl.

Sájarov reconoce en sus *Memorias* (1990) cómo fue variando su actitud hacia los aspectos humanos y éticos de la labor científica durante su participación en los proyectos armamentistas, antes y después de la Segunda Guerra Mundial. En un inicio, durante los primeros siete u ocho años, su gran dedicación personal —afirma— estuvo muy motivada por su afición a los cálculos teóricos, a la oportunidad de hacer «física de excelencia». Sájarov descarta que haya cinismo en las palabras de su homólogo italiano Enrico Fermi, quien alguna vez apeló a la frase: «En cualquier caso, es una buena física» para justificar su participación en el programa atómico estadounidense. Considerándola una afirmación honesta, el físico ruso aprovecha para franquearse en términos análogos cuando asevera: «La física de las explosiones nucleares y termonucleares ciertamente es un genuino paraíso para los teóricos». No obstante, enseguida se desdice al plantear que hubiera podido dedicarse a otro campo teórico igualmente gratificante. A fin de cuentas, Sájarov reconoce que su carrera científica no puede sustraerse de una reflexión de índole moral:

Lo que era más importante para mí en aquel momento, y creo que también para Igor Yevguénievich [Tamm] y demás miembros del grupo, fue la convicción de que nuestro trabajo era esencial [...] Mi conciencia no podía ignorar cuán terribles, inhumanos, eran los asuntos en que estábamos sumidos. Pero termina la guerra, y de nuevo otro asunto inhumano. Yo no fui un soldado en esa guerra, pero me sentía como un soldado más, de la ciencia y la técnica (Kurchátov decía algunas veces: somos soldados, y no era solo una frase). Con el tiempo, hemos aprendido a pensar por nosotros mismos sobre conceptos como equilibrio estratégico, disuasión termonuclear mutua, etc. Ahora creo que estas ideas globales contienen en realidad —si bien no del todo satisfactoriamente— la justificación intelectual de la obtención de las armas nucleares y de nuestra participación personal en ello. Entonces todo esto lo sentíamos más bien en un nivel emocional [...] era la psicología de la guerra (Sakharov, 1989: 96-97).

Seguidamente, expresando su profunda preocupación por Oppenheimer «y, por supuesto, aún más, por la trágica historia de Hiroshima y Nagasaki, que se ha reflejado en su alma», el creador de la bomba de hidrógeno soviética concluye la idea anterior con esta sentencia: «Hoy el arma termonuclear no se ha usado una sola vez contra la gente en la guerra. Mi sueño más apasionado (más profundo que cualquier otra cosa) es que el arma termonuclear impida la guerra, pero nunca sea utilizada».

Hemos sido prolijos con el testimonio de Sájarov porque ilustra fehacientemente cómo el factor dominante del *ethos nuclear* terminaría siendo la adopción de un utilitarismo,

según el cual no ya solo la bomba atómica, sino también la bomba termonuclear, están justificadas e, incluso, fueron necesarias para mantener el equilibrio bipolar mundial. La idea predominante es que, con la producción de esas armas de exterminio, se evitaría una nueva conflagración a nivel planetario, pues el peligro de provocar un «genocidio nuclear» permanece como condición latente. Es el mismo criterio de su homólogo estadounidense Edward Teller, creador de la bomba termonuclear estadounidense, quien solía explicarlo de una manera más simple, apelando a la máxima latina: *Si vis pacem, para bellum* («Si quieres la paz, prepara la guerra»), la cual sirvió de fundamento a su libro autobiográfico: *Memoirs: a Twentieth-Century Journey in Science and Politics* (Teller y Shoolery, 2001).

Al apelar a esta justificación utilitaria de su responsabilidad moral, los científicos involucrados en la obtención del arma atómica, tanto norteamericanos como soviéticos, contribuyeron al predominio de la visión consecuencialista («no importan las acciones, sino sus consecuencias»), por encima de la visión deontológica («no hagas el mal para conseguir el bien») (Gusterson, 1998; Vizguin, 2005). Como unos de los fundamentos ideológicos de la Guerra Fría, la primacía de esa visión consecuencialista primó por encima de toda consideración moral y ética sobre la amenaza de absolutez destructiva que entraña el dominio de la energía nuclear. Esto podría explicar que, al unísono, despuntara acriticamente el anhelo de la comunidad científica por aprovechar la fisión atómica en la esfera civil como una manera de «conseguir el bien» luego de haber provocado el mal. Y es con arreglo a esa puja dialéctica entre el bien y el mal que encaja el programa «Átomos para la paz», concebido por Eisenhower cuando ya Estados Unidos — responsable del estreno destructivo de esa fuente de energía— había perdido el monopolio sobre el arma atómica desde 1949 y se hacía notoria la emergencia de nuevos Estados nucleares. A Rusia le había seguido Gran Bretaña en 1952, con la detonación de su primera bomba atómica a bordo de un viejo buque anclado cerca de las islas Monte Bello, Australia (Bird, 1989).

En lo adelante, a la doctrina de la disuasión nuclear en términos consecuencialistas se yuxtapuso la idea de la energética nuclear como panacea universal. Incluso llegó a interpretarse utópicamente el programa «Átomos para la Paz» como una iniciativa para el desarme, pues se auguraba que los materiales fisionables de uso bélico terminarían transformados para su empleo civil en un futuro cercano (Forland, 1997). Tal convicción puede inferirse de las palabras introductorias a un folleto divulgativo publicado por la UNESCO en 1955, a raíz de haberse celebrado ese año en Ginebra la primera Conferencia Internacional sobre la Utilización de la Energía Atómica para Fines Pacíficos:

Se abre así una nueva era. La ciencia nuclear y la utilización industrial de la energía nuclear quedarán al servicio de todo el mundo. Tan importante es para la Humanidad el conocimiento de los nuevos descubrimientos como lo fue, en su momento, aprender a utilizar el carbón y el vapor. La nueva energía estará ya en amplia explotación mucho antes de que los libros de texto en los colegios puedan ser escritos de nuevo, y antes de que los niños que los estudien lleguen a su edad adulta (Wendt, 1955).

El dilema del doble uso persistiría por la contradicción insoluble de aspirar a contener la propagación de la bomba atómica, evitando que fuera conseguida por otras naciones, mientras que —al mismo tiempo— eran recomendados el suministro de material fisible y el intercambio de tecnología e información hasta entonces secretas entre los distintos países. Surge el riesgo de proliferación nuclear como la manifestación más elocuente de la sinergia entre las aplicaciones pacífica y bélica de la fisión del átomo, dado que persiste ontológicamente el vínculo morfogénico entre la energética nuclear y la tecnología de la bomba atómica. Afianzándonos en esta distinción ontológica, veremos a continuación cómo la interpenetración entre lo científico y lo político que significa ese doble uso de la energía nuclear ha quedado expresada a nivel institucional, tanto nacional como internacionalmente.

### 1.3/ *El riesgo de proliferación nuclear. Las salvaguardias del OIEA*

La esperanza de hallar una manera de impedir que el uso pacífico de la energía nuclear fuera desvirtuado hacia el lado opuesto: la proliferación del arma atómica, ha sido retomada una y otra vez en la historia de la energética nuclear (Pilat, 2009). Hoy esta problemática se encara como «resistencia a la proliferación» (*proliferation resistance*), con tal de ofrecer soluciones intrínsecas (tecnológicas) y extrínsecas (institucionales) que permitan minimizar ese riesgo (IAEA, 2010a). Comenzaremos por estas últimas (extra), en referencia a la creación y funcionamiento del OIEA y su sistema de salvaguardias (*safeguards system*).

Luego del fallido Plan Acheson-Lilienthal (1946), reformulado como Plan Baruch ese mismo año, las preocupaciones sobre la proliferación nuclear se vuelven a retomar seriamente en 1953 cuando, a instancias del programa «Átomos para la paz», las dos grandes superpotencias comienzan sus deliberaciones para crear el organismo internacional que procure esa «pacificación». El OIEA entra por fin en funcionamiento el 29 de julio de 1957 y ese mismo año, el 1ro de octubre, tiene lugar su primera conferencia general en su sede de Viena. Concebido como entidad autónoma de la ONU para promover la transferencia de tecnologías nucleares con fines pacíficos en todo el mundo, ese organismo debió asumir *de facto* la responsabilidad de controlar cualquier intento de emplearlas militarmente. Con ese objetivo se dispuso que recibiría, almacenaría y protegería —si bien no como exclusivo propietario— reservas de uranio natural y de materiales fisibles de los Estados poseedores para su suministro suficiente y equitativo a quienes no contaran con esos recursos. A cambio, cualquier país miembro que solicitase esa ayuda debía prometer que no la emplearía con fines militares y estar dispuesto a ser inspeccionado en dependencia de los convenios contraídos con el OIEA o países suministradores (Fischer, 1997).

Las condiciones de esas inspecciones se habían acordado un año antes, en Nueva York, luego de que la Unión Soviética, apoyada por India y Francia, insistiera en que las mismas debían efectuarse comedidamente para respetar la soberanía de las naciones (Timerbáev, 2006). Es también importante señalar que la influencia soviética fue decisiva en la redacción del artículo IX de los estatutos del OIEA, según el cual este organismo —aunque no quedara bajo control directo de la ONU— tiene que reportar al Consejo

de Seguridad, «proporcionándole, cuando lo solicite, la información y la asistencia que puedan serle necesarias para cumplir el deber que le incumbe de mantener o restablecer la paz y la seguridad internacionales» (OIEA, 1998). Gracias a ese acuerdo, el OIEA fue el primer organismo internacional de amplio alcance al que se otorgaron funciones de control e inspección en los territorios de sus países miembros (Orlov, 2002).

Sin embargo, esos primeros acuerdos giraron en torno a un presupuesto que, al fin y al cabo, resultó totalmente irreal: suponer que la cantidad de materiales fisionables podía restringirse debido a la dificultad tecnológica para obtenerlos y porque apenas existían yacimientos de uranio en condiciones de explotación industrial. En su momento, en 1939, cuando ya era evidente que los alemanes habían reparado en la utilidad bélica de la fisión atómica, Einstein había alertado en una de sus cartas al presidente Roosevelt: «Los Estados Unidos tiene muy pocas minas de uranio, con vetas de poco valor y en cantidades moderadas. Hay muy buenas vetas en Canadá y en la ex-Checoslovaquia, mientras que la fuente más importante de uranio está en el Congo Belga» (Vallentin, 1954; Clark, 1971).

En efecto, el uranio para el Proyecto Manhattan terminó siendo importado secretamente desde esas minas de Canadá y del Congo Belga, en su mayoría del país africano, donde en 1915 había sido descubierto el rico yacimiento de Shinkolobwe, cuya explotación permitió a empresas de Bélgica monopolizar pocos años después el comercio del radio (Zoellner, 2009). Por sus propiedades curativas de tumores malignos, esta sustancia se había convertido en la más cara del mundo, luego de que Marie y Pierre Curie obtuvieron el Premio Nobel de Química en 1911 por haberla descubierto en 1898, además del polonio, procesando toneladas de residuos de *pechblenda* (mineral rico en óxidos de uranio), traídas a su laboratorio en París desde las minas de Jáchimov, en Checoslovaquia (Adloff, 1999).

Hacia 1939 apenas se conocían en Rusia cinco yacimientos de uranio, descubiertos cuando, a la par que los belgas en África, fueron emprendidas expediciones por geólogos rusos bajo la dirección del ya mencionado Vladímir I. Vernadski, con el objetivo también de encontrar fuentes del codiciado radio, aunque no llegaron a explotarse. Incluso hay testimonios, aunque confusos, de una visita de Marie Curie con ese propósito a Siberia en 1914 (Domarenko y Rijvanov, 2007). Pero no fue hasta las postrimerías de la Segunda Guerra Mundial, teniendo información de primera mano sobre el avance del proyecto Manhattan, que el gobierno soviético impulsó la búsqueda masiva de uranio (Zenchenko, 2007). Una vez detonada su primera bomba atómica en 1949, y máxime luego de conseguir la bomba de hidrógeno en 1953, esas prospecciones geológicas se desarrollaron vertiginosamente por todo el vasto territorio del Estado multinacional, incluidas sus repúblicas en Asia central: Kazajistán, Uzbekistán y Kirguistán (Andriushin *et al*, 2003). El avance de la «geología del uranio» fue crucial para que la URSS incrementara su poderío atómico a un ritmo más acelerado que lo previsto por Estados Unidos, como demuestra la secuencia de pruebas nucleares que los soviéticos hicieron en lo adelante, y su decisión más atrevida de la Guerra Fría: emplazar misiles nucleares en Cuba en 1962, a solo unos 180 kilómetros de Norteamérica.

Bautizada como «Crisis del Caribe» (*Karibski Krizis*) por los rusos; *Cuban Missile Crisis* por los norteamericanos, y «Crisis de Octubre» por los cubanos, la vivencia de esa situación límite que puso al mundo al borde del exterminio condujo al entendimiento diplomático soviético-estadounidense sobre la cuestión nuclear. También influyeron factores como el interés común para evitar que Alemania occidental tuviera el arma atómica y, sobre todo, la preocupación porque China había detonado su primera bomba nuclear en 1964 (Orlov, 2002). Además de firmar el primer tratado para la prohibición parcial de ensayos nucleares, ambas superpotencias —Estados Unidos y URSS— se replantearon en conjunto el sistema de salvaguardias como el principal mecanismo verificador del OIEA, asignándole el papel de «guardián de la no proliferación nuclear» (Garrido Rebolledo y Marquina Barrio, 1995).

Desde entonces, esas verificaciones han sido aplicadas de manera tan controversial, que es muy difícil efectuar un balance de sus resultados prácticos (Forland, 1997). Resulta indispensable tener en cuenta que los países concertan acuerdos de salvaguardias con el OIEA en consonancia con lo establecido por el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP), el cual también ha sido objeto de múltiples cuestionamientos al enfrentar tres problemas fundamentales: no es un tratado universal; se ha producido una proliferación nuclear clandestina, y el cumplimiento del compromiso de desarme nuclear no se ha materializado, desacelerándose cada vez más (Salazar, 2015).

Abierto a la firma desde el 1 de julio de 1968, puesto en vigor en 1970 y ratificado hasta 2015 por 189 países (casi todos los que integran la ONU), ese tratado legitima únicamente a cinco de ellos como Estados Nuclearmente Armados (NWS; Nuclear Weapon States), atendiendo a que efectuaron sus ensayos del arma nuclear antes del 31 de diciembre de 1967: Estados Unidos (en 1945), Unión Soviética (hoy, Rusia, en 1949), Reino Unido (1952), Francia (1960) y China (1964). Estos cinco Estados se comprometen a no transferir tecnología para la fabricación de armas atómicas a otros países, mientras que los restantes Estados No Nuclearmente Armados (NNWS) se comprometen a no dotarse de ellas y a suscribir acuerdos de salvaguardias con el OIEA para que verifique que sus programas nucleares civiles no se desvían hacia fines militares.

Sin embargo, el TNP no logró evitar la llamada «proliferación nuclear horizontal», ya que lograron sus propios arsenales atómicos otros cinco Estados, los cuales se negaron desde un principio a firmar dicho tratado y uno se retiró del mismo después de haberlo suscrito. Son el caso de la India, que hizo su primera prueba en 1974, supuestamente con fines pacíficos, pero en 1998 se declaró potencia nuclear, al igual que lo hizo Pakistán ese mismo año, detonando varios artefactos. Ellos nunca quisieron firmar el TNP, así como tampoco Israel, cuya posesión de bombas atómicas es obvia, aunque no lo reconoce. Lo mismo sucedía con Sudáfrica hasta que, al término del *apartheid*, destruyó sus arsenales en 1993 y se adhirió a dicho tratado. Renunciando a este, la República Democrática Popular de Corea detonó su primera bomba nuclear en 2006 y puso en evidencia una gran insuficiencia del TNP: que su ratificación es libre y los países pueden abandonarlo por voluntad propia, sin ser objeto de sanción alguna (Arbatov, 2012).

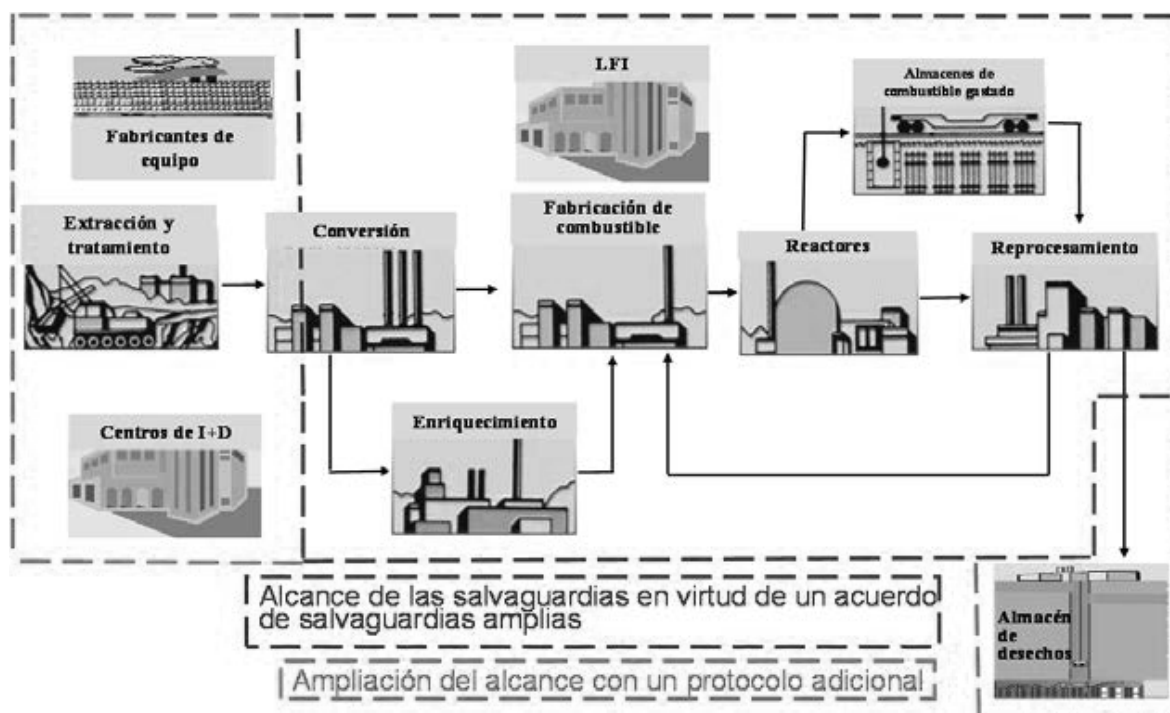


Figura 4: Diagrama simplificado del alcance de las actividades nucleares en virtud de un acuerdo de salvaguardias amplias (ASA) y un protocolo adicional. Fuente: OIEA (2013a)

Por otra parte, las sanciones internacionales son difíciles de imponer y aplicar porque en el seno de la ONU, específicamente en el Consejo de Seguridad, coexisten todavía las formas heredadas de la Guerra Fría, como el derecho de veto que disfrutaban sus cinco miembros permanentes, los mismos que son Estados Nuclearmente Armados (Greenstock, 2008). De modo que hay una correspondencia unívoca entre el privilegio político de esa pentarquía y el estatus jurídico del TNP por el cual esos cinco países son los únicos avalados para disponer del arma atómica. Al ejercer cada una de esas potencias nucleares su derecho de veto para bloquear aquellas decisiones («resoluciones») que afectaban sus intereses, el Consejo de Seguridad estuvo prácticamente paralizado durante el transcurso de la Guerra Fría (Lowe, 2008). No es hasta poco después de la desintegración de la Unión Soviética en 1991 que, ese mismo año, los miembros permanentes de dicha pentarquía— con Rusia en sustitución de la URSS— adoptaron por primera vez, unánimemente, una decisión relacionada con el riesgo de proliferación nuclear: la resolución 687 en contra de Irak, como consecuencia de la Guerra del Golfo Pérsico. Para ello se recabó información y asistencia a la junta de gobernadores del OIEA, sobre la base jurídica del artículo IX de sus estatutos.

Por primera vez en la historia, un Estado miembro del TNP y que mantenía acuerdos de salvaguardias con el OIEA fue obligado a desmantelar su programa nuclear, acusado de haber desarrollado secretamente el arma atómica durante la década de 1980. Aunque finalmente las inspecciones de ese organismo no corroboraron tal imputación, dicho conflicto derivó en la ocupación de ese país en 2003 por tropas de Estados Unidos y sus aliados de la OTAN. Al igual que sucedió en Yugoslavia en 1999, se impuso el uso de la fuerza en las relaciones internacionales, ya que esa coalición militar actuó sin obtener el mandato del Consejo de Seguridad de la ONU (Kalyadin, 2007). Durante ese episodio quedó en entredicho la



credibilidad del OIEA tras ser desestimados los resultados negativos de sus inspecciones técnicas en el terreno, dándose por sentado que Irak sí había violado sus compromisos de no proliferación nuclear (Blix, 2004). Fue entonces que, desde 1997, en plena crisis nuclear iraquí, este organismo instauró un modelo de protocolo adicional a los llamados «acuerdos de salvaguardias amplias» (ASA), con miras a que los Estados aceptaran voluntariamente facilitar la obtención de información y el acceso expedito de los inspectores internacionales a la totalidad del ciclo de combustible nuclear: desde la extracción y tratamiento del uranio (y torio) hasta los almacenes de desechos, incluidos los fabricantes de equipos, centros de investigación y otros elementos de apoyo (OIEA, 2013a) (ver figura 4).

Tales inspecciones fueron exigidas a Irán ante la sospecha de que su programa nuclear siempre ha perseguido la consecución del arma atómica, pues desde un inicio se previeron instalaciones propias para el enriquecimiento del uranio, incluida tecnología láser, además de producir otro componente sensible: el agua pesada ( $D_2O$ ), facilitadora de la obtención de plutonio (Khlopkov, 2011). Al reiterar que sus actividades tienen un fin pacífico con el único objetivo de asegurar el suministro energético de su país, el gobierno iraní desafió las sanciones impuestas desde 2003 por el Consejo de Seguridad, considerándolas «resoluciones ilegales», así como subrayando que los protocolos adicionales del OIEA no tienen un carácter vinculante —o sea, no son de obligatorio cumplimiento—, si bien los aceptó de forma voluntaria durante un tiempo (desde 2003 a 2006). «La concertación de un protocolo adicional es una decisión soberana de todo Estado», se defendió el gobierno iraní en una de sus respuestas al director general del OIEA, recordando que esta condición fue aprobada por sendas conferencias de ese organismo y el TNP, respectivamente (OIEA, 2014).

Un factor insoslayable radica en que Irán pertenece al TNP, mientras que su enemigo ancestral Israel no forma parte del mismo. El gobierno israelí rehúsa confirmar o negar oficialmente la posesión del arma atómica, de haberla desarrollado o tener un programa de armas nucleares. En 1979 se produjo el controvertido incidente Vela o South Atlantic Flash, cuando un satélite estadounidense informó haber detectado una llamarada característica de una explosión atómica hacia el sur del Océano Índico. Existe el convencimiento de que se trató de un test nuclear israelí en conjunto con Sudáfrica, si bien fue desestimado por el gobierno norteamericano debido a intereses políticos (Weiss, 2011; Rhodes, 2010). Tanto la «ambigüedad nuclear» de Israel como el programa nuclear iraní suscitan las más serias preocupaciones, llegándose incluso a especular sobre un posible escenario de destrucción mutua entre esos países en el Oriente Medio (Pedatzur, 2007)<sup>3</sup>.

Sirva este último ejemplo para ilustrar el delicado entramado jurídico y diplomático que envuelve a la «actividad nuclear pacífica» a nivel global, ante el desafío de que los programas nucleares de algunos Estados miembros del TNP evolucionen militarmente como reacción

<sup>3</sup>El tema iraní se agravó luego de que el 8 de mayo de 2018 se produjera la renuncia unilateral del gobierno de Washington al Acuerdo Nuclear entre el país persa y el Grupo 5+1 (cinco miembros del Consejo de Seguridad más Alemania), firmado el 14 de julio de 2015 en Viena y puesto en vigor en enero de 2016. A cambio de que se eliminaran las sanciones en su contra, Irán se había comprometido a recibir las inspecciones del OIEA; desconectar dos tercios de sus centrifugadoras para el enriquecimiento del uranio, y darle curso al 96% de ese material fisible ya producido, entre otras restricciones que le impedirían producir la bomba atómica antes del plazo de un año (Entessar y Afrasiabi, 2018)

a la posesión del arma atómica por sus vecinos enemigos que no integran dicho tratado. La península coreana es otro caso, ya que Corea del Sur es miembro del mismo y Corea del Norte no lo es, además del diferendo histórico entre India y Pakistán, también remisos a firmar el TNP. Contra la lógica de la disuasión nuclear, que era la doctrina manejada por las superpotencias en la Guerra Fría, emerge la posibilidad de un escenario a escala regional que podría superar en tensión a la crisis de los misiles en Cuba en 1962 (Jasper, 2014). De modo que resulta muy difícil prever cuál será la dinámica de la proliferación nuclear en un mundo multipolar. A ello se suma el terrorismo como una realidad concientizada tras los sucesos del 11 de septiembre de 2001, no descartándose que un Estado aislado por la comunidad internacional pudiera facilitar material nuclear y/o radiactivo a una organización o individuo, o estos hacerse del mismo para provocar sabotaje con una «bomba sucia» (*dirty bomb*) o RDD (Radiological Dispersion Devices) (Schaper, 2003).

Todos estos factores han dado lugar a intensos debates teóricos en el campo de la seguridad y las relaciones internacionales, tratando de resolver lo que se ha catalogado, a modo de retruécano, como *proliferation puzzle* (Davis y Frankel, 1993; Ogilvie-White, 1996; Hymans, 2006). De esas polémicas se concluye que no hay una razón única que revele suficientemente cuando un Estado ha decidido optar por el arma atómica, sino que predomina la «ambigüedad nuclear» en referencia a que resulta muy complejo decodificar si tan solo explora cómo obtenerla, persigue lograrla con medios propios o recibiendo asistencia «sensible» de otro país (*sensitive nuclear assistance*), y lo que es más grave: si ya posee desde antaño algún componente de la bomba o prototipo funcional, como fue el caso de la India, que hizo un ensayo nuclear en 1974 con fines pretendidamente pacíficos (Montgomery y Sagan, 2009).

Los estudios sociales de la ciencia y la tecnología también se han dedicado a entender la proliferación del arma atómica como un fenómeno de contingencia histórica que, desde sus orígenes, borra los límites entre la política y la tecnociencia nuclear. Estos trabajos cuestionan los enfoques deterministas extremos que explica la evolución de la carrera armamentista como una consecuencia natural e inevitable de los avances científicos e ingenieriles. La idea es que han sido más importantes los intereses individuales, organizacionales y corporativos al optarse por una u otra variante tecnológica para obtener la bomba (Ogilvie-White, 1996). Basándose en el estudio de casos: la producción de misiles más precisos en los Estados Unidos (MacKenzie, 1990) y las evoluciones de los programas nucleares de India y Sudáfrica (Flank, 1994), estos autores analizan las relaciones o alianzas que se establecen entre los ámbitos científico, militar y político en dependencia del contexto sociohistórico y cultural, como puede ser el prestigio que ofrece a los expertos nucleares de cada país el poder demostrar su capacidad para obtener la bomba atómica, cuya carga simbólica es ponderada por los nacionalismos y otros «ismos» de distinto pelaje. Estas motivaciones, que pueden ser consideradas también «patrióticas», difieren de la doctrina consecuencialista preconizada por los científicos estadounidenses y soviéticos con el fin de mantener el equilibrio estratégico o disuasión termonuclear mutua durante la Guerra Fría.

Otros estudios han tratado de cuantificar hasta qué punto la posibilidad de lograr el arma atómica varía en dependencia de cuál pueda ser la asistencia técnica recibida: ayuda para el enriquecimiento de uranio, el reprocesamiento de plutonio o la ejecución de diseños de prototipos (Montgomery y Sagan, 2009). Suscita creciente interés la problemática de cómo la cooperación internacional en materia de transferencia tecnológica ha contribuido a facilitar la proliferación nuclear horizontal, incluso en forma inadvertida por los países proveedores (Fuhrmann, 2010). En este sentido, resulta contraproducente que los Estados avalados internacionalmente para disponer del arma atómica promulguen una máxima resistencia a su proliferación, pero al mismo tiempo persigan extraer el mayor beneficio de la exportación de tecnología nuclear con fines civiles (Nassauer y Sokolski, 2010).

Todo esto introduce dificultades crecientes para definir qué puede catalogarse como «actividad nuclear pacífica». Es obvio que dicha condición depende de las circunstancias geopolíticas y motivos estratégicos, como ha sucedido en el Oriente Medio con el caso de Irak e Irán. Las intenciones políticas precederán y/o acompañarán siempre a la actuación del OIEA y su sistema de salvaguardias, aunque este aspire a mejorar la resistencia a la proliferación mediante inspecciones más estrictas con ayuda de las innovaciones técnicas. Y es que las aplicaciones tecnológicas para incrementar la «resistencia a la proliferación» solamente pueden obstaculizar el doble uso de la fisión atómica, pero no eliminarla, dada la condición ontológica del nexo intratécnico entre industria militar y energética nuclear.

#### *1.4/ El nexo intratécnico entre industria militar y energética nuclear*

*¿Es posible una energética nuclear que sea netamente pacífica desde el punto de vista tecnológico?* Hay una sola respuesta y es negativa: resulta imposible mientras su desarrollo continúe supeditado al «ciclo de combustible nuclear» que tiene como base el uranio natural, elemento químico con mayor peso atómico en la naturaleza, repartido entre sus dos isótopos: 99,28% de uranio-238 y apenas 0,71% de uranio-235 (contiene también uranio-234, pero es prescindible). Esta composición isotópica puede considerarse la principal condición ontológica del dilema de doble uso, ya que determinó la infraestructura técnica originalmente creada para la obtención del arma atómica en sus dos variantes: uranio-235 y plutonio-239.

Cada uno de esos materiales físi les daría una bomba diferente, con distintos modelos, distintas cargas, distintos diseños... sin que existiera ninguna constancia de que tendría éxito. El reto científico consistía en diseñar el mecanismo capaz de comprimir el uranio-235 —o el plutonio-239— hasta superar la «masa crítica», a partir de la cual se libera una cantidad proporcional de energía, según la socorrida ecuación de Einstein:  $E=M \times C^2$  (la energía es igual a la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío). La «masa crítica» depende de las propiedades físicas del correspondiente material físil (en particular, su densidad), su probabilidad de experimentar la reacción de fisión y el número de neutrones que libere al desintegrarse, entre otros factores (Clayton, 2010). Por si fallaba una de esas opciones tecnológicas, el proyecto Manhattan emprendió ambas al unísono: mientras la

opción del uranio-235 impulsó la separación isotópica a gran escala del uranio natural para su enriquecimiento (uranio-235 > 80 %), por su parte la opción del plutonio-239 condujo a la invención de la pila o reactor nuclear para producir este actínido ausente en la naturaleza a partir del uranio-238 (Reed, 2014).

Conseguida el arma atómica por una y otra vía: separación del uranio-235 y diseño del reactor plutonígeno, ambas soluciones tecnológicas fueron conjugadas para sentar aceleradamente las bases de la energética nuclear. Con ese objetivo, los reactores nucleares fueron rediseñados para la generación de energía térmica con fines civiles (vapor de agua y electricidad), dosificando el enriquecimiento de uranio-235 entre un 3 y 5 % para usarlo solamente en calidad de combustible. Pero como dentro de los reactores siempre ocurre la transformación del mayoritario uranio-238 en plutonio-239, esas «usinas» nucleares siguieron siendo inevitablemente plutonígenas en mayor o menor medida.

Una cuestión recurrente en los estudios sobre los aspectos tecnológicos de la proliferación nuclear horizontal es cuál de esas vías —uranio-235 o plutonio-239— ha sido la preferida por los países proliferantes y qué factores incidieron en la elección de una u otra (Ullom, 1994; Velarde, 2014). Al arrojar luz sobre los programas nucleares en el pasado, esos análisis tratan de revelar cuáles capacidades tecnológicas fueron suficientes para obtener esos artefactos bélicos y de qué manera podrían ser adquiridas por algunos países en un futuro cercano. No es igual el programa de la India, basado principalmente en la tecnología del plutonio, al caso de Pakistán, que priorizó el uranio enriquecido (Nayyar *et al.*, 1997; Mian *et al.*, 2009). Luego de optar por el plutonio, Corea del Norte podría haber emprendido la segunda vía, o sea, desarrollar la bomba de uranio-235 (Nikitin, 2013). Esto al margen de que haya reportado la prueba subterránea de una supuesta bomba de hidrógeno en febrero de 2016, aunque su registro sísmico suscita dudas de que haya sido cierto (McGlinchey, 2016). Eso sí, todos los Estados que secretamente han conseguido el arma nuclear lograron prototipos análogos a las primitivas bombas de fisión del proyecto Manhattan: de uranio-235 (método de proyectil) y de plutonio-239 (método de implosión). Pasamos a caracterizarlas sucintamente con el objetivo de ilustrar cómo se ha facilitado su obtención hoy día, debido al perfeccionamiento de las mismas tecnologías de antaño.

*Little Boy* (uranio-235; método de proyectil): lanzada sobre Hiroshima el 6 de agosto de 1945 sin necesidad de ensayo previo; se estima que su potencia explosiva fue cercana a los 15 kilotones (kt), equivalente a cerca de 15 000 toneladas de TNT (Malik, 1985). Si bien los datos oficiales nunca han sido revelados, se calcula que para garantizar ese poder destructivo fueron dispuestos en su interior 64,15 kilogramos de uranio enriquecido al 80% (Coster-Mullen, 2008). Su mecanismo de detonación se asemejaba al mecanismo de un revólver (*gun-type*): llegado el momento, una parte del uranio-235 (60 %) era disparada como un proyectil para unirla con el resto de esa sustancia y, de esta manera, en menos de un milisegundo superar la «masa crítica». A partir de esa porción mínima, se desencadena la reacción nuclear en forma autosostenida, hasta que esa cantidad se fisiona completamente o, lo que es más probable, se calienta a sí misma y termina dispersándose.

Desde entonces el uranio-235 constituye el nucleido fundamental de la tecnología de fisión nuclear, y las instalaciones para su separación del uranio-238 han producido ese isótopo físil con fines militares y civiles, indistintamente. Durante el proyecto Manhattan a ese «uranio enriquecido» —o sea, con un alto porcentaje de uranio-235— se le llamó *oralloy* en la jerga militar, al anteponer a la palabra *alloy* (aleación en inglés) las siglas de Oak Ridge, la ciudad secreta en las montañas de East Tennessee donde funcionaron las plantas dedicadas a la producción de ese material fisiónable en cantidades significativas. Codificadas como S-50, Y-12 y K-25, la primera de estas instalaciones separadoras y/o enriquecedoras trabajaba según el principio de difusión térmica líquida; la segunda, con el principio electromagnético, y la tercera utilizaba el método químico de difusión gaseosa del hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ). Debido a las dificultades presentadas, esos tres procesos fueron conectados en serie hasta lograr el *oralloy* con la imprescindible concentración y propiedades físicas, aunque el mayor peso lo llevaron Y-12 y K-25. En su implementación resultó fundamental la experiencia de la industria química, principalmente de la corporación Du Pont de Nemours, cuyos ingenieros dominaban los problemas físico-químicos (transferencia de calor, termodinámica, separación química...) que son inherentes a la fabricación de amoníaco y de *nylon* (Reed, 2014).

Esos métodos de enriquecimiento fueron superados por la tecnología de centrifugación rápida del hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ ), implementada en 1953 por los soviéticos con el aporte de científicos alemanes capturados al finalizar la Segunda Guerra Mundial (Emelianenkov, 2013). Y aunque la difusión gaseosa continúa empleándose, el centrifugado rápido resulta mucho más económico y asequible tecnológicamente. La reiteración de este proceso en cascada posibilita concentrar por etapas el uranio-235 y así enriquecerlo en pocas semanas o meses (Glasser, 2008). La desconfianza hacia el programa civil nuclear iraní ha tenido como *leitmotiv* principal este avance tecnológico: la posesión y desarrollo de ultracentrifugadoras que, al ser conectadas en serie, pueden producir rápidamente el uranio para unas cuantas bombas del tipo *Little Boy* arrojada sobre Hiroshima (Albright y Walrond, 2010).

El uranio enriquecido se clasifica por su grado de concentración: hasta un 20% de uranio-235 se trata de uranio poco enriquecido (*Low Enriched Uranium*, LEU), siendo siempre inferior al 5% en el combustible típico para los reactores energéticos con fines civiles (*Uranium Reactor Grade*). Cuando el contenido supera el 20% es clasificado como uranio altamente enriquecido (*Highly enriched uranium*, HEU), prestándose para ser desviado con propósitos militares, y si excede el 90% ya resulta apto para armas (*Uranium Weapon Grade*) (IAEA, 2005). Estas concentraciones máximas están presentes en el combustible de ciertos reactores de investigación y para la propulsión naval. Por este motivo la verificación de los inventarios de HEU, incluyendo el uranio extraído de las armas desmanteladas, se considera uno de los más importantes indicadores de la resistencia a la proliferación vertical y de los tratados de desarme nuclear acordados entre Estados Unidos y Rusia (Feiveson *et al*, 2014).

*Fat Man* (plutonio-239; mecanismo de implosión): arrojada sobre Nagasaki el 9 de agosto de 1945, tres días después del ataque a Hiroshima, era aún más potente (21 kt) que *Little Boy* (15 kt), a pesar de que contenía solamente 6,2 kg de plutonio-239; o sea, casi diez veces menos

material físil (Coster-Mullen, 2008; Malik, 1985). Esto se explica porque, en comparación con el uranio-235, la masa crítica del plutonio-239 es bastante menor debido a su mayor probabilidad de fisión y desprendimiento de neutrones. Aunque la obtención artificial de transuránicos ya había sido comprobada por Enrico Fermi, la existencia del plutonio no se confirmó hasta que en 1941 Glenn T. Seaborg sintetizó apenas unos miligramos, usando un acelerador de deuterones (ciclotrón) para bombardear nitrato de uranio en el Radiation Laboratory de la Universidad de California en Berkeley (Clark y Hobart, 2000). Comprobado que el plutonio-239 tiene mejores propiedades físilas que el uranio-235, quedaba por manifestar la posibilidad de producir ese elemento artificial a partir del uranio natural, cuyo isótopo más común (uranio-238) se transforma en dicho actínido al absorber un neutrón con baja energía (térmico). Con este objetivo es que fue creada por Fermi y Szilárd, con carácter experimental, la primera «pila nuclear» (Chicago Pile-1), puesta en servicio el 2 de diciembre de 1942 en el Laboratorio de Metalurgia de la Universidad de Chicago. Este es el embrión de la máquina conocida como «reactor nuclear» (ver próximo subacápite 1.5).

Una vez demostrado que la reacción de fisión nuclear en cadena podía ser provocada y controlada tecnológicamente, quedaban aún dos problemas por resolver. Uno era el de la construcción de un reactor ya propiamente dicho con la potencia suficiente para producir plutonio en la cantidad necesaria dentro del breve plazo que se disponía. El otro problema consistía en encontrar, también dentro de ese breve plazo, un procedimiento químico para separar el plutonio-239 de los bloques de uranio irradiados neutrónicamente y de la enorme cantidad de sustancias radiactivas que se producen durante el proceso de fisión nuclear. Adoptando el máximo de precaución, ya que el plutonio es tremendamente radiactivo y venenoso, su refinación pudo resolverse mediante un proceso de separación por medios químicos (fosfato de bismuto), que luego fue sustituido por la extracción mediante disolventes (Seaborg *et al*, 1994).

No obstante, el empleo de este actínido artificial como material físil chocó con un obstáculo que ensombreció las expectativas del proyecto Manhattan, llegando a parecer inviable: el fenómeno de la «fisión espontánea» del plutonio-240, una propiedad hasta ese momento desconocida que dificulta su uso como explosivo (Reed, 2014). Haremos hincapié en esta característica porque remite a las arduas polémicas actuales sobre hasta qué punto el plutonio presente en los reactores civiles (*Plutonium Reactor Grade*), tanto en el combustible fresco como irradiado, puede usarse para construir una bomba atómica, más allá de que el plutonio militarmente apto (*Plutonium Weapon Grade*) sea considerado solo aquel con un contenido de plutonio-239 no menor de 93,5 % (United States, 1997).

Cuanto más tiempo permanezca el plutonio-239 bajo la avalancha neutrónica en el interior del reactor nuclear, mayor será la probabilidad de que una parte se convierta en plutonio-240. A diferencia del uranio natural y todos los demás transuránicos, este último isótopo tiende fácilmente a fisionarse por sí mismo en forma natural y espontánea, desprendiendo neutrones al desintegrarse. Por esta razón bastaría una mínima fracción o impureza de plutonio-240 en una masa crítica de plutonio-239 para que se desatara incontroladamente la reacción de

fisión nuclear en cadena. Esto provocaría una predetonación, apenas un fogonazo, en lugar de la explosión nuclear en toda su magnitud, que es el objetivo de la bomba atómica. La única solución es alcanzar la supercriticalidad en apenas unos microsegundos; o sea, antes de que se produzca alguna fisión espontánea. Al no poder lograrse esa velocidad con el método del proyectil usado para el uranio-235, en su lugar fue inventado el método de implosión. Su principio de funcionamiento es el siguiente: una esfera hueca subcrítica de plutonio enriquecido (94% de plutonio-239) está rodeada de lentes de explosivo convencional que, al estallar, origina una onda de choque esférica que comprime ese material físil hasta rellenar el hueco. Una vez rellenado, esa misma onda de choque sigue comprimiendo el plutonio-239, cuya densidad aumenta hasta que, llegado el momento, se convierte en un sistema supercrítico. La prueba de *Trinity* se hizo con el objetivo de comprobar la eficacia de este mecanismo, antes de lanzar *Fat Man* sobre Nagasaki (Coster-Mullen, 2008).

En Estados Unidos se considera que el plutonio de grado combustible (*Plutonium Fuel Grade*) contiene entre un 80% y 93% de plutonio-239, mientras que por debajo del 80% se clasifica como el contenido típico en los reactores nucleoenergéticos (*Plutonium Reactor Grade*). Sin embargo, hoy no se descarta que un menor contenido sea ya suficiente para fabricar una bomba devastadora, independientemente de que el plutonio-239 haya permanecido el tiempo prudencial dentro de un reactor nuclear civil para transformarse parcialmente en plutonio-240 y otras impurezas isotópicas. Aunque pudiera provocar una detonación prematura, haciendo peligrosa su manipulación e invalidándolo como material físil, hay sospechas de que este obstáculo podría ser superado con ayuda de novedosas soluciones ingenieriles para crear nuevos tipos de bombas. Solamente contaminando el plutonio con un contenido de plutonio-238 por encima del 80%, obtenido indirectamente del uranio-235, se dificultaría bastante la posibilidad de emplear el plutonio-239 con fines bélicos, pero tampoco la suprime totalmente (Mark *et al*, 2009).

Precursoramente el Acheson-Lilienthal Report (1946), convertido en Plan Baruch ese mismo año, tuvo en cuenta esta problemática de los avances ingenieriles para desarrollar el arma atómica cuando propuso que se creara un organismo internacional subordinado a la ONU para el desarrollo de la energética nuclear; o sea, el actual OIEA. Este inspeccionaría y controlaría toda actividad peligrosa, pues era la única manera de otorgar licencias a empresas nacionales o privadas para emprender proyectos civiles. Por «actividad peligrosa» se entendía cualquiera relacionada con los tres grandes problemas de la producción de la bomba nuclear:

- 1) aprovisionamiento de materias primas (búsqueda, extracción y limpieza de las reservas mineras de uranio y torio<sup>4</sup>);

<sup>4</sup>Dada su abundancia en la naturaleza y su aparente resistencia a la proliferación, el torio-232 ha sido promovido como un combustible superior para la generación de energía nuclear en el futuro. A partir del mismo puede obtenerse el uranio-233, que si bien es un material físil, resulta mucho más difícil de desviar para uso bélico debido a las impurezas de uranio-232. Sin embargo, todo hace indicar que el uranio-233 pudiera obtenerse directamente a partir del protactinio-233, su antecesor en la cadena de desintegración del torio-232. Bastarían 1,6 toneladas de torio metálico para producir el protactinio-233 en un reactor de investigación y, posteriormente, mediante separación química, producir los 8 kg de uranio-233 necesarios para un arma atómica (Ashley *et al*, 2012).

2) producción de plutonio-239 y uranio-235 con determinada calidad y en las cantidades necesarias (instalaciones de enriquecimiento, explotación de reactores para la obtención de plutonio, instalaciones para la separación isotópica), y

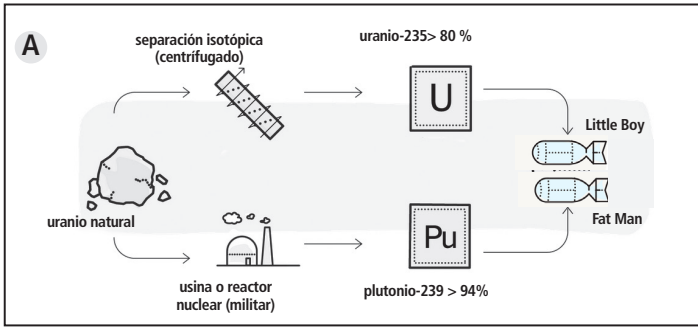
3) empleo de esos materiales para la consecución del arma atómica, incluido el desarrollo de la investigación científico-técnica con ese objetivo.

Dicho informe enfatizaba en la necesidad de mantenerse al tanto de cuáles nuevas tecnologías y/o descubrimientos podían ser aprovechados con fines bélicos, así como identificar los sectores de la cadena tecnológica más proclives a esos propósitos indeseados. Asimismo, considerando que las inspecciones serían insuficientes por sí mismas para evitar o detectar las desviaciones de cualquier proyecto nuclear pacífico hacia objetivos militares, proponía la opción de «desnaturalizar» (*denaturing*) los materiales físi­les (uranio-235 y plutonio-239) mediante la adición de isótopos con iguales propiedades químicas. Este sería el caso del «añejamiento» —por decirlo de alguna manera— del plutonio-239 para que se transformara en plutonio-240, como ya hemos visto antes. De esta manera podría intentarse que dichos materiales «no se presten fácilmente a la fabricación de explosivos atómicos, pero todavía puedan ser utilizados sin pérdida esencial de la eficacia para las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear» (Acheson, 1946: 26-27). Esta idea ya había sido sugerida en el Franck Report (1945) a iniciativa de Leó Szilárd, pero sin precisar cuál sería su aplicabilidad real.

Una vez hecho público el informe Acheson-Lilienthal, algunos de los más importantes científicos participantes en su confección —como Oppenheimer y Seaborg, entre otros protagonistas del proyecto Manhattan— se apresuraron en esclarecer que, aunque facilitaba los sistemas de control, la desnaturalización no sería suficiente para eliminar el peligro, ya que podía ser revertida de encontrarse los medios técnicos para lograrlo. Además insistían en que el límite entre lo seguro (pacífico) y lo peligroso (bélico) podía variar en dependencia de cuáles fueran las condiciones tecnológicas (Sokolski, 2001). Aunque de manera ambigua, quedaba así reconocida la complejidad de dirimir en qué momento exactamente podía desvirtuarse el empleo del combustible nuclear como fuente de energía (*source material*) para utilizarlo como material físil con carácter explosivo (*excess fissile material*). Establecer esa distinción era muy importante porque de la misma dependía el alcance y rigor del control internacional que se pretendiera instaurar para vérselas en la práctica con el dilema del doble uso. Por ejemplo: ¿debía controlarse el trasiego comercial de uranio natural, o solamente de los materiales físi­les que se obtienen del mismo: uranio-235 y plutonio-239?

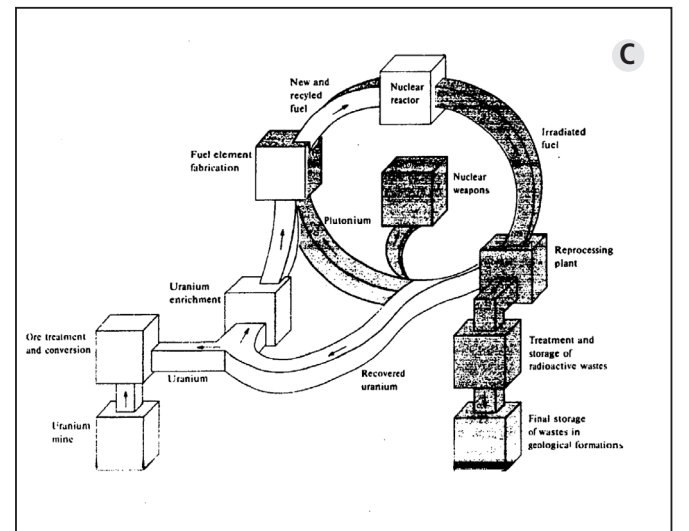
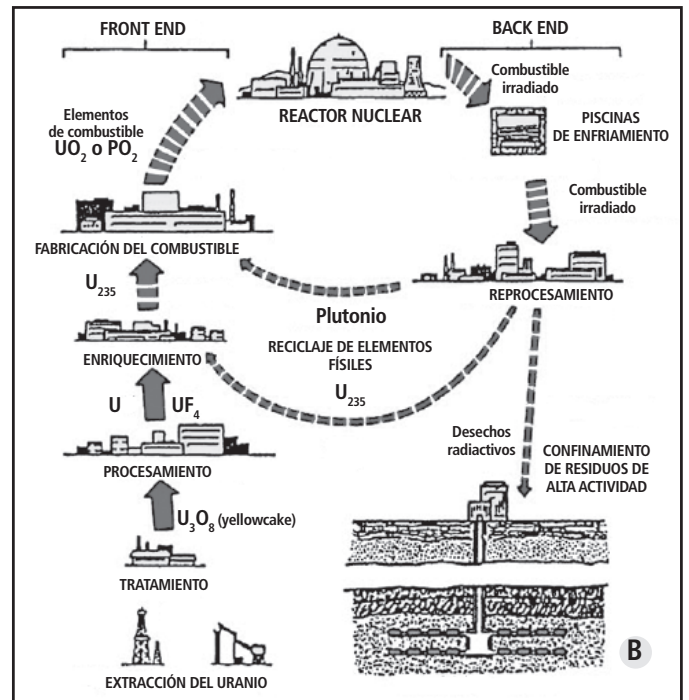
En la actualidad esta interrogante se cae por su propio peso, ya que cualquier eslabón del llamado «ciclo de combustible nuclear» es potencialmente una fuente de material radiactivo susceptible de ser empleado con fines dañosos como «bomba sucia», incluso los isótopos cobalto-60 y cesio-137 utilizados en la radioterapia para el tratamiento del cáncer (Kohler, 2012). Corroborada de manera inobjetable esta dramática realidad que las salvaguardias ampliadas y los protocolos adicionales del OIEA sobre pequeñas cantidades de material nuclear hayan tenido que extenderse a casi la totalidad del ciclo de combustible y sus elementos de apoyo, incluidas las actividades de investigación y desarrollo (ver figura 4).



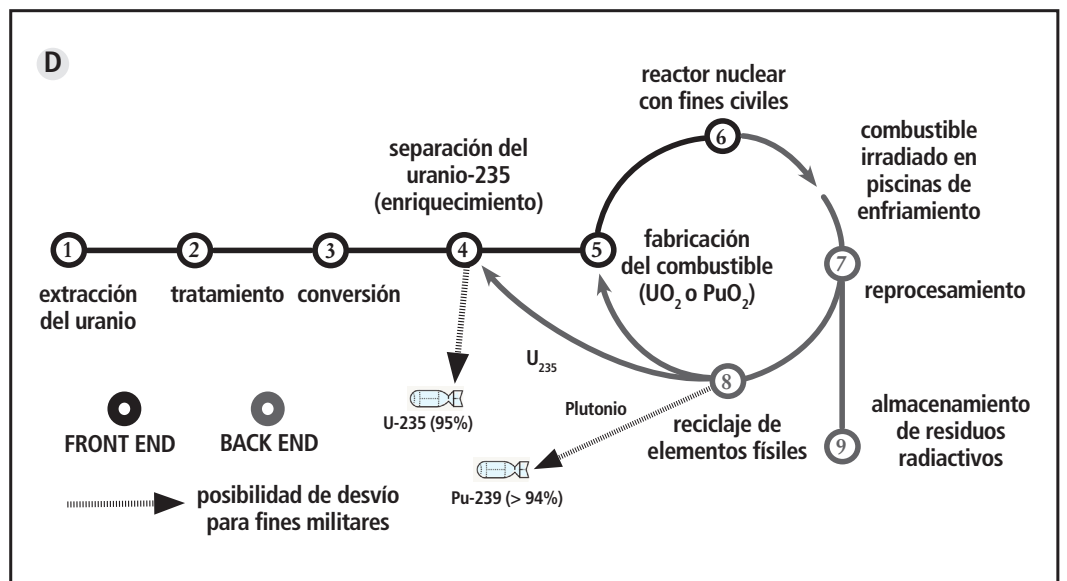


La composición isotópica del uranio natural es 99,28% de Uranio-238 y apenas 0,71% de uranio-235. Este último es el único nucleido fisil en la naturaleza, pero el uranio-238 es el material fértil para lograr artificialmente el también fisil plutonio-239. En consonancia, el proyecto Manhattan desarrolló al unisono dos opciones tecnológicas (imagen A): la separación isotópica del uranio natural para la concentración o enriquecimiento del uranio-235 (bomba *Little Boy*), y la invención de la pila o reactor nuclear para controlar la fisión en cadena del uranio-235 y, de esta manera, transformar el uranio-238 en plutonio-239 (*Fat Man*).

Ambas opciones fueron conjugadas para la generación de energía eléctrica, aprovechándose esos mismos materiales fisiles potencialmente bélicos. Este nexo intratécnico entre industria militar y energética nuclear se conservó subyacente al «ciclo de combustible», aunque no suele representarse habitualmente (imagen B). Dicho vínculo aparece en el gráfico C, pues se trata de un informe secreto estadounidense (CIA, 1984) que alerta sobre los planes de proliferación nuclear en Francia, desviando el plutonio-239 obtenido tras el reprocesamiento del combustible irradiado en los reactores rápidos reproductores de plutonio (FBR, Fast Breeder Reactor) y los reactores térmicos de uranio natural enfriados con gas (GCR, Gas Cooled Reactor).



El riesgo de proliferación del arma atómica se encuentra urdido en el ciclo de combustible nuclear con respecto al reactor energético (imagen D), tanto en su *front end* (enriquecimiento del uranio-235 para obtener el combustible) como en el *back end* (obtención de plutonio-239 mediante el reprocesamiento del combustible irradiado). Junto a los FBR y GCR, son potencialmente plutonígenos los reactores de agua pesada presurizada (PHWR, Pressurized Heavy Water Reactor).



Infografía 1: El ciclo de combustible nuclear como nexo intratécnico entre energética nuclear e industria militar (dilema de doble uso). Fuente: elaboración propia.

Lo cierto es que, al basarse en los mismos materiales físicos potencialmente usables como armas (*weapons usable material*), el dominio del átomo con fines pacíficos contribuyó paradójicamente a que se consolidara su primigenio uso militar mediante el nexo intratécnico con la energética nuclear. Este vínculo ontológico quedó subyacente al llamado ciclo de combustible, urdido tanto en el *front end* como en el *back end* con respecto al reactor nucleoenergético (ver infografía 1). Obviamente, el punto neurálgico sigue siendo el conjunto de instalaciones y operaciones para producir el enriquecimiento del uranio-235 (*front end*) y para la obtención de plutonio-239 en el monto necesario, extrayéndolo del combustible irradiado en el reactor con vistas a su reprocesamiento (*back end*). Por supuesto, este posible desvío depende de la tecnología de ensamblaje que se tenga para cada tipo de bomba atómica, según sea el material físico escogido. Ahora analizaremos cómo los primeros reactores energéticos (civiles) fueron meras adaptaciones de los reactores industriales (militares).

#### 1.5/ *De los reactores industriales (militares) a los reactores energéticos (civiles)*

Es el momento de introducir algunas nociones básicas de carácter científico-técnico sin las cuales sería imposible entender cómo el proyecto Manhattan y su homólogo soviético lograron el dominio del átomo como fuente de energía. Aunque hoy suele explicarse fácilmente en términos divulgativos, el consiguiente desarrollo de la energética nuclear exigió cotejar un enorme cúmulo de saberes en los órdenes científico, tecnológico e ingenieril. Aquí apenas se esbozarán algunas ideas y términos indispensables para apoyar el análisis «intratécnico» del riesgo nuclear y radiológico, manteniendo la perspectiva historiográfica sobre los orígenes de la tecnociencia nuclear. Comenzaremos con algunas reflexiones que pueden enmarcarse dentro de una «filosofía de la física» o «filosofía de la química», indistintamente, para percibir cómo ambas ciencias se fusionaron para dar lugar a la teoría cuántica como ventana al mundo subatómico. Nuestro objetivo inmediato es referirnos a los aspectos ingenieriles que posibilitaron el dominio controlado de la *reacción de fisión nuclear en cadena* con ayuda de esa máquina que reconocemos —por ende— como «reactor nuclear», específicamente sus prototipos destinados a la producción de electricidad.

La constatación teórico-experimental de que era posible el dominio del átomo como fuente de energía resulta de un encadenamiento de hallazgos impresionantes de la física y la química que comienza a fines del siglo XIX y alcanza su zénit en los años 30 del siglo XX. Todos esos descubrimientos se encuentran relacionados con el estatus ontológico del uranio, ya de alguna manera intuido por el gran químico ruso Dmitri Mendeleiev cuando le concede un lugar especial —junto al torio— en su tabla periódica, según la cual los elementos químicos pueden ordenarse por sus propiedades químicas con arreglo a la función periódica de un criterio físico: el «peso atómico» (Mendeleiev, 1871). Esa revolución científica comienza cuando el francés Henri Becquerel descubre en 1896 que las sales de uranio transmitían unos rayos de naturaleza desconocida («fosforescentes» o «rayos uránicos» les llamó), apenas un año después de que el alemán W. C. Röntgen hubiese

descubierto otros rayos también misteriosos, que por eso mismo denominó rayos X, porque no sabía qué eran ni qué los provocaba.

Esos dos tipos de rayos no eran iguales, aunque se parecieran, y nada tenían que ver con los rayos catódicos que, investigados desde 1869 por los físicos empeñados en explicar la electricidad, habían tenido motivos para entenderla como un fenómeno corpuscular: una emisión de partículas cargadas negativamente, los *electrones*, cuya masa era dos mil veces menor que el peso atómico del hidrógeno. Tras demostrarse la existencia de esos «corpúsculos» en 1897 por el británico Joseph John Thompson, esa triada de descubrimientos (rayos X, «radiación uránica» y electrones) decide la incursión de los físicos en el campo de la química. Tan solo un año después, Marie y Pierre Curie —físicos a la sazón— aciertan al sospechar que, además del uranio y el torio (conocidos desde 1789 y 1828, respectivamente), debían existir otros elementos químicos similares en la naturaleza, puesto que la variante del mineral uraninita conocido como *pechblenda* tenía la curiosa propiedad de irradiar con mayor intensidad por unidad de masa al extraerse el uranio de ella; o sea, se tornaba más radiactiva que el uranio mismo. Descubren entonces el polonio y el radio en 1898, por cuyos hallazgos ella recibirá el Premio Nobel de Química en 1911. Antes, en 1903, había obtenido el Nobel de Física junto a su esposo y Antoine Henri Becquerel, reconociéndose a la pareja Curie por su contribución al entendimiento de la *radiación natural*, descubierta por este último (Sánchez Ron, 1998).

Por su parte, paralelamente, Ernest Rutherford propuso estudiar las radiaciones uránicas con ayuda de métodos electrométricos. Comprobando el modo en que estas ionizaban el aire —o sea, cómo la radiactividad producía partículas eléctricas—, el gran físico neozelandés confirmó que el uranio emite dos tipos de «rayos radiactivos», los cuales identificó con las letras griegas  $\alpha$  (alfa) y  $\beta$  (beta), siendo los segundos mucho más penetrantes en la materia que los primeros. Aun más penetrantes son los rayos  $\gamma$  (gamma), descubiertos al año siguiente —en 1900— por el francés Paul Ulrich Villard y llamados así por Rutherford. Este último reparó en que los rayos gamma no eran desviados por un campo magnético, una propiedad que los diferenciaba de los rayos alfa y beta. Esto se explica porque los rayos gamma son ellos mismos ondas electromagnéticas (sin carga ni masa), al igual que los rayos X, si bien estos últimos no tienen un origen nuclear, sino que se deben al frenado de los electrones en las capas externas del átomo. En cambio, los rayos alfa y beta son radiaciones corpusculares; o sea, son partículas subatómicas con masa como el protón, el neutrón, los flujos de electrones (beta negativas) y los positrones (beta positivas), entre otras. Esa triple naturaleza ionizante ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) de la radiactividad explica su múltiple capacidad de impresionar placas radiográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, entre otros efectos, incluidos sus daños sobre el tejido biológico.

Fueron Rutherford y el químico inglés Frederick Soddy, experimentando con uranio y torio, quienes esclarecieron ese misterio al formular en 1902 su teoría de la desintegración radiactiva, según la cual dichas radiaciones ionizantes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) se desprenden del átomo original. Y lo que es crucial: como resultado de ese proceso,

el elemento primigenio se transforma en uno más ligero; así, el radio surge de la desintegración natural del uranio. Que los átomos radiactivos se transformen en otros átomos, mediante la liberación también de átomos (*iones*) y/o partículas subatómicas, no podía ser una idea que aceptara Mendeleiev, dado que socavaba los pilares del sistema periódico que había vislumbrado como prueba fehaciente de su concepción de la naturaleza, basada en la indivisibilidad del átomo y el peso atómico como indicador constante e invariable de cada elemento químico. Tiene lugar entonces la puja epistemológica entre el entendimiento de la «realidad química» (basada en la teoría atómica de John Dalton) y una nueva «realidad física subatómica» que ya no puede explicarse con la mecánica newtoniana y que solamente podrá entenderse —ya entrado el siglo XX— con ayuda de las leyes de la mecánica cuántica sobre la estructura del átomo. Uno de sus principales artífices, el físico alemán Werner Heisenberg, aseveraría al referirse a las relaciones entre la física y la química en su libro *Physics and Philosophy: the Revolution in Modern Science* (1958):

Para dar una descripción cualitativa de las leyes de la química había que formular un más amplio sistema de conceptos para la física atómica. Esto se logró finalmente con la teoría cuántica, que tiene sus raíces tanto en la química como en la física atómica. Entonces fue fácil ver que las leyes de la química no podían reducirse a la mecánica de las partículas atómicas de Newton, puesto que los elementos químicos mostraban en su comportamiento un grado de estabilidad que faltaba por completo en los sistemas mecánicos. Pero esto no se comprendió claramente hasta que no se formuló la teoría del átomo de Bohr, en 1913 (...) (Heisenberg, 1959: 80-81).

Desestimando el modelo atómico de base clásica (conocido como «*pudding con pasas*») propuesto por Thompson, descubridor del electrón, en su lugar Niels Bohr acogió resueltamente el modelo de Rutherford que identificaba el núcleo atómico, aunque sin poder explicar la estabilidad de su configuración electrónica desde el punto de vista de la electrodinámica basada en las leyes de Newton y las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo. Lo original del físico danés es que, sin renunciar por entero a esa concepción clásica, asume —mediante ciertos postulados— la *cuantización* de la energía (introducida por Max Plack en 1901) y las ideas del efecto fotoeléctrico (explicado por Einstein en 1905) para concebir un nuevo modelo del átomo, demostrando cómo los electrones pueden tener órbitas estables alrededor del núcleo y por qué cada elemento químico presenta espectros de emisión característicos (Belaev y Zelevinski, 1985).

Esta asociación entre la antigua mecánica y la nueva física cuántica termina expresándose en el «principio de complementariedad», según el cual tanto la descripción ondulatoria como la corpuscular son indispensables para comprender el mundo subatómico. Con esta aportación filosófica de Bohr al «principio de incertidumbre», formulado por Heisenberg en 1927, ambos físicos provocaron una revolución teórica de la experimentación misma, al plantear que el reto científico no debía limitarse a comprobar de manera experimental

cuáles eran las propiedades de esa nueva «realidad física subatómica», donde las partículas se mueven a velocidades cercanas a la de la luz. Y es que no bastaba con emplear aparatos y procedimientos de medición cada vez más precisos, sino que esa búsqueda en profundidad hacia el interior del átomo implicaba tener que renunciar a la exactitud absoluta. Dicho en otros términos: había que salvar el abismo entre teoría y experimento, para lo cual la mecánica cuántica configuró desde los años 20 del siglo XX un nuevo formalismo matemático (matricial) que sustentó su propio sistema de conceptos, axiomas, definiciones y teoremas (Badino y Navarro, 2013).

Ahora bien, desde una perspectiva más orientada a la aplicación práctica con una óptica ingenieril, la historia de la energía nuclear establece una conexión unívoca entre la fabricación de la bomba atómica y el descubrimiento del neutrón por James Chadwick en 1932. Solo a partir de ese momento, se suceden los demás hallazgos que permitieron el uso y control de la *reacción nuclear de fisión en cadena* en la máquina conocida como «reactor», que en un inicio se llamaba «pila» y luego «caldera», asociándola a la energética tradicional del carbón y el petróleo como combustibles (Brown, 1997; Navarro Vives, 2014). Sobre la base de este presupuesto historiográfico, nuestras explicaciones técnicas se atenderán en lo posible a las concepciones teórico-empíricas de la disciplina «Física neutrónica», cuyo objeto de estudio son los métodos ingenieriles de cálculo para el diseño de los reactores nucleares (Bartolomey *et al*, 1989; Ferrer Soria, 2015). Aunque es un tema enormemente complejo, colmado de interrelaciones, debemos encararlo —aunque sea a grandes rasgos— para adentrarnos en nuestro enfoque «intratécnico».

El primero de esos hallazgos fue la *radiactividad inducida por neutrones* gracias a los precursores experimentos de Enrico Fermi, quien aprovechó esa partícula carente de carga eléctrica como instrumento idóneo para investigar el núcleo atómico. Bombardeando el uranio natural con neutrones, en 1934 obtuvo artificialmente nuevos elementos pesados o «transuránicos», por lo que mereció el Premio Nobel en 1938. Sin embargo, fueron los químicos alemanes Otto Hann y Fritz Strassmann, con apoyo de los físicos austríacos Lise Meitner y Otto Frisch, quienes revelaron que los neutrones no solamente transformaban el uranio, sino que podían desintegrarlo. «Fisión nuclear» bautizó Frisch esa reacción, de la cual se libera una cantidad de energía proporcional a la porción de materia perdida, según la famosa ecuación de Einstein:  $E=M \times C^2$  (la energía es igual a la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío). Esto significa una liberación de energía colosal, ya que el uranio es el elemento químico con mayor «masa atómica» (y ya no «peso atómico») que se encuentra en la naturaleza.

Esta diferencia entre *peso* y *masa* es preciso recordarla porque dio lugar a la notación y lugar de los elementos químicos en la actual tabla periódica por el número atómico ( $Z$ ) o cantidad de protones en el núcleo, luego de que la «periodicidad» (*periodizhnost*) vislumbrada por Mendeleiev quedó confirmada por la teoría cuántica. En correspondencia, el número másico ( $A$ ) es la suma del número de protones ( $Z$ ) y el número de neutrones ( $N$ ), cuya diferencia para un mismo elemento químico explica la existencia de los isótopos. Por eso

cuando decimos uranio-238 y uranio-235, se presupone que ambos tienen igual cantidad de protones (92), pero distintas cantidades de neutrones: 146 y 143 respectivamente. Esto hace que difieran en su número másico (238 y 235) y, por ende, en sus propiedades físicas, aunque tengan las mismas propiedades químicas.

Reportado el hallazgo de la fisión atómica del uranio por Hann en 1939, al año siguiente el físico John R. Dunning y su grupo de la Columbia University dieron otro paso crucial al demostrar que solamente el minoritario uranio-235 parecía desintegrarse por el impacto neutrónico (y no así el uranio-238). Restaba comprobar si, al fisionarse, aquel nucleido devolvía una cantidad mayor de neutrones, con lo que sería posible sostener la *reacción de fisión nuclear en cadena*, al menos experimentalmente. Esta posibilidad ya había sido vislumbrada en 1933 por Leó Szilárd, quien solicitó una patente de «reactor neutrónico» basado en la descomposición del berilio, aunque entonces todavía se desconocía la fisión del uranio (Esposito y Pisanti, 2008). También en 1940 se consiguió sintetizar por primera vez el plutonio por los químicos Glenn T. Seaborg y Edwin McMillan. A partir de ese momento comienza el secretismo sobre el tema nuclear, incluyendo la censura de las publicaciones científicas y el control de patentes, que más tarde se materializaría en las cláusulas del «nacido secreto» (*born secret*) e «información restringida» (*restricted data*) contenidas en la Ley de Energía Atómica de 1946 (Wellerstein, 2008). Solamente tras ponerse en marcha la iniciativa del «átomo pacífico», reemplazada esa ley por el Acta de Enmiendas de la Energía Atómica en 1954, pudo conocerse de qué manera la reacción de fisión nuclear en cadena había podido ser dominada, como explicaremos enseguida.

La cuestión medular radica en que, como ya hemos visto, el escasísimo uranio-235 es el único nucleido fisible (*fissile nuclide*) en la naturaleza. Esto es así gracias a que posee una gran «sección eficaz de fisión», o lo que es decir: tiene la cualidad de desintegrarse bajo el impacto de un amplio espectro energético de la avalancha neutrónica, sobre todo si se le golpea con neutrones de baja energía (llamados «térmicos», «moderados» o «lentos»), además de que también puede fisionarse al impactar con los «neutrones rápidos»; o sea, más energizados. Y lo que es fundamental: a la par que se desintegra, el uranio-235 aporta una media de 2,47 neutrones por cada neutrón incidente que lo fisiona. No es el caso del uranio-238, que solamente puede desintegrarse al colisionar con los neutrones veloces. Pero en vez de fisionarse, este último nucleido tiende mucho más a interactuar con dichas partículas, ralentizándolas y desviándolas (*scattering*). Siendo también proclive a excitarse energéticamente por la captura de un neutrón térmico, el uranio-238 pasa a convertirse en uranio-239 y, durante un proceso de «decaimiento», se transforma en neptunio-239 y, por último, en plutonio-239. De esta manera, si bien no es una sustancia fisible como el uranio-235, la utilidad del uranio-238 radica en que constituye el «material fértil» (*fertile material*) del cual puede obtenerse el también fisible plutonio-239, ausente en la naturaleza. Otro material fisible producido artificialmente es el uranio-233, obtenido a partir del torio-232.

A dilucidar teóricamente este meollo de la interacción de los neutrones con el uranio, contribuyó también Niels Bohr, proponiendo su modelo de la desintegración del núcleo

atómico como si fuera una gota líquida (*droplet fission*), entre otros aportes suyos a la comprensión de las reacciones nucleares en los términos estadísticos de la mecánica cuántica. Sin estas contribuciones teóricas no hubiera podido esclarecerse el cúmulo de anomalías que revelaban los experimentos empíricos (Belaev y Zelevinski, 1985). De hecho, en su momento Bohr llegó a creer que la aplicación práctica de la energía nuclear era imposible. Confirmado que el uranio-235 es el único material fisible en la naturaleza, así como que del uranio-238 podía obtenerse artificialmente el también fisible plutonio-239, el primer paso del proyecto Manhattan consistió en probar que la reacción de fisión nuclear en cadena podía ser creada y controlada. Este empeño fructificó gracias a que Enrico Fermi y Leó Szilárd diseñaron la tecnología apropiada: el Chicago Pile-1 (CP-1), donde el 2 de diciembre de 1942 consiguieron la autosostenibilidad o «criticidad» (*critically*) de dicha reacción.

#### 1.5.1/ *El Chicago Pile-1: primer reactor nuclear*

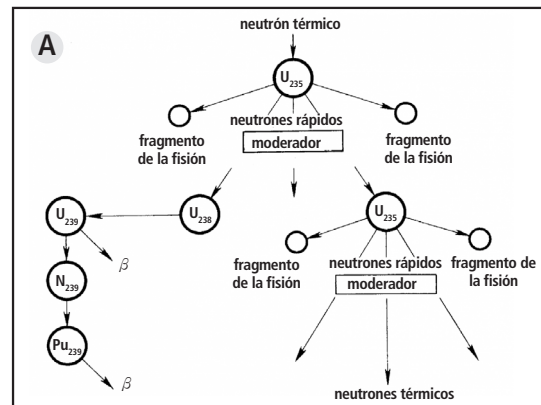
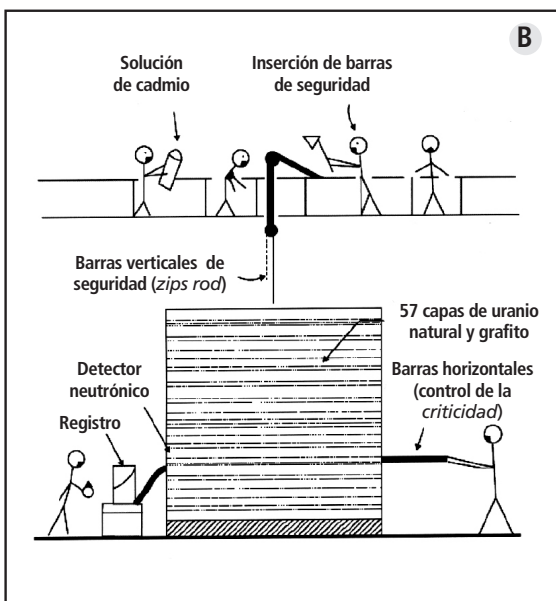
El CP-1 consistía en una estructura elipsoide de ladrillos de grafito (moderador), con unos tres metros de alto y radio, en cuyo interior los bloques de uranio natural (combustible) estaban dispuestos horizontalmente, conforme a un esquema geométrico estrictamente calculado. De ahí su nombre de *pile*, por ser un «apilamiento» de grafito que contenía los elementos de uranio natural. En calidad de refrigerante servía el propio aire circundante, pues sólo se pretendía provocar la fisión nuclear y demostrar que era controlable y sostenible, sin que su intensidad conllevara un desprendimiento de calor por encima de los 200 vatios. Midiendo la actividad neutrónica que resultaba de añadir cada bloque de uranio, Fermi vigiló el momento en que esa masa se tornó «crítica», o sea, en una cantidad suficiente para mantener la reacción en cadena a partir de la desintegración del uranio-235.

Llegado ese punto, fueron introducidas todas las barras previstas de cadmio, un gran absorbente de neutrones, incluidas las dos barras verticales de seguridad (*zips rod*) para apagar el reactor en caso de urgencia. Esta solución artesanal es el primer ejemplo del sistema de seguridad de los reactores nucleares (ver infografía 2). Una vez que así fue logrado el montaje de la «pila», su encendido se hacía extrayendo todas las barras absorbentes —o sea, actuando a la inversa—, menos una que era maniobrada cuidadosamente («barra de criticidad») para ir procurando que la reacción fuera sostenida de manera controlada, teniendo en cuenta las indicaciones del detector de neutrones. Por si acaso, un equipo de tres personas también estaba preparado para verter cadmio en forma líquida sobre el «apilamiento» (Reed, 2014).

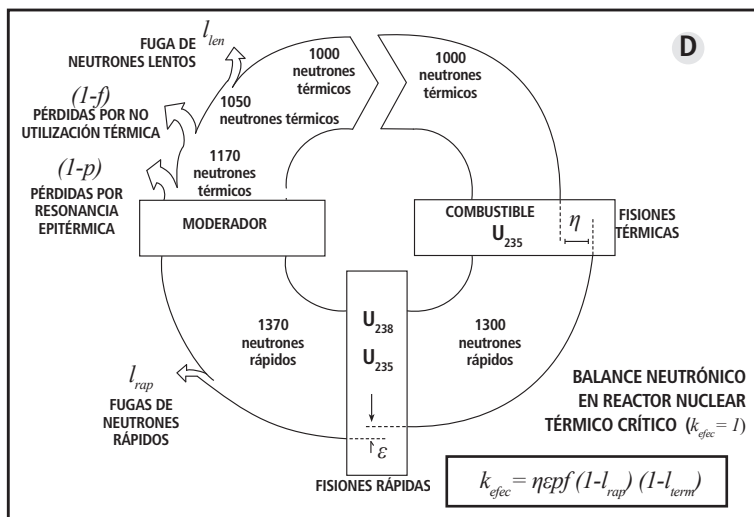
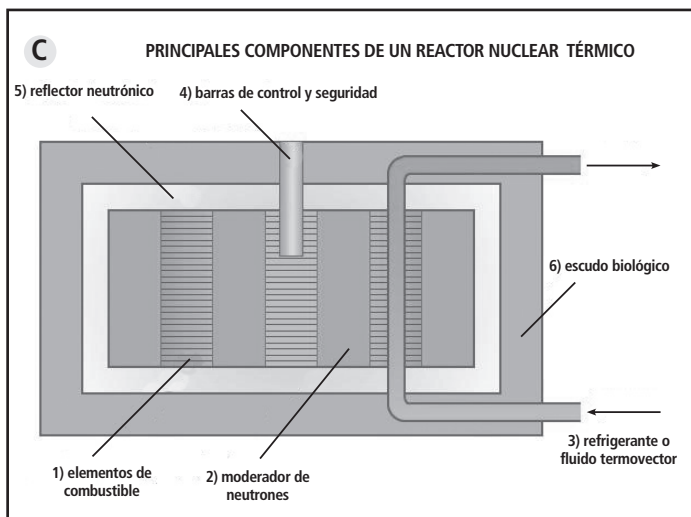
Esa primera «pila atómica» sentó los métodos de cálculo para el diseño de los reactores nucleares basados en neutrones térmicos (Bartolomey *et al*, 1989; Ferrer Soria, 2015). Estas máquinas se basan en el sostenimiento controlado de la reacción de fisión nuclear en cadena, lo cual se cumple cuando el llamado *coeficiente de multiplicación neutrónica* ( $k$ ) es igual a 1. Quiere decir: avalancha tras avalancha, de los 2-3 neutrones rápidos desprendidos durante la fisión de cada núcleo de uranio-235, al menos debe quedar siempre un neutrón que —«ralentizado» por el moderador— consigue fisiónar otro núcleo de uranio-235.

A partir del descubrimiento del neutrón por James Chadwick en 1932 se suceden los demás hallazgos que confirmaron la posibilidad de la «fisión atómica», durante la cual se libera una cantidad de energía proporcional a la porción de materia perdida, según la ecuación de Einstein:  $E=M \times c^2$  (la energía es igual a la masa por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío). Esclarecido y confirmado que el uranio-235 es el único material fisil en la naturaleza, así como que del uranio-238 puede obtenerse artificialmente el también fisil plutonio-239, el primer paso del proyecto Manhattan consistió en probar que la *reacción de fisión nuclear en cadena* podía ser creada y sostenida de manera controlada. Este empeño fructificó gracias a que Enrico Fermi y Leó Szilárd diseñaron la tecnología apropiada: el Chicago Pile-1 (CP-1), donde el 2 de diciembre de 1942 consiguieron la sostenibilidad o «criticidad» (*critically*) de dicha reacción. Esa primera «pila atómica» sentó los métodos de cálculo para el diseño de los reactores nucleares basados en neutrones térmicos.

El CP-1 era una estructura elipsoide de ladrillos de grafito (*moderador*), en cuyo interior los bloques de uranio natural (*combustible*) estaban dispuestos horizontalmente, refrigerados por el aire circulante (imagen B). El control de la *criticidad* se efectuaba con barras de cadmio horizontales y verticales. Estas últimas servían para apagar el reactor en caso de urgencia. También de ser necesario se vertería esa sustancia *absorbente de neutrones* en forma líquida.



El uranio-235 es el único isótopo que tiene la cualidad de experimentar la fisión nuclear en un amplio espectro energético de la avalancha neutrónica, sobre todo si colisiona con neutrones de baja energía, llamados «térmicos», «moderados» o «lentos» ( $0,625 \text{ eV}-10^{-3} \text{ eV}$ ), aunque también puede desintegrarse al impactar con los «neutrones rápidos», o sea, más energizados ( $10 \text{ MeV}-1 \text{ keV}$ ). No es el caso del uranio-238, que solamente puede desintegrarse al colisionar con estos últimos, o sea, con los neutrones veloces. Pero en lugar de fisionarse, este último nucleido tiende mucho más a interactuar con dichas partículas, ralentizándolas y desviándolas (*scattering*). Siendo también proclive a excitarse por la captura de un neutrón térmico, el uranio-238 pasa a convertirse en uranio-239 y, durante un proceso de «decaimiento», se transforma en neptunio-239 y, por último, en plutonio-239 (imagen A).



Los reactores nucleares térmicos (imagen C) están compuestos por: 1) combustible (uranio natural o uranio enriquecido con 3-5% de uranio-235); 2) moderador de neutrones (agua ligera, grafito o agua pesada); 3) refrigerante o fluido termovector (agua ligera, agua pesada o gas); 4) barras de control y seguridad (cadmio o boro); 5) reflector neutrónico y 6) escudo biológico. El sostenimiento controlado de la reacción de fisión nuclear en cadena se logra cuando el *coeficiente de multiplicación neutrónica efectiva* ( $k_{efec}$ ) es igual a 1. Ello depende del balance energético de los neutrones (veloces y lentos) con arreglo a la relación combustible/moderador (imagen D).

Infografía 2: Algunas nociones básicas sobre el funcionamiento de un reactor nuclear térmico. Fuente: elaboración propia.



Los demás neutrones térmicos convierten el uranio-238 en plutonio 239, mientras que los restantes son absorbidos sin contribuir a ninguno de los procesos anteriores o escapan de los límites de la instalación (ver infografía 2). Este proceso de la reacción de fisión nuclear puede descomponerse en cuatro etapas distintas, cada una de las cuales se expresa multiplicando el número de neutrones por un correspondiente factor característico, según la fórmula:

$$k = \eta \epsilon p f$$

*Primera etapa:* Bajo el impacto de un neutrón térmico ( $\sim 0,025$  eV), cada uno de los núcleos de uranio-235 del combustible se fisiona, desprendiendo como promedio ( $\eta$ ) de 2 a 3 neutrones veloces (2 MeV).

*Segunda etapa* (factor de fisión rápida  $\epsilon$ ): La mitad de esos neutrones veloces tienen la suficiente energía para fisionar núcleos del mayoritario uranio-238, además del uranio-235, trayendo el consiguiente incremento de esas partículas rápidas con respecto a la primera etapa. Este incremento neutrónico se expresa mediante el factor de fisión rápida  $\epsilon$ .

*Tercera etapa* (probabilidad de escape a la resonancia  $p$ ): Ocurre la ralentización de los neutrones rápidos al interactuar con el llamado «moderador»: grafito o agua, por ejemplo. Durante ese proceso de desaceleración, hay niveles de energía (10-100 eV) para los cuales los neutrones pueden ser absorbidos por núcleos pesados, sobre todo por el propio uranio-238, sin que ocurra ninguna desintegración. La probabilidad de escapar a esos llamados «niveles de resonancia epitérmicas» se define como el factor  $p$ , siendo la pérdida por ese motivo:  $(1-p)$

*Cuarta etapa* (factor de utilización térmica  $f$ ): Una vez han sido «termalizados», los neutrones lentos se difunden hasta que terminan siendo absorbidos. El factor  $f$  mide la probabilidad de que esa captura tenga lugar en el uranio-235 para garantizar el sostenimiento de la reacción de fisión en cadena, y no en el moderador u otros materiales absorbentes. De absorberse por estos últimos, resultan pérdidas por no utilización térmica:  $(1-f)$

Teniendo en cuenta que, dadas sus dimensiones finitas, en las instalaciones reales existe probabilidad de fugas, tanto de neutrones rápidos ( $l_{rap}$ ) como de neutrones lentos ( $l_{len}$ ), a la «fórmula de cuatro factores»  $k = \eta \epsilon p f$  se incorporan otros dos múltiplos:  $(1-l_{rap})$  y  $(1-l_{term})$ , redefiniéndose como *coeficiente de multiplicación neutrónica efectiva*:

$$k_{efec} = \eta \epsilon p f (1-l_{rap}) (1-l_{term})$$

Si  $k_{efec} < 1$ , entonces el estado del reactor es subcrítico y la reacción en cadena decae por sí misma. Cuando  $k_{efec} > 1$ , el reactor se torna supercrítico y la reacción en cadena crece exponencialmente. Los reactores nucleares con fines militares y civiles están diseñados para  $k_{efec} > 1$ , garantizándose su estado crítico ( $k_{efe} = 1$ ) mediante la introducción controlada en su «zona activa» de sustancias absorbentes de neutrones térmicos en forma líquida (boro en el agua del moderador/refrigerante, por ejemplo) o en forma sólida (cadmio en las barras de control y/o regulación). En operación normal  $k_{efec}$  difiere poco de 1, siendo más práctico orientarse por el llamado *coeficiente de reactividad*:

$$\rho = k_{efec} - 1$$

Dicho coeficiente  $\rho$  expresa el grado de desviación del estado crítico que debe ser compensado por el sistema de control y/o regulación. De esta manera se garantiza la

correspondencia entre el flujo neutrónico y la potencia del reactor nuclear a un valor de referencia determinado. Este proceso se conoce como «cinética del reactor nuclear» y de este depende que se mantenga operativamente  $\rho = 0$ , contrarrestando la influencia de múltiples factores como el consumo del combustible, la temperatura del refrigerante y el llamado «envenenamiento» con los productos de la fisión que son muy absorbentes de neutrones, como el xenón. Expuesto aquí de manera muy básica, el funcionamiento del reactor nuclear basado en neutrones térmicos constituyó la solución más expedita para domeñar la fuente de energía contenida en el interior del átomo desde el proyecto Manhattan hasta hoy día.

Un año después de comprobada la pila de Fermi, se decide que en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge fuera construida la X-10 Pile, ya prevista para operar continuamente. Además de ratificar que la fisión nuclear podía controlarse a mayor potencia, este reactor permitió generar una cantidad suficiente de plutonio-239. Una vez separado químicamente del uranio y demás productos de la fisión, ese isótopo artificial debió ser investigado antes de producirlo a mayor escala. A partir de esa experiencia fueron construidos en Hanford Site, Washington, los reactores industriales B, D y F que suministraron todo ese material físil para la prueba *Trinity* y la bomba *Fat Man* (Reed, 2014). Estos reactores industriales plutonígenos (militares) sirvieron de modelo para diseñar los primeros reactores energéticos (civiles). De ahí que todo reactor nuclear transforme parte del uranio-238 en plutonio-239, apareciendo este en el combustible irradiado. Es así que la energética nuclear nació y sigue siendo plutonígena.

### 1.5.2/ Generaciones de reactores nucleoenérgicos

Fue durante la Primera Conferencia Internacional para los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear, celebrada en Ginebra en 1955, cuando por primera vez se conoció públicamente en qué consistía un reactor nuclear y cuáles propuestas había para emplearlo con fines civiles: generación de energía eléctrica y calorífica. Dado que no existía un prototipo único descollante, pues cada país había presentado varios modelos (Foasso, 2003), el desafío planteado consistía en hallar las soluciones más convenientes entre distintas alternativas que combinaban sus principales componentes:

- 1) configuración del cuerpo del reactor: vasija o canales;
- 2) tipo de combustible fisionable: uranio enriquecido (concentración al 3-5%, superior al 0,7% que se encuentra en la naturaleza), o uranio natural, este último solo en contados casos, como el reactor de agua pesada CANDU y los reactores industriales; o sea, militares;
- 3) espectro neutrónico predominante: neutrones moderados (térmicos) o neutrones rápidos, en dependencia del propósito del reactor;
- 4) elementos o materiales que ejercen como *moderador* (ralentizador de neutrones): agua ligera, deuterio (presente en el agua pesada: D<sub>2</sub>O) o grafito (variedad alotrópica del carbono);
- 5) elementos o materiales para las *barras de regulación y control*: cadmio o boro, por sus propiedades de absorber los neutrones y, de esta manera, regular la reacción de fisión nuclear en cadena o disminuirla hasta detenerla;

6) elementos o materiales que ejercen como *refrigerante* o *fluido termovector* para enfriar los elementos de combustible: agua ligera, agua pesada, gas o metal líquido (sodio, por ejemplo).

En un principio, los primeros reactores nucleares energéticos fueron concebidos con un nivel de potencia mínimo, ateniéndose al criterio de «prueba de concepto» (*proof-of-concept*); o sea, como propuestas sujetas a ser verificadas para su posterior desarrollo a mayores potencia y escala (Goldberg y Rosner, 2011). A partir de ese momento, desde 1955 hasta mediados de los años 60, el desarrollo de la energía nuclear puede verse como la competencia a nivel internacional para obtener los mejores exponentes posibles de esa tecnología, reorientando cada país involucrado su experiencia adquirida en la consecución del arma atómica a los nuevos intereses civiles, sin descuidar los compromisos de índole militar en las circunstancias competitivas de la Guerra Fría. Esto influyó en que se analizaran soluciones tecnológicas de posible doble uso (civil y militar), aprovechando la línea primigenia de reactores de canales moderados por grafito y enfriados con agua, rediseñándolos para producir electricidad a la misma vez que plutonio. Esta línea de reactores se convirtió en la principal opción nucleenergética del programa estatal de la Unión Soviética hasta concebir el RBMK-1000, como explicaremos detalladamente en el próximo capítulo (ver subacápite 2.4).

No sucedió lo mismo con el programa estadounidense de iniciativa privada, aunque también se manejó incentivarlo de esta manera dual, sufragando los costos de generación eléctrica con la producción al unísono de material militar que compraría el gobierno. El primer y único reactor norteamericano de ese tipo (N-reactor) fue construido en Hanford en 1964 y clausurado a fines de 1986, inmediatamente después de ocurrir la catástrofe de Chernobyl (Dmitriev, 1994). Guiados por ese mismo propósito de doble uso, Inglaterra y Francia también desarrollaron reactores de grafito, pero enfriados con gas (dióxido de carbono presurizado): el Magnox británico y el francés UNGG (Uranium Naturel Graphite Gas). Ambos prototipos fueron construidos tras haber sufrido los ingleses la amarga experiencia de Windscale con un reactor también de grafito, pero enfriado con aire (ver subacápite 2.2).

El fracaso del proyecto nazi de bomba atómica se debió, en gran medida, a que los físicos alemanes renunciaron al grafito como moderador, pues no sabían que debía ser purificado para librarlo de las impurezas del boro. Al ser un gran absorbente de neutrones, el boro arruina la función moderadora del carbono (Bethe, 2000). Entonces optaron infructuosamente por el agua pesada ( $D_2O$ ), una alternativa mucho más costosa y difícil de conseguir, cuya factibilidad fue investigada por científicos del Reino Unido enviados a Canadá. De ahí que los canadienses optaran por el  $D_2O$  para sus reactores energéticos a partir de los conocimientos acumulados previamente en pilas experimentales con ese moderador neutrónico. El primer reactor de ese tipo, con una potencia eléctrica de 22 MW, fue puesto en marcha en 1962 y, a partir del mismo, fue creado el CANDU (Canada Deuterium Uranium). Este aprovecha el uranio natural sin que sea necesario enriquecerlo isotópicamente, lo que resulta favorable a ese país con grandes minas de dicho mineral (Brooks, 1993).

Igualmente como resultado de un imperativo militar: los esfuerzos para dotar a los navíos sumergibles de un sistema de propulsión atómica que los hiciera operativamente autónomos, fue concebido el reactor de agua ligera para el submarino *USS Nautilus* (SSN-571). Su programa de implementación y desarrollo estuvo al mando del almirante Hyman Rickover. Este emprendió en Shippingport, Pennsylvania, el proyecto de reactor de agua a presión (PWR, Pressurized Water Light Reactor), que comenzó a funcionar en 1957 y contó con la preferencia de la Atomic Energy Commission (U.S. AEC) y el gobierno estadounidense como el prototipo electroenergético que habría de desarrollarse a mayor escala (Okrent, 1981; Polmar y Allen, 1984). Esta decisión influyó sobremedida en que el PWR se convirtiera —a la postre— en el más difundido a nivel internacional (Cowan, 1990), con excepción de la Unión Soviética, donde predominó el RBMK-1000 por delante del *Vodo Vodyanoi Energetichesky Reactor* (VVER), que es la versión rusa del PWR (Burlakova *et al*, 2006).

Aun cuando durante los primeros años de la energética nuclear se desarrollaron otros proyectos de reactores civiles —combinando distintos diseños, moderadores, refrigerantes y contenidos del uranio enriquecido—, lo cierto es que fueron priorizadas las soluciones tecnológicas ya probadas militarmente o, al menos investigadas, durante la Segunda Guerra Mundial. Estas yacen implícitas en la primera generación de reactores energéticos (civiles) que, una vez probado su funcionamiento, fueron ampliados en potencia para su serialización. Entre finales de la década de 1960 y comienzo de los años 80, considerada «la época de oro de la energía nuclear» (De Paoli, 2011), tiene lugar el auge y comercialización de la segunda generación de reactores nucleoenergéticos. Ellos son la inmensa mayoría de los prototipos actualmente en funcionamiento a nivel mundial.

Excepto los reactores reproductores de neutrones rápidos (Fast Breeder Neutron Reactors, FBNR), todos los demás reactores nucleoenergéticos en el mundo pertenecen a la categoría de reactores térmicos (es decir, ralentizan los neutrones). Entre estos predominan el ya mencionado PWR (Pressurized Water Light Reactor) y el BWR (Boiling Water Reactor), ambos llamados de agua ligera (Light Water Reactors, LWR) porque usan este mismo elemento como moderador y refrigerante, aunque difieren en su ciclo térmico: indirecto (PWR) y directo (BWR) (ver figura 3). Le siguen los reactores con grafito como moderador: el soviético RBMK, denominado en inglés Light Water Graphite Reactor, enfriado con agua, y los británicos Magnox (del tipo Gas Cooled Reactor) y AGR (Advanced Gas-cooled Reactor), ambos enfriados con anhídrido de carbono (CO<sub>2</sub>). Por último, está el canadiense CANDU, enfriado con agua, pero moderado con agua pesada (D<sub>2</sub>O), de ahí que sea un PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor).

En la actualidad, la energética nuclear se enfrenta a la obsolescencia de su infraestructura tecnológica mayoritaria. Mientras se efectúa la clausura y desmantelamiento de la primera generación de reactores nucleoenergéticos, ya que fueron autorizados para un tiempo de explotación no mayor de 40 años, se adoptan medidas para prolongar el funcionamiento de la segunda generación por dos décadas o más; o sea, hasta 60 años de vida útil (World

Nuclear Association, 2016). Teniendo en cuenta las experiencias negativas, específicamente los accidentes de Three Mile Island y Chernobyl, desde mediados de la década de 1990 hasta 2010 se emprendió el desarrollo de una tercera generación de reactores nucleoenergéticos (Gen III), que son básicamente modelos avanzados del LWR en sus ambas modalidades: agua en ebullición y agua a presión. Son los casos del ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), diseñado por Westinghouse e instalado por primera vez en Japón en 1996, y el Mitsubishi APWR (Advanced Pressurized Water Reactor). También los rusos impulsaron varios proyectos de ese tipo a partir de sus PWR: el VVER-120 y otros de diferentes potencias.

El rediseño de esos reactores de agua ligera se identifica como Generación III+ cuando incorporan soluciones de «seguridad pasiva» (*passive safety features*) que emplean al máximo las leyes de la naturaleza (gravedad, convección natural...) para hacer funcionar los sistemas de protección y control, sin necesidad de una fuente de energía externa (eléctrica o neumática). Así se garantiza el tiempo necesario para tomar las decisiones que involucran sistemas activos, incluida la intervención humana. O sea, ambos tipos de sistemas (pasivos y activos) se complementan en estos diseños evolutivos que aspiran a conseguir la llamada «seguridad intrínseca» (*inherent safety*) (Goldberg y Rosner, 2011).

Pertenecen a la Generación III+ el reactor estadounidense AP-1000 (Advanced PWR), desarrollado por Westinghouse Toshiba hasta su quiebra en 2017, y el European Pressurized Reactor (EPR), desarrollado conjuntamente por la Areva francesa y la Siemens alemana, así como la serie rusa VVER-1200. Este último es el primer reactor de ese tipo avanzado que fue puesto en marcha, en 2016, en la electronuclear de Novovoronezh. Al cierre de 2019, en China ya funcionaban dos AP-1000 de cuatro planificados, además de preverse dos reactores EPR análogos a los que también se construyen en Finlandia, Francia y Reino Unido. Igualmente aplicando el principio de seguridad pasiva, se impulsa el diseño de pequeños reactores modulares (SMR, de Small Modular Reactor), con potencias entre 10 y 300 MW, para lugares remotos o países con redes eléctricas no muy amplias (World Nuclear Association, 2020).

Ante la expectativa de un gran renacimiento nuclear que resolvería el problema del cambio climático, en 2001 fue creado el GEN IV International Forum para diseñar una cuarta generación de reactores nucleares con arreglo a cuatro criterios: sostenibilidad, seguridad, competitividad económica y resistencia a la proliferación, incluyendo el aprovechamiento de los actínidos resultantes de la fisión atómica (Locatelli y Todeschini, 2013). Cumplir con esos objetivos al unísono sería el propósito de los nuevos reactores de neutrones rápidos reproductores (FBNR), con los que se pretende lograr el ciclo cerrado de combustible nuclear (uranio-plutonio), reciclando el combustible gastado. Esta tecnología plutonígena había sido impulsada en la década de 1980 como altamente promisorio, pero fracasó por su altísimo costo y graves problemas de explotación. En 1977, Estados Unidos renunció al Clinch River Breeder Reactor Project por su carácter proliferante (Carter, 1979). El caso más sonado fue el reactor Superphénix, el gran fiasco de la exitosa energética nuclear francesa, definitivamente clausurado en 1997 (Guidez y Prêlé, 2017).

Al renacer de las cenizas como esa ave mítica, pero ahora en forma de proyectos Gen IV, el *fast breeder reactor* se considera que puede ser incluso más seguro e igual de competitivo que los reactores térmicos de cuarta generación. Al renovar sus planes estratégicos, el programa nucleoenergético de Rusia prevé expandirse sobre la base de un escenario mixto que contempla la evolución de ambos prototipos: VVER (térmico) y BN (neutrones rápidos) (World Nuclear Association, 2020). Con esta perspectiva futurista, basándose en la experiencia histórica de explotación con el BN-600 (puesto en marcha en 1980) y el BN-800 (puesto en marcha en 2016), se acometen dos nuevos modelos como parte del ambicioso programa *Proryv* (Avance), dedicado a las tecnologías nucleoenergéticas avanzadas: el BN-1200 (enfriado con sodio) y el BREST-OD-300 (*Bystry Reactor Estestvennoi Bezopasnosti*; Reactor Rápido de Seguridad Natural).

Previsto para ser culminado en 2026, este segundo proyecto resulta un complejo experimental demostrativo —una suerte de «todo en uno»— que contiene el reactor reproductor (enfriado por plomo), la planta de fabricación de combustible mixto (nitruro de uranio y plutonio) y la planta de reprocesamiento del combustible gastado (Adamov, 2017). Su pretensión de «seguridad natural» o «riesgo cero» es enormemente polémica, máxime cuando se trata de un antiguo proyecto soviético que ha sido exhumado por el mismo instituto científico que desarrolló el reactor RBMK-1000 (ver acápite 2.4). Aunque ha recibido fuertes críticas en el seno de la propia comunidad nuclear rusa, el BREST-OD-3000 goza de total apoyo gubernamental porque se considera que proporcionará a Rusia un liderazgo mundial a largo plazo (Rosatom, 2019). Contrariamente, Francia renunció en 2019 a su proyecto ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration), desarrollado en conjunto con Japón, quien ya había desmantelado su proyecto Monju en 2016 (Takubo, 2017).

Aun cuando la proyección futurista de la energética nuclear se ensombreció tras los sucesos de Fukushima Daiichi en 2011, para nada se vislumbra un escenario de renuncia global, si bien Alemania e Italia decidieron hacerlo individualmente. Todo lo contrario: además de Rusia, se destacan los planes de China y Corea del Sur para convertirse en gigantes nucleoenergéticos, sin olvidar a las potencias emergentes como Irán. Salvo tal vez la India con su programa del torio, la evolución generacional de los reactores nucleares Gen IV sigue supeditada al ciclo de combustible que tiene como base el uranio y, por antonomasia, el plutonio. Así, aunque se sostenga lo contrario, la energética nuclear de los próximos decenios del siglo XXI seguirá siendo potencialmente proliferante. Reconociendo que esto obedece al dilema ontológico del doble uso, sucede que de este se deriva otro dilema morfogenético también sin solución previsible: la relación entre seguridad y ubicación (*siting and safety*) de las centrales atómicas, cualesquiera que sea su tipo, sobre la superficie terrestre.

CAPÍTULO 2:

EL DILEMA «UBICACIÓN Y SEGURIDAD» (*SITING AND SAFETY*).  
¿PUEDEN EXPLOTAR LOS REACTORES NUCLEARES?

¿Puede explotar un reactor nuclear como una bomba? y ¿cuáles son las consecuencias de la radiactividad para la salud humana?, son dos preguntas que, desde su estreno bélico, acompañaron a la energía nuclear en el imaginario colectivo (Weart, 1988). Correspondió a Eduard Teller, uno de los protagonistas del proyecto Manhattan y padre de la Bomba H estadounidense, responderlas en 1953 por primera vez a instancias del Joint Committee on Atomic Energy (JCAE) en el Congreso. Aunque descartaba prácticamente que pudiera ocurrir tal explosión, o sería muy limitada, el científico alertó que el mayor peligro provendría de la liberación de venenos radiactivos a la atmósfera en caso de accidente. Por tanto, era imprescindible establecer un compromiso entre la elección del lugar de emplazamiento (*siting*) y los criterios de seguridad (*safety*) para cada tipo de reactor, en lo que se considera la primera expresión de la «filosofía de la seguridad nuclear» (Okrent, 1981).

Teller había presidido desde su fundación en 1947 el Reactor Safeguards Committee (RSC), punto de partida de la seguridad nuclear, mientras que en 1951 había sido creado el Industrial Committee on Reactor Location Problems, bajo la autoridad del ingeniero C. Rogers McCullough, de la sociedad Mosanto. En vísperas de aprobarse la Ley de Energía Atómica de 1954, que derogaba la anterior de 1946, la Atomic Energy Commission (U.S. AEC) decidió agrupar a sus consultores en materia de seguridad nuclear, fusionando esos dos comités en uno solo: el Comité Asesor sobre Salvaguardias de Reactores (Advisory Committee on Reactor Safeguards, ACRS). El hecho de que fuera elegido McCullough como su primer presidente —y no Teller— reflejaba la consolidación de la influencia empresarial en el seno de la U.S. AEC, en detrimento de los físicos de alto vuelo, más prudentes a la hora de conceder su anuencia a la construcción de reactores nucleares (Balogh, 1991).

En lo adelante, la problemática *siting and safety* provocaría largas y enconadas controversias en el seno de la propia U.S. AEC, reflejando las tensiones inherentes al imperativo de introducir —cuanto antes— el uso civil del átomo con fines comerciales, y la preocupación por los peligros que entrañaba el reactor nuclear como tal (Balogh, 1991; Walker, 2000a). Estos fueron reconocidos y expuestos por Teller en nombre de la ACRS en la Primera Conferencia Internacional para los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear, celebrada en Ginebra en 1955: «La seguridad absoluta es imposible, y lo que se entiende por seguridad del reactor es el hecho de reducir los peligros a un riesgo calculado y aceptable que sea el menor posible» (McCullough *et al*, 1955: 93). Por ende, el criterio de emplazamiento (*site criteria*) tendría que decidirse entre establecer regulaciones de tipo cuantitativo sobre la distancia de exclusión alrededor de un reactor nuclear (por ejemplo, teniendo en cuenta su potencia y la densidad poblacional), o añadir elementos de seguridad adicionales a ese tipo de instalaciones, como es construir barreras de contención capaces de evitar la expulsión de productos radiactivos a la atmósfera (Okrent, 1981).

Por un lado, se consideraba beneficioso colocar las centrales nucleares cerca de los núcleos poblacionales para reducir las pérdidas de transmisión y abaratar los costos de transportar la electricidad a grandes distancias desde el generador al consumidor. Por otro lado, era prudente alejar esas instalaciones de los centros urbanos no solamente para evitar la exposición directa a la radiación, sino también con vistas a facilitar la planificación de emergencias; en particular, las evacuaciones tras producirse un accidente. Teniendo en cuenta la potencia del reactor nuclear (P) en kilovatios térmicos, mediante la siguiente fórmula empírica, se calcula el radio (R) de un círculo alrededor de la central atómica, cuya zona poblada debía ser evacuada en caso de liberación radiactiva:

$$R = 0,01 \sqrt{P}$$

Para un reactor de 1000 megavatios eléctricos (MWe), que equivalen a 3000 MW térmicos (MWt), esa distancia es alrededor de 30 kilómetros (Okrent, 1981). Aunque ese rango se mantiene hasta hoy día, tras las experiencias de Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima Daiichi se reconoce que los cálculos del tamaño de la zona y distancia de emergencia son muy inciertos y su finalidad es servir de primera aproximación, ya que todo depende de las características concretas del emplazamiento de las centrales nucleares, las condiciones locales y la evolución de los escenarios del accidente. Para esos cálculos deben saberse las características de las emisiones radiactivas, los cambios meteorológicos y el comportamiento del público (OIEA, 2013b). No obstante haberse elaborado sofisticados modelos computacionales de dispersión atmosférica y deposición de elementos radiactivos, existen serias dudas de que esas simulaciones logren reproducir un escenario de accidente real (Ionescu, 2019).

Chernobyl significó la primera constancia pública de que, aunque no fuera como una bomba atómica, los reactores electronucleares pueden explotar y sus productos radiactivos contaminar extensas regiones de una manera difícilmente pronosticable. Sin embargo, no fue el primer gran acontecimiento de contaminación radiactiva después de la Segunda Guerra Mundial, ya que fue precedido por dos importantes percances ocurridos en 1957: la explosión de Kyshtym, guardada en secreto por las autoridades soviéticas hasta 1989 (Tolstikov, 2007), y el accidente de Windscale (Cumbria, Reino Unido), cuando se incendió uno de los reactores de grafito diseñados aceleradamente por los ingleses para la producción de plutonio con vistas a tener su propia bomba atómica. Este último percance fue aireado a la opinión pública, pero minimizando sus consecuencias, al punto que todavía suscita polémicas (Arnold, 1992).

Aunque ocurrieron en instalaciones de índole militar, ambos accidentes son señalados entre los principales referentes para considerar que, a partir de 1957, comienza a reconocerse la seguridad nuclear como una rama independiente, cuyo objeto de análisis son las situaciones que podrían poner a prueba el confinamiento de los productos radiactivos de la fisión atómica (Bourgeois *et al*, 1996). En lo adelante se trataría de buscar soluciones técnicas a los peligros que se iban revelando en la práctica, de modo que no se repitieran los accidentes ya conocidos por los expertos, aunque escondidos de la opinión pública, y se identificara la mayor cantidad de averías posibles, con tal de prevenirlas o mitigar sus daños. También comienza a tenerse en cuenta que la elección de un sitio adecuado para una



central nuclear requiere la consideración y equilibrio de factores naturales que repercuten inexorablemente en la seguridad de dichas instalaciones. Estos factores deben ser tenidos en cuenta en dependencia de cuál sea el diseño del reactor o, a la inversa, este será diseñado para responder a las características del emplazamiento previsto, tales como la disponibilidad de agua de refrigeración, el área de tierra requerida y las condiciones geológicas capaces de sostener el peso de las instalaciones. Hay factores naturales que son genéricos para cualquier tipo de reactor como son el clima local y el potencial de actividad sísmica. Fukushima Daiichi demostró dramáticamente como la subestimación de este último factor por los expertos nucleares japoneses condujo a la catástrofe (ver subcapítulo 2.5).

Ateniéndonos a la propuesta de periodización de la seguridad nuclear por expertos franceses (Bourgeois *et al*, 1996), aprovechamos su perspectiva intratécnica para fundamentar historiográficamente que los grandes accidentes históricos, incluido Fukushima Daiichi, han repercutido en el progresivo desfase entre diseño, construcción y explotación de las centrales nucleares. Para ello delimitamos cuatro períodos cronológicos que corresponden a dichos accidentes históricos y, consecuentemente, explican la existencia de cuatro épocas de la energética nuclear hasta el momento (De Paoli, 2011), además de cuatro generaciones de reactores nucleoeenergéticos (Goldberg y Rosner, 2011). He aquí, a continuación, esta propuesta de cronología (ver infografía 3).

*Desde los accidentes de Windscale y Kyshtym (1957)  
hasta el accidente de Three Mile Island (1979)*

Aunque durante la década anterior a este período, fueron planteados los primeros conceptos de seguridad nuclear, estos no quedaron establecidos hasta que se definió como su fundamento el principio de defensa en profundidad (Defence in Depth, DiD). En su concepción se aplica inicialmente un enfoque determinista del diseño de los reactores mediante categorías tales como «accidente base de diseño» (Design Basis Accident, DBA) y «máximo accidente creíble» (Maximum Credible Accident, MCA). Entre los hitos que responden a esa perspectiva determinista de la seguridad nuclear, son fundamentales:

— El informe WASH-740 («informe Brookhaven»), que en 1957 valoró por primera vez teóricamente la ocurrencia de un accidente severo con fusión del núcleo y sus consecuencias radiológicas (U.S. AEC, 1957). Fue decisivo en la aprobación de la Ley Price-Anderson sobre la responsabilidad civil de la explotación en caso de accidente nuclear (Patterson, 1976).

— La puesta en vigor de la primera regulación para la ubicación de las plantas nucleares (*reactor site criteria*) en 1962, teniendo en cuenta las consideraciones geológicas, sísmicas y de ingeniería contra terremotos (U.S. AEC, 1962).

— El informe Ergen, en 1967, sobre la posibilidad real de daños en la contención radiactiva. En principio, este estudio ofrecía garantías sobre la escasa probabilidad de una fusión nuclear y la confiabilidad del sistema emergente de enfriamiento del núcleo (Emergency Core Cooling System, ECCS). Sin embargo, si el ECCS fallaba y se producía un accidente de pérdida de refrigerante (Loss-of-Coolant Accident, LOCA), no descartaba el colapso de la

contención radiactiva (Ergen, 1967). Este hallazgo influyó de manera decisiva en la actividad reguladora de la energética nuclear en los Estados Unidos (Walker, 2000a).

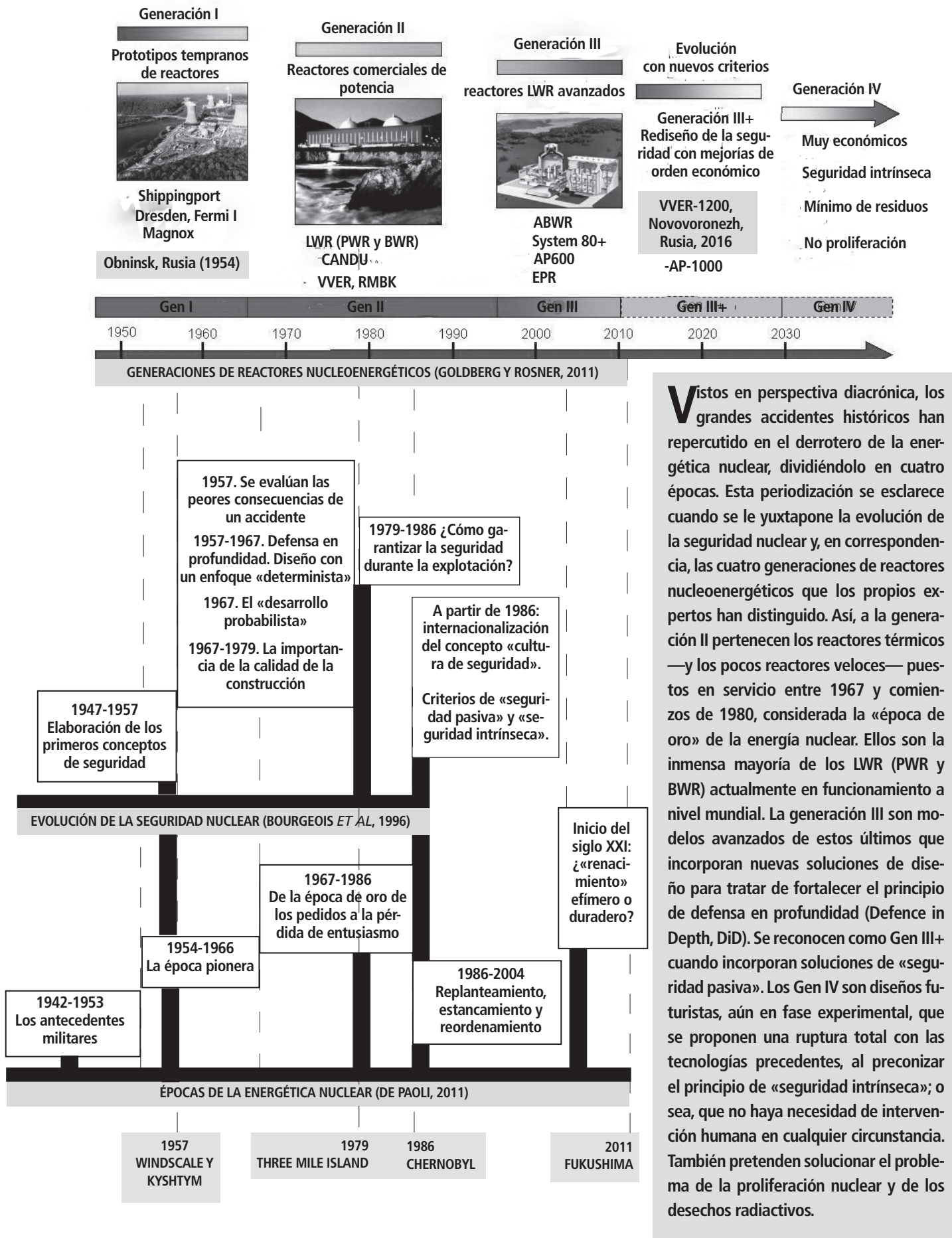
Estos resultados impulsaron la necesidad de complementar el análisis determinista de la seguridad nuclear con los métodos de análisis probabilista, cuya primera propuesta fue el trabajo del experto británico F. Farmer, con sus curvas de probabilidad para cuantificar el riesgo de exposición del público a liberaciones de yodo-131 durante un accidente grave del reactor (Farmer, 1967). Este paso de la evaluación determinista a la evaluación probabilista trajo aparejado un ajuste conceptual: la distinción del *riesgo*, diferenciándola de *seguridad*, que tuvo su máxima expresión en la introducción de la noción «riesgo aceptable» (*acceptable risk*) por el ingeniero Chauncey Starr, teniendo en cuenta la percepción del público (Starr, 1969). Para ese momento, a pesar de las críticas de los movimientos ecologistas al amparo de la Ley Nacional de Política Ambiental de 1969, ya se vivía la llamada «época de oro de la energía nuclear», cuando fue construida la inmensa mayoría de las centrales electronucleares que funcionan hasta hoy en el mundo (De Paoli, 2011). Esto exigió que se prestara mayor interés a la seguridad de esas instalaciones no solamente en su fase de diseño, sino también en la fase de construcción, implementándose las garantías de calidad (Bourgeois *et al*, 1996).

A raíz de la crisis del petróleo de 1973, mientras Francia apostó resueltamente por la opción nuclear, desde esa misma fecha arrecian las fuertes críticas del movimiento antinuclear estadounidense al otorgamiento desmedido de licencias para construir centrales atómicas, cuyos reactores habían acrecentado sus potencias de 100-200 MWe a 1000 MWe con tal de conseguir economías a escala. Con excesivo apresuramiento se había considerado que los reactores eran una tecnología madura, fácilmente modificable, pero se había subestimado la complejidad organizativa de la construcción de una central atómica. Tanto los partidarios como los críticos de la energética nuclear convenían en que los deberes promocionales y regulatorios están entremezclados y deberían asignarse a diferentes organismos. Por decisión del Congreso, la U. S. AEC es desintegrada y, en virtud de la Ley de Reorganización Energética de 1974, sus funciones reguladoras son transferidas a la nueva Comisión Regulatoria Nuclear (Nuclear Regulatory Commission, NRC)<sup>5</sup>.

Durante este momento crítico de la regulación de la energética nuclear estadounidense fue realizado el estudio que se considera precursor de la Evaluación Probabilista de Riesgo (Probabilistic Risk Assessment, PRA): el llamado informe WASH-1400, también conocido como informe Rasmussen, cuya última versión fue publicada en 1975 por la recién creada NRC (Rasmussen, 1975). A este estudio dedicaremos especial atención porque plantea por primera vez la relación entre el riesgo y la incertidumbre desde la perspectiva de los expertos nucleares. El accidente de TMI en 1979 culmina esta etapa, constituyendo la primera «sorpresa tecnológica» que puso en crisis los presupuestos deterministas de la seguridad nuclear.

---

<sup>5</sup>Las funciones promocionales fueron transferidas a la Administración de Investigación y Desarrollo Energéticos (Energy Research and Development Administration, ERDA). Además de la promoción de la energía nuclear, la ERDA se ocupó de la supervisión de las armas nucleares y pasó posteriormente al Departamento de Energía de los Estados Unidos.



Vistos en perspectiva diacrónica, los grandes accidentes históricos han repercutido en el derrotero de la energética nuclear, dividiéndolo en cuatro épocas. Esta periodización se esclarece cuando se le juxtapone la evolución de la seguridad nuclear y, en correspondencia, las cuatro generaciones de reactores nucleoenergéticos que los propios expertos han distinguido. Así, a la generación II pertenecen los reactores térmicos —y los pocos reactores veloces— puestos en servicio entre 1967 y comienzos de 1980, considerada la «época de oro» de la energía nuclear. Ellos son la inmensa mayoría de los LWR (PWR y BWR) actualmente en funcionamiento a nivel mundial. La generación III son modelos avanzados de estos últimos que incorporan nuevas soluciones de diseño para tratar de fortalecer el principio de defensa en profundidad (Defence in Depth, DiD). Se reconocen como Gen III+ cuando incorporan soluciones de «seguridad pasiva». Los Gen IV son diseños futuristas, aún en fase experimental, que se proponen una ruptura total con las tecnologías precedentes, al preconizar el principio de «seguridad intrínseca»; o sea, que no haya necesidad de intervención humana en cualquier circunstancia. También pretenden solucionar el problema de la proliferación nuclear y de los desechos radiactivos.

Infografía 3: Relación cronológica de los principales accidentes históricos con las épocas de la energética nuclear (De Paoli, 2011), la evolución de la seguridad nuclear (Bourgeois et al, 1996) y las generaciones de reactores nucleoenergéticos (Goldberg y Rosner, 2011). Fuente: elaboración propia.

### *Tras el accidente de Three Mile Island (1979) hasta la catástrofe de Chernobyl (1986)*

Los expertos occidentales sacaron lecciones de TMI para revisar la seguridad de sus instalaciones, reconociendo la posibilidad de accidentes superiores a los previstos por diseño (Beyond Design Basis Accidents, BDBA). Además de la importancia del «error humano», se corroboraron riesgos tecnológicos como el llamado «fallo de causa común» (*common-cause failure*), tardíamente identificado en el campo nuclear, pero que ya se conocía por la ingeniería eléctrica desde 1967 (Hagen, 1980). Esta sorpresa tecnológica provocó el auge de la evaluación del riesgo con ayuda de los análisis probabilistas que, inspirados en el informe Rasmussen, combinan los llamados «árboles de sucesos» (*event tree*) y «árboles de fallos» (*fault tree*) para mensurar los escenarios de accidente grave con fusión del núcleo, incluida la concatenación de fallos técnicos y errores humanos.

A partir de ese momento, comienza a valorarse el tránsito desde el enfoque determinista a un enfoque probabilista de la seguridad nuclear para fortalecer la defensa en profundidad (DiD). También se establecen las dos principales teorías sobre accidentes desde la perspectiva de los científicos sociales: Teoría de los Accidentes Normales (Normal Accident Theory, NAT) y Teoría de las Organizaciones de Alta Fiabilidad (High Reliability Organizations Theory, HROT). Mientras la primera se centra en la complejidad estructural de los sistemas técnicos (Perrow, 1982, 1984), la segunda enfatiza en la complejidad organizacional y procedimental (La Porte, 1982; Weick y Sutcliffe, 2001). Paralelamente se inician los estudios de la fiabilidad humana en sistemas complejos (Human Reliability Analysis, HRC) con un enfoque interdisciplinar desde las ciencias cognitivas hacia la ingeniería (Rasmussen, 1986) y hacia la taxonomía del «error humano» (Reason, 1990a).

La puesta en marcha de un plan de acción post-TMI, como el aplicado por los expertos franceses (Bourgeois *et al*, 1996), enfatizó en la necesidad de nuevos procedimientos para prevenir la fusión del núcleo del reactor en caso de pérdida total de los sistemas de seguridad redundantes; por ejemplo, al ocurrir un apagón eléctrico total (*blackout*). Esto exigió tener en cuenta la eventualidad de accidentes que sí provocarían la destrucción del núcleo, la pérdida parcial o total del confinamiento radiactivo y, por ende, distintos niveles de descargas nocivas al medio ambiente. Aunque se dio por sentado que, durante el accidente de TMI, había quedado demostrada la eficacia de la defensa en profundidad, no obstante surgió la preocupación por el comportamiento del recinto de contención radiactiva en los reactores LWR, ya que había existido el riesgo de explosión del hidrógeno. Por este motivo arreciaron las controversias públicas en torno a la ubicación de las centrales electronucleares y, en respuesta, se tomaron medidas para fortalecer los planes de emergencia.

### *Desde la catástrofe de Chernobyl (1986) hasta la catástrofe de Fukushima Daiichi (2011)*

Chernobyl es la primera explosión de un reactor electronuclear en la historia con gran liberación de productos radiactivos que alcanzan a diversos países. Aunque la dimensión de este desastre suele explicarse porque el RBMK-1000 carece de un adecuado recinto de contención radiactiva, las causas de su explosión fueron también una sorpresa tecnológica

para los propios expertos soviéticos. En un inicio, bajo presión oficial, ellos manejaron la hipótesis del error humano, pero más tarde fueron reconocidos como factores decisivos el diseño del reactor y su deficiente sistema de seguridad. Estas variaciones del juicio experto quedaron reflejadas en los sucesivos informes del Grupo de Consulta Internacional para la Seguridad Nuclear (International Nuclear Safety Advisory Group, INSAG), creado para aconsejar directamente al director del OIEA. Su primer informe (INSAG-1) fue emitido en 1986 a raíz del desastre y, según su lógica, las causas de Chernobyl estaban relacionadas con la escasa formación del personal de explotación (falta de conocimiento de la física de reactores y su funcionamiento), así como con la relajación en el cumplimiento de las normas técnicas de seguridad nuclear, cuyas violaciones eran incluso permitidas.

Fue entonces cuando comenzó a preconizarse por el OIEA el concepto de «cultura de la seguridad», ya mencionado en el INSAG-1, pero que no sería definido hasta cuatro años más tarde en el INSAG-4 (1991). La divulgación de ese constructo filosófico práctico, sujeto en lo adelante a múltiples y ambiguas interpretaciones, impulsó los esfuerzos para una internacionalización de los criterios de seguridad nuclear. Paralelamente, las causas de Chernobyl eran revisadas con ayuda de nueva información suministrada por los expertos rusos y procesadas por expertos japoneses, estadounidenses y otros. Así, en 1993 fue emitido el informe INSAG-7 que relativiza el error humano, concediéndole mucho mayor peso a las severas deficiencias de seguridad que tenía el propio diseño del RBMK-1000 desde su fase de proyecto. Esto lo veremos cuando abordemos en profundidad las características tecnológicas de ese tipo de reactor, dictadas por su función primigenia para el doble uso (civil y militar).

Cualesquiera hayan sido las causas tecnológicas de Chernobyl —aún sujetas a debate científico, como analizaremos también—, su principal impacto sobre la filosofía de la seguridad nuclear consistió en que la accidentabilidad de los reactores de segunda generación debía asumirse en términos reales como deficiencias de su diseño. Y si bien esto no llevó de inmediato a cambiar el planteamiento de seguridad de los reactores LWR (PWR y BWR), en tanto difieren sustancialmente del aciago RBMK-1000, las preocupaciones que sobrevinieron en el seno de la opinión pública, poniendo en entredicho el futuro de la energética nuclear a mediano y largo plazos, condujeron a plantearse nuevos proyectos de instalaciones con una mejoría de su defensa en profundidad.

Con ese propósito, aprovechando la experiencia operativa de los reactores de agua ligera LWR (a presión y en ebullición), desde 1990 comienzan los proyectos para perfeccionarlos y evolucionar hacia una tercera generación cuyos prototipos más avanzados (Gen III+) combinan los principios de seguridad activa y seguridad pasiva. Este criterio de «seguridad pasiva» fue sugerido por primera vez en el INSAG-3 (1989), en el sentido de que el diseño de esas instalaciones debía paliar el error humano y no aumentarlo. En virtud de ello, como una meta superior de seguridad, las características físicas de esos nuevos prototipos debían elegirse de tal manera que cualquier situación peligrosa —como la tendencia hacia la supercriticalidad por inestabilidad neutrónica— fuera autocompensada rápidamente por el propio reactor nuclear, sin necesidad

inmediata de intervención humana y de los sistemas activos de protección; o sea, aquellos que dependen de una fuente de energía externa.

En esa dirección se ha llegado a promulgar el principio de «seguridad intrínseca» (*inherent safety*), planteándose que los reactores nucleares de IV Generación pueden ser enteramente pasivos; o sea, que puede prescindirse de la intervención humana en cualquier circunstancia. Este más reciente filosofema de la seguridad nuclear es muy cuestionable cuando pretende que pueden lograrse máquinas absolutamente seguras o que presentan riesgos nulos. Por ese motivo, ha sido tachado entre los propios expertos como una «verdadera deshonestidad intelectual» (Bourgeois *et al*, 1996: 255), al no tener en cuenta que los accidentes también son una consecuencia de lo que en cierto momento puede considerarse imprevisible o impredecible. En principio, los sucesos de Fukushima Daiichi corroboraron esta máxima cuando ya se vaticinaba un gran renacimiento de la energética nuclear en el siglo XXI.

#### *Desde la catástrofe de Fukushima Daiichi en adelante*

La cuestión medular que inmediatamente se planteó a los expertos nucleares es si los sucesos en la central atómica de Fukushima Daiichi pudieron haber sido evitados, a pesar del enorme impacto que recibió del tsunami gigante producido por el gran terremoto. Aunque comenzó a manejarse como un suceso impredecible (*sotegai*, en japonés), un análisis más profundo de las causas del desastre terminó reconociendo que, independientemente de haberse producido un gran apagón (*blackout*) a causa del terremoto, el diseño originario de esa instalación no preveía márgenes de seguridad suficientes para sucesos de inundación extrema como los tsunamis: «La vulnerabilidad de la central nuclear de Fukushima Daiichi a los peligros externos no se había revaluado de manera sistemática y completa en sus años de existencia» (OIEA, 2015: 4).

Como resultado de la ausencia total de suministro eléctrico, ya que la inundación arrasó con las fuentes adicionales de corriente alterna y de corriente continua, los reactores perdieron la refrigeración de sus núcleos y quedó diezmada la defensa en profundidad en sus cuatro niveles, colapsando las barreras de contención radiactiva. Sucedió lo que tanto se había temido durante el accidente de Three Mile Island: la explosión del hidrógeno y consiguiente liberación de sustancias radiactivas al medio ambiente. La repetición del «fallo de causa común» (*common-cause failure*), reconocido en 1979, se manifestó ahora como sorpresa tecnológica que escapó a las evaluaciones probabilistas de la seguridad, pues nunca incluyeron la posibilidad de una inundación interna de las instalaciones. La progresión de sucesos graves superó con creces el peor de los escenarios previstos por los métodos deterministas, que nunca se habían planteado como accidente base de diseño la ausencia de refrigeración en varias unidades al unísono y en las piscinas de combustible gastado, menos aun teniendo como escenario un *blackout* a nivel nacional después de una catástrofe natural.

Epítome o punto crucial del dilema *siting and safety*, Fukushima Daiichi ha provocado otro cambio en la filosofía práctica de la seguridad nuclear a partir de la reconsideración de los accidentes superiores a la base de diseño (Beyond Design Basis Accidents, BDBA).

Teniendo en cuenta que estos pueden ocurrir a pesar de las acciones de prevención, se impuso la necesidad de revisión de los programas de gestión de los accidentes severos (Severe Accident Management, SMA) en todas las centrales nucleares. Aunque comenzó a hacerse evidente desde 2011, inmediatamente después del accidente, este cambio de filosofía se consumó luego de que —en febrero de 2015— fue adoptada la Declaración de Viena sobre Seguridad Nuclear en la conferencia diplomática dedicada a la Convención de Seguridad Nuclear (CSN). Aprobada en 1994, la CSN fue el primer instrumento jurídico de carácter internacional que abordó explícitamente la cuestión de la seguridad de las centrales nucleares (Jankowitsch y Flakus, 1994). El principal objetivo de esa declaración de 2015 es «prevenir los accidentes con consecuencias radiológicas y mitigar estas en caso de que se produzcan» (IAEA, 2015b: 2). En consonancia, nuevos requisitos internacionales fueron aprobados por el OIEA, quedando plasmados en un grupo de normas de seguridad dedicadas íntegramente a la preparación y respuesta para casos de emergencia (IAEA, 2015c).

Esta nueva orientación de la seguridad nuclear hacia los planes de emergencia implica una revisión de su fundamento mismo: el principio de la defensa en profundidad (DiD). Proveniente del entorno militar, este principio entraña el profundo vínculo ontológico entre el dilema de doble uso y el dilema *siting and safety* que acompaña a la energética nuclear desde sus inicios. Sacando a relucir la falibilidad de la DiD, cada accidente histórico ha revelado sus insuficiencias y/o vulnerabilidad intrínseca. Este sería el «talón de Aquiles» de los reactores de segunda generación, aunque los ingenieros nucleares son reacios a reconocerlo.

### 2.1/ *Kyshtym y Windscale: los primeros grandes accidentes nucleares*

Antes de reseñar los tres accidentes severos históricos de la energética nuclear (Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima Daiichi), debemos referirnos a dos grandes accidentes con secuelas radiactivas que les antecedieron, ambos vinculados a la industria militar. El primero de ellos fue el desastre de Kyshtym, ocurrida el 29 de septiembre de 1957 a pocos kilómetros de esa ciudad, en el poblado secreto de Cheliabinsk-40 (hoy Oziark), en los Urales del Sur, antigua Unión Soviética. Tuvo lugar en el complejo militar industrial 817 (*Mayak*), donde desde 1948 se habían puesto en marcha el reactor industrial A-1 (también llamado *Annushka*, Anita), el primero de los destinados en Rusia a la producción de plutonio para construir la bomba atómica (Kruglov, 1995). Su separación del uranio se hacía en una planta radioquímica aladaña, liberándose grandes cantidades de desechos radiactivos al medio ambiente (río y lago), mientras que los residuos más nocivos eran almacenados en cilindros de acero inoxidable de 300 m<sup>3</sup>, cubiertos por una losa de más de un metro de hormigón y sepultados en la tierra. El estallido de uno de esos depósitos subterráneos, con unos 80 m<sup>3</sup> de desechos radiactivos que contenían altos niveles de nitrato de sodio y acetato de sodio, ambos altamente explosivos, se produjo porque dejó de funcionar su sistema de enfriamiento, dañado por la corrosión y sin instrumentos de control adecuados (Tolstikov, 2007).

Ocurrida en víspera de efectuarse por los soviéticos el lanzamiento del primer satélite artificial al espacio (4 de octubre) y la celebración del 40 aniversario de la Revolución

de Octubre, la catástrofe de Kyshtym fue mantenida en el más absoluto secreto por las autoridades gubernamentales. Aunque vagos rumores sobre la magnitud de lo acontecido circularon a lo largo de los años, sus verdaderas causas y consecuencias no fueron reveladas oficialmente hasta 1989, tres años después de los sucesos de Chernobyl (IAEA, 1989). Desde entonces se conoce que, como resultado de esa explosión, la contaminación radiactiva abarcó una superficie de casi 20 000 km<sup>2</sup> en una franja de unos 300 km de largo y solamente de 5 a 10 km de ancho. Esta forma estrecha y alargada estuvo condicionada por la dispersión de la nube radiactiva a favor de la dirección del viento en el momento del accidente y durante las siguientes diez horas aproximadamente. Quedó para siempre la llamada «Huella radiactiva de los Urales del Este» (Tolstikov, 2007).

Entre los productos de la fisión atómica arrojados al medio ambiente, el más significativo biológicamente a mediano y largo plazos ha sido el estroncio-90, cuya vida media es 28,8 años (Aleksajin *et al*, 2001). En dependencia de su densidad de contaminación radiactiva (o sea, la actividad de ese isótopo por área de territorio), se tomaron las medidas de liquidación: evacuación de miles de personas, destrucción de aldeas, sacrificio del ganado y suelos sacados de uso agrícola. Los estudios sobre las consecuencias radiológicas de Kyshtym contribuyeron a los inicios de la radioecología como ciencia dedicada a investigar los efectos duraderos de la radiación sobre plantas, animales y seres humanos, así como el ecosistema en general (Aleksajin, 2006). Ese accidente también ha sido estudiado en retrospectiva para determinar cómo ocurrió esa explosión química, descartando que haya sido de índole nuclear, dada la ausencia de isótopos radiactivos de corta vida en las muestras recogidas a poco tiempo del accidente (Romanov, 1997).

El segundo gran accidente nuclear de la historia ocurrió el 10 de octubre de 1957 —o sea, a pocos días de haber ocurrido la tragedia de Kyshtym— en la central de Windscale, situada en el condado de Cumberland (ahora Sellafield), en el noroeste de Inglaterra. Puestas en marcha en 1950 y 1951, sus Pile-1 y Pile-2 fueron el primer prototipo de reactor industrial diseñado por los físicos británicos para producir plutonio y lograr su propia arma atómica, además de «cosechar» otros radioisótopos como el polonio-210 y el tritio (H<sup>3</sup>), este último para la bomba de hidrógeno (Arnold, 1992). Teniendo como modelo los reactores industriales del proyecto Manhattan en Hanford (X-10 y Reactor B), esas instalaciones de Windscale empleaban también el grafito como moderador, pero en lugar del agua se había optado por el aire como refrigerante. Este era forzado por ventiladores hacia el núcleo del reactor y, tras enfriar los elementos de combustible (uranio natural en vainas de aluminio dispuestas en canales horizontales), salía expulsado a la atmósfera a través de una chimenea de unos 120 metros de altura, pasando antes por un sistema de filtros que lo depuraban de las partículas radiactivas. Al poco tiempo se comprobó, con cierta sorpresa, que ese régimen de trabajo con refrigeración por aire en un solo sentido conllevaba una grave amenaza: el «efecto Wigner», que había hecho zozobrar en su momento el proyecto Manhattan (Arnold, 1992).

Descubierto por el físico húngaro Eugene Wigner a fines de 1942 —de ahí su nombre—, ese fenómeno consiste en la acumulación de energía potencial en el grafito



debido a la alteración de su estructura cristalina (una forma alotrópica del carbono) bajo el impacto de los neutrones rápidos, especialmente si ese material es irradiado demasiado tiempo por debajo de cierta temperatura. Estando a menos de 130 °C, como era el caso de los reactores británicos, puede suceder que esa energía acumulada desate de improviso una incontrolable subida de la temperatura del grafito hasta superar el punto de ignición (700 °C). Para evitar que esto suceda fue implementado el procedimiento de «recocción» (*annealing*), elevando periódicamente la temperatura del grafito por encima de 250 °C. Esto permite que su estructura cristalina se recomponga (núcleos de carbono vuelven a su lugar) y la energía acumulada termine disipándose. Este método preventivo se aplicaba cada cierto tiempo en Windscale, para lo cual cada reactor era detenido y se desconectaban sus ventiladores principales.

Aunque se mantuvieran atentos al aumento de la temperatura del grafito, controlando a su vez que no se calentara demasiado el uranio, los operarios presentaban grandes dificultades para aplicar dicho procedimiento debido a la ausencia de instrumentos adecuados de medición y control. De existir dudas sobre la efectividad de la «recocción» en algunas zonas del grafito moderador, solía repetirse el proceso. Esto condujo al error humano y, como resultado de un recalentamiento en la Pile-1, uno de los elementos de combustible terminó fundiéndose. Al ponerse el uranio en contacto con el aire, se produjo un incendio de vastas proporciones que fue extendiéndose hasta abarcar una parte considerable de los elementos de combustible con cerca de diez toneladas de dicho mineral. Tras varios intentos fallidos de enfriar el núcleo del reactor con dióxido de carbono, se decidió inundarlo con agua, corriéndose audazmente el riesgo de que ocurriera una explosión. Solo así pudo extinguirse el fuego, pero ya se había liberado una cantidad considerable de elementos radiactivos a través de la chimenea.

En contraste con Kyshtym, el accidente de Windscale fue ampliamente divulgado por los medios británicos tras decretarse enseguida una investigación gubernamental para conocer sus causas: la comisión Penney y su informe remitido al Parlamento. No obstante, sus conclusiones fueron publicadas solamente de manera parcial y no se conocieron de manera íntegra hasta 1989 (Arnold, 1992). En cuanto a los primeros estudios sobre cuáles radionucleidos fueron liberados durante el accidente y el alcance de su dispersión territorial, desde un primer momento fue identificado el yodo-131 como principal peligro radiológico, aunque también fue mencionado el polonio-210, descartado en informes posteriores (Wakeford, 2007). Aunque polémica en aquel momento, se entiende que la decisión de haber prohibido el consumo de leche debido a la presencia de elementos radiactivos contribuyó a minimizar la exposición a la radiación en seres humanos y la disminución del cáncer de tiroides, cuando aún no había ninguna experiencia en las emergencias radiológicas (McGeoghegan *et al*, 2000). Este tema será retomado cuando analicemos cómo difieren las consecuencias radiológicas de un accidente en dependencia de los radionucleidos involucrados y la manera en que se propagan en el medio ambiente (ver capítulo 3).

En Kyshtym predominó el estroncio-90 por ser el principal radioisótopo en los residuos radiactivos líquidos, cuyo recalentamiento provocó la explosión. Sucedió de manera

totalmente diferente en Windscale, donde prevalecieron los radionucleidos de corta vida que, siendo productos de la fisión atómica, se volatilizaron durante el incendio del uranio a más de 1000 °C. Estos fueron el yodo-131 y el cesio-137, además de los gases nobles radiactivos como el xenón-133. A ellos se sumaron los radioisótopos «cosechados» por irradiación neutrónica en cartuchos especiales colocados dentro del Pile-1: el tritio para la bomba H (a partir de cartuchos con una aleación litio-magnesio) y el ya mencionado polonio-210, obtenido a partir del óxido de bismuto con vistas a utilizarlo como disparador de la fisión atómica (*fission triggers*) en los primeros diseños de la bomba atómica (Jones, 2007). Con motivo de conmemorarse el 50 aniversario del accidente en 2007, nuevos testimonios revelaron que las dificultades tecnológicas en la explotación de Windscale eran conocidas y advertidas, pero las presiones políticas habían influido al persistir el gobierno británico en sus planes para obtener una bomba de hidrógeno que le permitiera exigir la paridad como aliado estratégico de Estados Unidos (Arnold, 1992).

En términos del dilema ubicación y seguridad, los sucesos en la planta británica fueron muy importantes porque revelaron las dificultades asociadas al empleo del grafito como moderador para tenerlas en cuenta en los demás proyectos británicos de reactores como el Magnox y el AGR, ambos enfriados con anhídrido de carbono (CO<sub>2</sub>), cuyas propiedades ignífugas dificultan cualquier incendio (Grimston *et al*, 2014). La problemática del efecto Wigner cobró sorprendente actualidad con el inicio de los programas para el desmantelamiento de los reactores industriales en todo el mundo, incluidas las propias Pile-1 y Pile-2 de Windscale (Sexton, 2007). Persiste la amenaza de una liberación inadvertida de esa energía acumulada y la consiguiente subida de temperatura de los viejos bloques de grafito irradiados durante su manipulación, envasado y depósito final. Por este motivo se han sugerido diferentes metodologías para su desmantelamiento, incluido el procedimiento de recocción, antes de ser finalmente sepultados (IAEA, 2006).

Existen más de 230 000 toneladas de grafito irradiado en el mundo, ya que más de 100 reactores utilizaron ese material como moderador para la producción de plutonio con destino al arma atómica (IAEA, 2006). Consecuentemente, la simbiosis morfogénica entre lo civil y militar se mantiene como herencia de la Guerra Fría no solo subyacente al ciclo de combustible nuclear basado en el uranio, sino por la existencia de un alto remanente de desechos radiactivos. La gestión del riesgo nuclear y radiológico no puede restringirse a la seguridad de los reactores en su fase de diseño y explotación, sino que debe encarar también los peligros asociados a su desmantelamiento (*decommissioning*) tras haber cumplido la vida operativa. Aunque sean sacadas fuera de servicio, las centrales electronucleares siguen requiriendo de un rígido control hasta que finalmente son desmanteladas al cabo de los años.

## 2.2/ *La defensa en profundidad: enfoques determinista y probabilista*

El accidente de Windscale en 1957 convenció a muchos expertos de que no podría existir nunca una seguridad absoluta, además de mostrar las consecuencias radiológicas de un accidente sobre el ecosistema (Gowing, 1987). Ese mismo año fue puesta en marcha la

primera central electronuclear comercial de Estados Unidos en Shippingport, Pennsylvania, con un reactor de agua ligera presurizada de 60 MWe que inicialmente había sido diseñado para un gran portaaviones, por lo que su combustible era uranio enriquecido hasta el 93% (Stiefel *et al.*, 1963)<sup>6</sup>. Este inicio muy exitoso impulsó otros proyectos nucleenergéticos con iniciativa privada, mientras se debatía fuertemente sobre la disyuntiva *siting and safety* en el seno de la U.S. AEC (Balogh, 1991). Coincidió entonces que también en 1957 fue difundido el informe WASH-740 (informe Brookhaven) sobre la posibilidades teóricas y consecuencias de accidentes graves en centrales nucleares de gran potencia. Este estudio contribuyó decisivamente a la promulgación de los criterios de ubicación (*site criteria*) con respecto a la densidad poblacional en las proximidades de las centrales nucleares (Patterson, 1976).

El WASH-740 definía cuáles podían ser los mayores accidentes graves en un reactor nuclear: en primer lugar, la excursión incontrolada de la reacción en cadena (supercriticidad), y en segundo, la pérdida de la refrigeración de su núcleo o zona activa (Loss-of-Coolant Accident, LOCA). Como consecuencia de este segundo tipo de avería, fue estimada una brecha en la contención de un reactor de 500 MWt (200 MWe), por la cual escapaba la mitad de los productos de fisión hacia el entorno exterior, en un momento en que el viento llevaría la nube radiactiva en dirección a una población con un millón de habitantes, situada a 30 millas (50 km) de la instalación nuclear. Aunque se planteaba como un escenario radiológico altamente improbable, se asumía que no era imposible y, de ocurrir, los cálculos teóricos arrojaban que provocaría una cantidad de víctimas considerable (en el orden de miles de muertes), mientras que los daños a la propiedad podrían llegar a siete mil millones de dólares (U.S. AEC, 1957).

Estos resultados sirvieron de base al establecimiento del actual sistema de responsabilidad civil en caso de accidente nuclear en 1957: el Price Anderson Act, que fue replicado por cada país bajo una forma específica y por los convenios internacionales de París y Viena en 1960 y 1963, respectivamente (Stoiber *et al.*, 2006). Esa ley proporcionó un paraguas financiero para la industria nuclear estadounidense al limitar la responsabilidad por los accidentes a 560 millones de dólares, estableciendo que 500 millones estarían cubiertos por fondos federales y los 60 millones restantes por las compañías de seguro privadas (US. NRC, 2016). Sin esa protección legislativa, no se hubieran construido centrales atómicas, ya que las consecuencias de un accidente grave con liberación radiactiva obviamente quebrarían a cualquier empresa, como ponían de manifiesto las consideraciones del WASH-740 (Walker, 2000a).

Una de las principales conclusiones de ese informe era la siguiente: «Mirando hacia el futuro, el principio sobre el cual hemos basado nuestros criterios para los reactores de potencia es que requeriremos múltiples líneas de defensa contra accidentes que pudieran

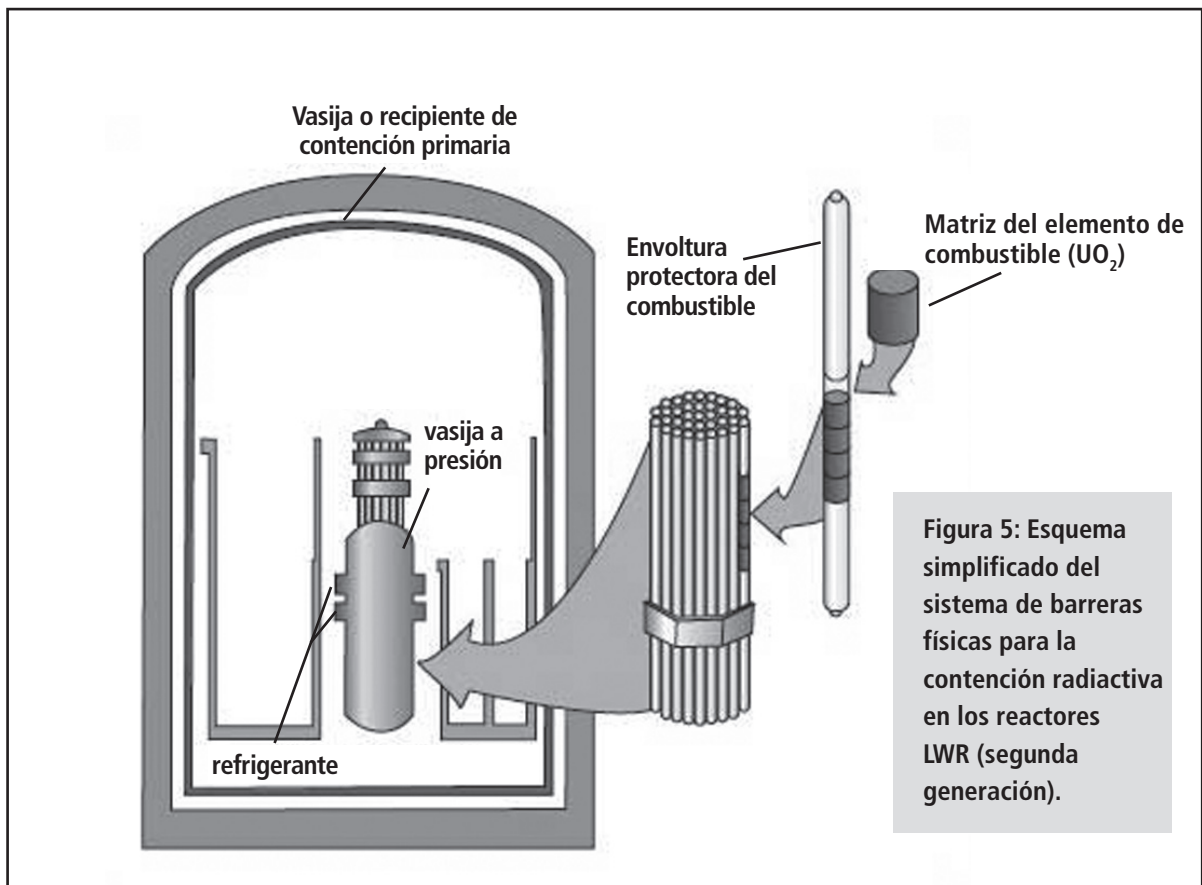
---

<sup>6</sup>Pocos meses antes, el 12 de julio de 1957, el SRE (Sodium Reactor Experiment) había sido aprovechado por la Southern California Edison Company para distribuir electricidad a la ciudad de Moopark, en California (Buck, 1983). Sin embargo, se considera a la instalación de Shippingport, Pennsylvania, como la primera central electronuclear a escala completa en los Estados Unidos, cuyo primer reactor fue puesto en marcha el 2 de diciembre de ese mismo año. Con antelación, el 26 de junio de 1954, los rusos habían estrenado el reactor AM-1, llamado así por las siglas de *Atomni Mir* («Átomo Pacífico» en ruso) en la CEN de Óbninsk, reconocida sin discusión como la primera central electronuclear en el mundo.

liberar productos radiactivos (...) No hay peligro para la seguridad del público a menos que esas (...) líneas de defensa adicionales también se rompan» (U.S. AEC, 1957: 6). Así quedaba plasmado el principio de defensa en profundidad (Defence in Depth, DiD), identificándolo en primera instancia como un sistema de barreras físicas que evita el escape radiactivo (Drouin *et al*, 2015). Esta opción ya se había manejado durante el proyecto Manhattan, cuando los ingenieros químicos de la Du Pont aportaron su experiencia industrial para el diseño de los primeros prototipos de reactores nucleares en Oak Ridge. Por desconocer el comportamiento que tendría el combustible nuclear, así como los efectos de la radiación sobre los materiales, ellos adoptaron cautelosamente amplios márgenes de protección y niveles de redundancia para garantizar la seguridad del reactor (Rhodes, 1986).

A partir de entonces, la DiD se afianzaría como el fundamento de la filosofía práctica de la seguridad nuclear al que se atenderían los diferentes diseños de reactores nucleoeenergéticos, todos basados en sus antecesores militares. Durante una primera etapa predomina exclusivamente el llamado enfoque «determinista», en el sentido de que los posibles accidentes graves pueden ser «determinados» mediante el cálculo de sus efectos físicos más peligrosos (*hazard analysis*), previéndose desde la fase de proyecto cómo afrontarlos para restablecer una situación segura: reactor parado, núcleo refrigerado y radiactividad confinada. En consonancia se establece el «criterio de accidente base de diseño» (Design Basis Accident, DBA), cuya variante extrema o escasamente probable es el «máximo accidente creíble» (Maximum Credible Accident, MCA). Desde esa perspectiva determinista, el principal filosofema de la seguridad nuclear era el siguiente: si logramos probar que, aun cuando se produzca el MCA, la liberación de radiactividad al exterior del reactor está prácticamente excluida, habremos demostrado que la energética nuclear es segura.

En calidad de MCA no se adoptó la supercriticalidad de la reacción nuclear, sino la pérdida de refrigerante del reactor debido —por ejemplo— a la rotura de su tubería de suministro principal. Si se llegara a esta situación límite, debía funcionar de inmediato el sistema emergente de refrigeración del núcleo (Emergency Core Cooling System, ECCS) para extraer el calor liberado por el combustible nuclear, aun cuando la reacción de fisión en cadena ya hubiera sido detenida por la inserción de las barras de protección. Provocada por la desintegración radiactiva de los subproductos de la fisión atómica, esa liberación calorífica se mantiene como remanente en un valor cercano al 5-6 % de la potencia térmica que tenía el reactor antes de quedar fuera de servicio (U. S. DOE., 1992). Después disminuye en forma exponencial, pero este proceso puede durar semanas e incluso meses. Por eso es necesario mantener la refrigeración del núcleo; de lo contrario el combustible seguiría calentándose hasta fundirse y el material radiactivo podría escapar al exterior. Siendo ese remanente de calor por decaimiento radiactivo una característica única de los reactores nucleares, los diferencia y complejiza de manera radical con respecto a las calderas de la energética tradicional, cuya fuente de calor cesa inmediatamente cuando es cortado el suministro de petróleo, gas o carbón. Quiere decir: la reacción de fisión nuclear en cadena puede ser detenida, pero esto no significa que el reactor haya sido totalmente apagado.



Previendo el caso extremo de la pérdida total de refrigeración del núcleo, cuando el combustible termina fusionándose inevitablemente, aun así debía garantizarse que la liberación de una cantidad significativa de radiactividad al medio ambiente fuese casi imposible. Para eso fue instaurado un sistema de tres barreras físicas independientes, diseñándolas para el confinamiento de los productos radiactivos. En la mayoría de los reactores nucleares (entiéndase los LWR de segunda generación), esas tres barreras son: 1) la envoltura protectora del combustible; 2) la vasija a presión del reactor, y 3) la vasija de contención primaria para evitar el escape de gases radiactivos al exterior. Habitualmente se incluye como primera barrera la propia matriz del elemento combustible, ya que las investigaciones han demostrado que el  $UO_2$  fundido tiene una gran capacidad de retención de los productos de fisión, salvo los gases nobles y ciertos productos volátiles como los yodos (ver figura 5).

A pocos años de que el WASH-740 estimara teóricamente las consecuencias radiológicas de un LOCA, las preocupaciones sobre este tipo de accidente con fusión del núcleo generaron un creciente debate que duró desde 1963 hasta 1975, trascendiendo desde el seno de la U.S. AEC a la esfera pública (Walker, 2000a). A medida que la potencia de los reactores nucleares crecía, pero eran mantenidas las mismas dimensiones de sus recintos de contención radiactiva, sin aumentarlas proporcionalmente, preocupaba que el combustible fundido no solamente dañara la vasija a presión, sino también la capa gruesa de hormigón del edificio de contención y, por tanto, esa lava ardiente continuara su trayectoria descendente hacia el subsuelo.

Luego de Three Mile Island, esa posibilidad fue conocida eufemísticamente como «síndrome de China», al ser hiperbolizada por el filme homónimo y los medios de

comunicación, especulando que la masa ígnea podría atravesar el globo terráqueo (ver subacápite 2.3). Mucho más plausible era que ocurriesen otros fenómenos igualmente preocupantes: en primer lugar, la explosión del hidrógeno que emana debido a la oxidación del circonio que conforma las vainas del combustible nuclear (Park, 2011). Si la temperatura del circonio sube más allá de cierto límite (1000 °C), se produce una reacción catalítica exotérmica automantenida que favorece la disociación del agua en oxígeno e hidrógeno:



Desde 1963, la U.S. AEC se había enfrascado en un programa experimental para comprobar los efectos físicos de la fusión del núcleo por pérdida de la refrigeración de emergencia (ECCS). Con ese objetivo fue construido un reactor conocido como Prueba de Fluido (Loss-of-Fluid Tests, LOFT), en la National Reactor Testing Station, en Idaho. La idea era recoger datos sobre ese tipo de accidente y emplearlos para mejorar el diseño del ECCS. A la postre, sus resultados fueron confusos e inquietantes porque mostraron que el sistema de refrigeración de emergencia podía fallar por razones termohidráulicas: una vez que en el circuito primario se formara vapor, este podía bloquear la entrada del refrigerante, si bien los experimentos distaban mucho de reproducir las condiciones de trabajo en los reactores reales y, por eso, terminaron siendo desestimados (Walker, 2000a). Al ventilarse públicamente durante las audiencias en el Congreso, esos resultados adversos fueron muy criticados por la Unión de Científicos Concientizados (Union of Concerned Scientists, UCS), quienes ya habían reparado en la ausencia total de datos experimentales convincentes. Esta controversia no cesó, aun cuando fueron adoptados criterios provisionales de aceptación para los ECCS durante los trámites de concesión de licencias para el emplazamiento y construcción de centrales nucleares (Patterson, 1976).

Paralelamente a los experimentos en Idaho, la U. S. AEC había establecido en 1966 una comisión especial para investigar más seriamente el problema del núcleo fundido. Dirigido por el experto en seguridad nuclear William K. Ergen, este estudio alertó que el daño de la contención radiactiva era muy posible si el sistema emergente de enfriamiento del núcleo hubiera sido diseñado de manera inadecuada. Publicado en 1967, el llamado informe Ergen significó un cambio de perspectiva de la seguridad nuclear hacia la prevención y repercutió en la actividad reguladora (Walker, 2000a). Dado que podían producirse daños en la contención radiactiva, a partir de entonces se entendió que el enfoque determinista de la seguridad debía ser complementado con los métodos cuantitativos de análisis probabilista, cuyo empleo ya había sido introducido en la industria aeronáutica por los ingenieros de la Boeing Company, así como por la NASA para la evaluación de las misiones Apolo (Keller y Modarres, 2005).

### *2.2.1/ El WASH-1400 o informe Rasmussen*

Los expertos nucleares estaban obligados a demostrar que la probabilidad de ocurrir una fusión del núcleo por pérdida de refrigerante era tan pequeña que ese peligro estaba bajo control. Y si, a pesar de todo, sucediera un LOCA, tenía que estar prácticamente excluido el escape radiactivo gracias a la defensa en profundidad. Es lo que se propuso

comprobar el informe WASH-1400, también conocido como informe Rasmussen, estudio precursor de la Evaluación Probabilista de la Seguridad (Probabilistic Safety Assessment; PSA). Esta investigación fue iniciada en 1972 a petición del Congreso para saber cuál sería la probabilidad de que ocurriese tal accidente, así como la magnitud de sus consecuencias sobre la salud humana, durante el tiempo de vida útil de una cantidad esperada de reactores comerciales en los Estados Unidos. Con el título *Reactor Safety Study: An Assessment of Accidental Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants (WASH 1400)*, sus conclusiones fueron publicadas en 1975 por la Comisión Regulatoria Nuclear (Nuclear Regulatory Commission, NRC), una de las dos entidades en que se había recién dividido la US. AEC, como ya vimos.

El físico norteamericano Norman Rasmussen y su equipo del Massachusetts Institute of Technology (MIT) aprovecharon el análisis de árbol de fallos (Fault Tree Analysis, FTA) según el método desarrollado por la Bell Telephone Laboratories en 1962, readecuándolo para la cuantificación del riesgo de fusión del núcleo en los dos tipos de reactores LWR (PWR y BWR), incluyendo un escape radiactivo por rotura en su contención. Teniendo como premisa esta amenaza, fueron analizadas las secuencias accidentales a partir de eventos iniciadores (disparadores), como es la pérdida del refrigerante por salidero en la tubería de suministro. Tal y como venía haciéndose en la esfera aeroespacial, Rasmussen incorporó el análisis del árbol de sucesos o eventos (Event Tree Analysis, ETA), aplicando una metodología combinada (*fault tree/event tree*) para mensurar el riesgo tecnológico en función de la probabilidad de ocurrencia del accidente y la magnitud de sus consecuencias. De aquí proviene la ya clásica ecuación ingenieril:

**Riesgo = (probabilidad de accidentes por año) x (consecuencias de dichos accidentes),**  
que era desglosada en el WASH-1400 como:

**Riesgo = {(probabilidad de eventos disparadores por año) x (probabilidad de falla en la contención)} x {(tasa de liberación de material radioactivo) x (probabilidad de muertes)}**

El elemento más controversial de este estudio fue su resumen ejecutivo con la tabla de frecuencias de eventos naturales e industriales, registrando sus índices de mortalidad para compararlos con la cantidad de víctimas que produciría un accidente nuclear de gran envergadura, según los cálculos probabilísticos. Estos habían arrojado que la probabilidad de morir al año en Estados Unidos por causa de 100 plantas nucleares en funcionamiento era tan irrisoria como perecer por causa de la caída de un meteorito:  $10^{-9}$ /reactor-año; o sea: 0, 000000001. Sobre la base de ese análisis comparativo, la principal conclusión del informe Rasmussen fue la siguiente:

La probabilidad de accidentes de reactores es mucho menor que la de muchos accidentes no nucleares que tienen consecuencias similares. Todos los accidentes no nucleares examinados en este estudio, incluyendo incendios, explosiones, liberaciones de productos químicos tóxicos, fallas en presas, accidentes de aviones, terremotos, huracanes y tornados son mucho más probables y pueden tener consecuencias comparables o mayores que las de los accidentes nucleares (Rasmussen, 1975: 1).

Sin embargo, un examen más profundo de ese informe revelaba una sorprendente discrepancia entre esas afirmaciones rotundas del resumen ejecutivo y los nueve volúmenes de información técnica. Hay momentos en que los investigadores reconocen muy seriamente sus propias limitaciones con respecto a la metodología aplicada de evaluación probabilista a determinadas cuestiones, dada la novedad tecnológica de la energética nuclear. De modo que el tono altisonante y categórico de sus conclusiones parece que fue adoptado intencionalmente con un destino promocional para el público no experto (Ford, 1982). Este proceder terminó comprometiendo la credibilidad del informe Rasmussen ante los físicos y científicos de otras áreas ajenas a la energética nuclear.

En respuesta al vendaval de críticas que produjo ese documento, la NRC creó un grupo especial para revisar el estudio y fue emitido un informe (Lewis Report) que cuestionaba los resultados obtenidos por Rasmussen. Aunque reconocía que su metodología era prometedora, el WASH-1400 era severamente cuestionado por el tratamiento inadecuado de la incertidumbre en el cálculo de las probabilidades, entre otras numerosas cuestiones (Lewis, 1978). Esto hizo que, en 1979, la NRC emitiera una declaración política, aceptando las numerosas críticas planteadas por el informe Lewis, y retiró el respaldo al resumen ejecutivo del WASH-1400, descalificando sus principales conclusiones (Byrne y Hoffman, 1996). No obstante, ese mismo año ocurre el accidente de Three Mile Island y el informe Rasmussen fue rehabilitado al comprobarse que había descrito y analizado precursoramente secuencias análogas a las ocurridas durante esa avería (Gorinson, 1980).

A partir de ese momento el uso de la metodología probabilista en seguridad nuclear adquirió una nueva dimensión, al validarse como la única manera de revelar riesgos que no han sido «determinados» en la fase de diseño. Antes de la PSA se suponía que solo algunos sucesos iniciadores podían conducir a la fusión del núcleo del reactor; en primer lugar, la ruptura total de la tubería de suministro de refrigerante con mayor diámetro. El análisis probabilista de Rasmussen reveló que existían otras secuencias accidentales de LOCA, incluso más riesgosas, como son las pérdidas continuas por pequeñas roturas en tuberías, problemas con las válvulas o por causa del error humano (Keller y Modarres, 2005). Por eso los expertos nucleares siempre han sostenido que el WASH-1400 sentó las bases metodológicas de la Evaluación Probabilista de la Seguridad (Probabilistic Safety Assessment (PSA), reconociéndola a su vez como Evaluación Probabilista del Riesgo (Probabilistic Risk Assessment, PRA) (Hayns, 1999).

Desde entonces existe un acuerdo generalizado sobre la importancia de la PSA y/o PRA. No obstante, entre los propios expertos nucleares hay quienes no concuerdan en lo referente a la alta fiabilidad de los resultados probabilistas. Esto depende de la calidad de los modelos que se emplean para representar el funcionamiento de los sistemas y de los componentes que constituyen la instalación nuclear, así como de la corrección de los datos sobre la probabilidad del daño y el pleno conocimiento de la cadena de causas y efectos. Por ejemplo: si un accidente depende del mal funcionamiento de varios componentes, se formula la hipótesis de que su probabilidad es el producto de las probabilidades de avería



de los componentes aislados («fallo único»), como hizo el informe Rasmussen. Pero esto dejaría de ser cierto si hubiera una «causa común» que dejara simultáneamente fuera de juego a varios componentes, como sucedió en Three Mile Island. Esta deficiencia es extensiva a la probabilidad de que se produzcan acontecimientos anormales, no sometidos a prueba en un número suficiente de casos, como confirmó dramáticamente la concatenación de sucesos naturales (terremoto y tsunami) y tecnogénicos (pérdida total de energía eléctrica o *blackout*) en Fukushima Daiichi. Una importancia decisiva tiene el error humano, omnipresente en todos los accidentes nucleares en una u otra forma. En todos esos casos, la falta de suficientes datos estadísticos vuelve inciertos los valores de probabilidad y repercute sobre la fiabilidad de los resultados finales, ya que termina predominando la mirada subjetiva del propio equipo de expertos que realiza la evaluación probabilista, ya sea relativa o bayesiana.

Lo cierto es que, en correspondencia con las lecciones de cada accidente severo histórico, los expertos nucleares han retomado siempre la problemática de cómo combinar los enfoques determinista y probabilista para prevenir los accidentes superiores al diseño base (BDBA). Esto se debe a que la defensa en profundidad (DiD) de todos los reactores de segunda generación fue diseñada desde una perspectiva determinista, siguiendo criterios muy conservadores, especialmente su sistema de barreras físicas. Si durante el accidente de Three Mile Island, habiéndose fusionado el núcleo del reactor, quedó a salvo la contención radiactiva, el estallido del RBMK-1000 en Chernobyl ya fue el primer BDBA que puso totalmente en crisis el propio concepto determinista de la DiD. Aunque se tratara de un prototipo soviético de carácter único, con un deficiente sistema de barreras físicas, la idea de transitar hacia un enfoque probabilista de la seguridad adquirió entonces un nuevo impulso. En 1986, el mismo año de la tragedia ucraniana, se impulsa un nuevo proyecto sobre la evaluación del riesgo en cinco reactores comerciales de los Estados Unidos: el informe NUREG-1150.

Entre los principales objetivos de este estudio estaba proporcionar una respuesta a las principales críticas recibidas por el informe WASH-1400, desarrollando una estimación cuantitativa de la incertidumbre asociada al riesgo (U.S. National Research Council, 2009). Este énfasis de los expertos nucleares en aplicar técnicas para la mensurabilidad de la incertidumbre ya se había manifestado cuando, a finales de la década de 1970, la NRC puso en marcha un programa para elaborar una metodología con la que evaluar el riesgo asociado a los almacenamientos geológicos de residuos radiactivos de alta actividad, llevado a cabo por los Laboratorios Nacionales de Sandia (Sandia National Laboratories, SNL). Tanto para este estudio como para el NUREG-1150 se hizo imprescindible utilizar de forma extensiva el juicio de expertos, único medio razonable de evaluar las incertidumbres asociadas a muchos parámetros importantes sobre los que apenas se poseía información (Bolado *et al*, 1998).

### 2.2.2/ De la «DiD clásica» a la «DiD con riesgo informado»

Tras emerger y desarrollarse como respuesta a las lecciones de los accidentes severos históricos, la metodología PRA y/o PSA terminó incorporándose, aunque tardíamente, a las prácticas reguladoras de la energética nuclear (Hayns, 1999). Ante la imposibilidad de anular

los criterios de aceptación de la DiD en los reactores de segunda generación según el enfoque determinista (la llamada «DiD clásica»), el análisis probabilista trata de complementarlos para vislumbrar —entre otros riesgos— aquellas secuencias de poca frecuencia que pudieran desembocar en un daño de las barreras defensivas. La aspiración es lograr un enfoque integrado (determinista y probabilista) para la toma de decisiones con arreglo a una «DiD con riesgo informado» desde la propia fase de diseño, sugiriendo aquellas áreas críticas en las que conviene intervenir para garantizar la seguridad ante situaciones imprevistas (Chierici *et al.*, 2016). Es lo que tratan de hacer los proyectistas de los reactores de nuevas generaciones (Gen III+ y Gen IV). Combinando los criterios de «seguridad activa» y «seguridad pasiva», ellos proponen que las barreras físicas de la contención radiactiva sean independientes y concéntricas para garantizar su integridad en cualquier circunstancia (Fleming *et al.*, 2002).

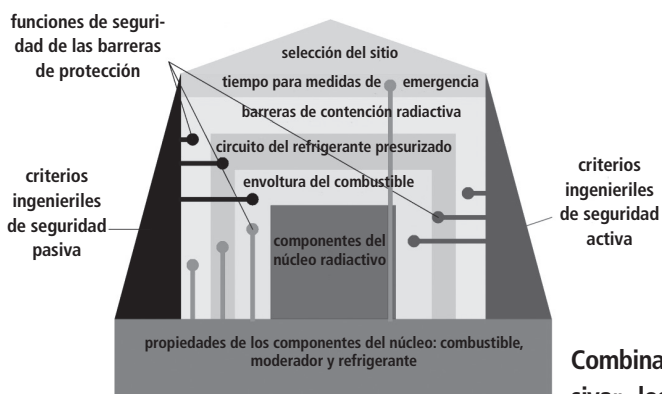
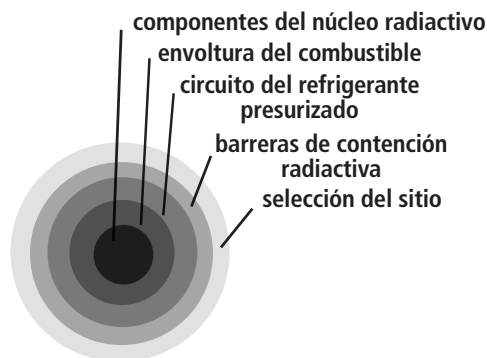
Asimismo, la evolución del principio de defensa en profundidad con arreglo a las lecciones de los accidentes severos de Three Mile Island y Chernobyl conllevó a que las cuatro barreras físicas de la «DiD clásica» quedaron integradas dentro del concepto de «líneas de defensa», cuya configuración jerárquica en cinco niveles independientes de protección incluye los sistemas, estructuras, componentes y acciones destinados a garantizar las funciones de seguridad (ver figura 5). A las acciones de prevención y control (hasta nivel 3) se añaden las de mitigación en caso de fusión del núcleo del reactor (nivel 4). De no poder ser controlada la liberación de sustancias radiactivas al exterior, están previstos los planes de emergencia (nivel 5). Si ocurre un fallo en cada uno de los niveles, el siguiente debe impedir que este fallo progrese y produzca consecuencias no deseadas. Este principio es aplicable tanto a la disposición de barreras físicas como a las disposiciones organizativas y técnicas. Dicha concepción de la DiD, todavía vigente, quedó recogida por el OIEA en el documento INSAG-10 (IAEA, 1996a), si bien ha comenzado a ser revisada después de Fukushima Daiichi, ante la necesidad de tomar decisiones en contextos de incertidumbre radical, en particular cuando se valora la posibilidad de liberación radiactiva durante un tiempo dado (OECD Nuclear Energy Agency, 2016c).

La jerarquización de los cinco niveles de la DiD es como sigue:

*Hasta nivel 3 (prevención y control):* El primer nivel se refiere a las anomalías de operación y el fallo de sistemas. La prevención se alcanza principalmente a través de un «diseño robusto» y explotación prudente de la instalación, según los márgenes de seguridad previstos. Ello exige una alta calidad en el aprovisionamiento, instalación y mantenimiento de todos los sistemas. Si este primer nivel es incumplido, el segundo nivel controla el funcionamiento anormal y detecta los fallos. Esto se consigue principalmente mediante los sistemas de regulación, control, limitación y protección que monitorizan múltiples variables: presiones, temperaturas, flujo de neutrones... Cuando alguna de ellas alcanza un determinado valor o su tendencia supera ciertos márgenes, las protecciones actúan de manera automática corrigiendo la situación. No obstante, si el segundo nivel fuese superado, el tercer nivel se activaría para controlar la progresión de la situación anormal, que ya se habría convertido en un accidente serio (aunque sin fusión del núcleo). Hasta aquí son los accidentes base de diseño para los

La evolución del principio de defensa en profundidad (DiD) con arreglo a las lecciones de los grandes accidentes históricos se ha consumado en que el sistema de barreras físicas de los reactores de segunda generación quedó integrado dentro del concepto de «líneas de defensa». Su configuración jerárquica en cinco niveles independientes de protección incluye los sistemas, estructuras, componentes y acciones destinados a garantizar las funciones de seguridad. A las acciones de *prevención y control* (hasta nivel 3) se añaden las de *mitigación* en caso de fusión del núcleo del reactor (nivel 4). De no poder ser controlada la liberación de sustancias radiactivas al exterior, están previstos los *planes de emergencia* (nivel 5).

Si ocurre un fallo en cada uno de los niveles, el siguiente debe impedir que este fallo progrese y produzca consecuencias no deseadas. Esta concepción aún vigente de la DiD quedó recogida por el OIEA en el documento IN-SAG-10 (IAEA, 1996a), si bien comienza a ser revisada después de Fukushima Daiichi, al reconocerse que «conviene tomar en consideración las incertidumbres en cuanto al momento y la magnitud de los fenómenos que pudieran ocurrir durante el accidente» (OIEA, 2016b: 8).



Combinando los criterios ingenieriles de «seguridad activa» y «seguridad pasiva», los proyectistas de los reactores de nuevas generaciones (Gen III+ y Gen IV) proponen una «DiD con riesgo informado» desde la propia fase de diseño. Esta nueva concepción comprende que las barreras de protección sean independientes y concéntricas para garantizar su integridad en cualquier circunstancia (Fleming *et al*, 2002). También se contempla la selección del sitio y las propiedades inherentes a los componentes del núcleo: combustible, moderador y refrigerante, ya que de estos últimos depende el tiempo para adoptar las medidas de emergencia.

#### QUINTO NIVEL

Planes de emergencia fuera del emplazamiento

#### CUARTO NIVEL

Gestión de accidente severo superior a la base de diseño (BDBA), o sea, con fusión del núcleo.

#### TERCER NIVEL

Control de accidente base de diseño sin fusión del núcleo del reactor (DBA).

#### SEGUNDO NIVEL

Control de funcionamiento anormal y detección de fallas.

#### PRIMER NIVEL

Prevención de anomalías de operación y fallas de sistemas.

Sistema de barreras físicas

Diseño robusto y explotación prudente de la instalación, según los márgenes de seguridad previstos.

Actuación de los sistemas de regulación, control, limitación y protección.

Activación del sistema de salvaguardias ingenieriles y procedimientos para evitar emisiones radiactivas al exterior.

Medidas para mitigar las consecuencias radiológicas, incluida la protección del confinamiento radiactivo (posibilidad de venteo del hidrógeno).

Medidas urgentes para proteger a la población como su evacuación, suministro de yodo estable y restricciones de consumo de agua y alimentos contaminados.

Infografía 4: Evolución del principio de «defensa en profundidad» en las centrales nucleares con arreglo a las lecciones de los accidentes históricos. Fuente: elaboración propia.

cuales fueron previstas salvaguardias ingenieriles y un orden de procedimientos para que no se produzcan emisiones radiactivas al exterior, incluso en el peor de los casos previstos por proyecto: el llamado «accidente máximo creíble» (MCA).

*Nivel 4 (mitigación):* En caso de que el tercer nivel fallara, la situación se convertiría en un accidente severo superior a la base de diseño (o sea, con fusión del núcleo) que requeriría la actuación del cuarto nivel de la defensa en profundidad. Su objetivo primordial es la mitigación de las consecuencias del posible accidente, por lo que es definido como gestión de accidentes. Para que esta gestión sea eficaz, se preparan guías que permiten minimizar las consecuencias radiológicas. Por ejemplo, si existe riesgo para la integridad estructural de la barrera de contención radiactiva por haber aumentado la presión en su interior, se recurre a su ventilación en el momento preciso con tal de evitar que aquella termine dañada. Incluso ya se ha asumido la posibilidad de descargas radiactivas al medio ambiente con tal de evitar la explosión del hidrógeno, uno de los mayores peligros asociados a la fusión del núcleo, como demostraron Three Mile Island y Fukushima Daiichi.

Hasta donde sea posible, se prevé informar anticipadamente a la población sobre esa liberación radiactiva en situación límite («incertidumbre del hidrógeno», podría llamársele), aunque siempre ateniéndose a que «el principio básico es garantizar que el proceso de adopción de decisiones siempre esté en proporción al tiempo de evolución del accidente» (OIEA, 2016b: 53). Esto sugiere literalmente que, aunque no se pueda informar al público, se priorizarían las descargas radiactivas de irrumpir una amenaza para la estructura de contención, con tal de evitar su ruptura, porque provocaría males mayores, como sucedió en Fukushima Daiichi. De no poder impedirse los daños de esa barrera física, correspondería a las autoridades aplicar el quinto nivel de la defensa en profundidad. Entre otras medidas, una situación semejante requiere tener actualizada de antemano la información sobre las condiciones meteorológicas en la zona de ubicación de la central nuclear.

*Nivel 5 (planes de emergencia):* Este quinto y último nivel de protección reconoce que la seguridad nunca es absoluta y, por ende, pueden ocurrir accidentes severos, por muy pequeña que sea su probabilidad, con liberación incontrolada de productos radiactivos al medio ambiente. Por tanto, la defensa en profundidad asume la preparación de los planes de emergencia fuera del emplazamiento, adoptando medidas tales como el suministro de yodo estable para saturar la tiroides y que esta rechace el isótopo radiactivo yodo-131; la evacuación de la población o su traslado a refugios y confinamiento temporal; la imposición de restricciones para el consumo de agua y alimentos contaminados, etc.

Aunque este tipo de escenario con liberación radiactiva ya había sido contemplado desde Three Mile Island, intensificándose luego de Chernobyl, adquiere ahora una renovada connotación en todas las normativas del OIEA publicadas después de Fukushima Daiichi para la gestión de los accidentes severos (Severe Accident Management, SMA). Por primera vez en la historia se reconoce explícitamente que «conviene tomar en consideración las incertidumbres en cuanto al momento y la magnitud de los fenómenos que pudieran ocurrir durante el accidente» (OIEA, 2016b: 8). También por primera vez se

explicita la necesidad de «definir las vulnerabilidades de la central en el caso de accidentes que sobrepasen a los de base de diseño» (OIEA, 2016b: 16). De ambas afirmaciones puede inferirse que existe una interrelación entre las nociones de *riesgo*, *incertidumbre* y *vulnerabilidad* que preocupa a los ingenieros nucleares, si bien esta última suele manejarse únicamente como «vulnerabilidad a sucesos externos»: terremotos, en primer lugar.

Ese nuevo enfoque post-Fukushima se intensificó después de haberse efectuado las llamadas «pruebas estrés» (*stress tests*) a múltiples centrales electronucleares de diferente tipo en el mundo (Hermesmeyer *et al*, 2015). Como resultado, junto al análisis determinista y probabilístico de los accidentes base de diseño (DBA), se ha impuesto desarrollar el análisis de los BDBA o accidentes severos (Severe Accident Analysis, SAA) como una rama independiente en sí misma, orientada a tratar de afrontar tales situaciones límites por poco probables que parezcan, tanto en las instalaciones de segunda generación como en los reactores con diseños más actuales y futuristas. Al asumir que la defensa en profundidad abarca un quinto nivel —y hasta un sexto— que involucra al resto de la sociedad en la incertidumbre radical, se produce un giro rotundo en la «filosofía de la seguridad de los reactores nucleares» (Schneider y Yair, 2016).

Significa entonces que, al igual que sucedió con Three Mile Island y Chernobyl, hay un antes y un después de Fukushima Daiichi. Cada uno de esos accidentes severos históricos provocó un cambio en la comprensión de la seguridad nuclear que se ha expresado en una revisión del principio de defensa en profundidad (DiD). Sin embargo, esta revisión no era sincrónica: en primer lugar, cambiaba en el país donde ocurrió el accidente, mientras que los demás rechazaban o asumían sus lecciones tardíamente. Solamente analizando esos BDBA en perspectiva diacrónica puede entenderse la verdadera dimensión ontológica del dilema ubicación/seguridad: la energía potencial del combustible nuclear es cientos de miles, millones de veces mayor que todas las cosas con las que la humanidad se ha enfrentado antes. ¿Acaso un sistema de barreras físicas es capaz de resistir tal concentración de energía cuando escapa totalmente de control? De ser negativa la respuesta, habría que reconocer entonces una «vulnerabilidad intrínseca» de la defensa en profundidad y, por ende, de la energética nuclear en pleno.

### 2.3/ *El accidente de Three Mile Island: error humano y fallo de causa común* (common-cause failure)

Del 28 al 30 de marzo de 1979 se produjo el accidente en la central electronuclear de Three Mile Island, situada en la isla homónima, en la ciudad de Harrisburg, en el estado norteamericano de Pennsylvania. Las consecuencias de aquel accidente dividió a partidarios y opositores de la energética nuclear en forma enconada y, todavía hoy, su evaluación arroja conclusiones contradictorias. A tratar de ofrecer un análisis equilibrado de aquel suceso, dedica J. Samuel Walker —historiador oficial de la NRC— su libro *Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective* (2004). El autor se concentra en los días de crisis que siguieron al accidente, cuyas causas se atribuyen a una serie de fallas mecánicas menores que

los errores humanos agravaron drásticamente. Entre las críticas desfavorables que recibió esta obra se le achaca que dedica poco espacio a la información técnica, cuyas explicaciones son insuficientes y, en muchos casos, incorrectas (Cohen, 2005). Aquí expondremos una breve reseña técnica de Three Mile Island, caracterizándolo como el primer accidente severo en la historia de la energética nuclear, al ocurrir la fusión parcial del núcleo del reactor debido a una pérdida de refrigerante (LOCA). Somos del criterio que, desde la altura de la catástrofe de Fukushima Daiichi, se impone una nueva mirada en retrospectiva a ese primer BDBA, porque ya entonces puso de manifiesto las incertidumbres y vulnerabilidades relacionadas con la defensa en profundidad (DiD) y su dudosa efectividad ante la posibilidad de que un reactor nuclear pudiera explotar, aunque no sea precisamente como una bomba atómica.

Es momento de adelantar una de las interrogantes más importantes de nuestro análisis filosófico crítico, al hacer énfasis en los problemas intratécnicos de la energética nuclear: *¿Por qué han tenido lugar sorpresas tecnológicas para las cuales no hay una explicación concisa o, si la hay, tardaron en ser esclarecidas o existen diferentes versiones sobre las mismas?* Nuestra hipótesis de partida es que esta opción energética arrastra dificultades tecnológicas específicas desde su morfogénesis, debido a la premura en la conversión de los reactores de origen militar para su empleo con fines civiles. Como se ha visto, la mayor dificultad radica en la refrigeración del núcleo en condiciones límites, cuando el sistema de emergencia (ECCS) tiene que cumplir esa función ininterrumpidamente. Reconociendo a LOCA como el máximo accidente creíble, los expertos nucleares priorizaron la ruptura de la tubería principal de mayor diámetro como un fallo único que conduciría a ese peor escenario. Sin embargo, tal y como había previsto el informe Rasmussen, más peligrosas eran las pequeñas pérdidas de refrigerante. A partir de ellas podría darse una comunión de sucesos que condujera a una fusión del núcleo del reactor, poniendo en peligro su vasija y la contención radiactiva.

El accidente de Three Mile Island corroboró esa conjetura del análisis probabilista, pero sacó a relucir una causa más profunda: la simbiosis entre el error humano y los fallos intrínsecos a los sistemas tecnológicos complejos, específicamente el llamado «fallo de causa común» (Common-Cause Failure, CCF). Ambos factores se manifestaron simultáneamente y, aunque pudieron deslindarse cuando se reprodujo la cadena causal en retrospectiva (análisis del accidente), esto no significa que hubiera podido lograrse lo mismo en clave prospectiva (análisis de riesgo). Basándonos en esta compleja relación entre causas (causalismo) y contingencias (probabilismo), manejamos de ahora en adelante la noción de «sorpresa tecnológica» en el sentido de que, si bien Three Mile Island estuvo dentro del rango de incertidumbre postulado por el informe Rasmussen, la mayoría de los expertos quedó sorprendida por el evento. De ahí las diferentes conclusiones a que arribaron las dos principales investigaciones sobre sus causas: *Three Mile Island: A Report to the Commissioners and to the Public* (U.S. NRC, 1980), llevado a cabo por la entidad reguladora y conocido como el informe Rogovin, y el *Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island: The Need for Change: The Legacy of TMI*, realizado por encargo presidencial y conocido como informe Kemeny (Kemeny, 1980).

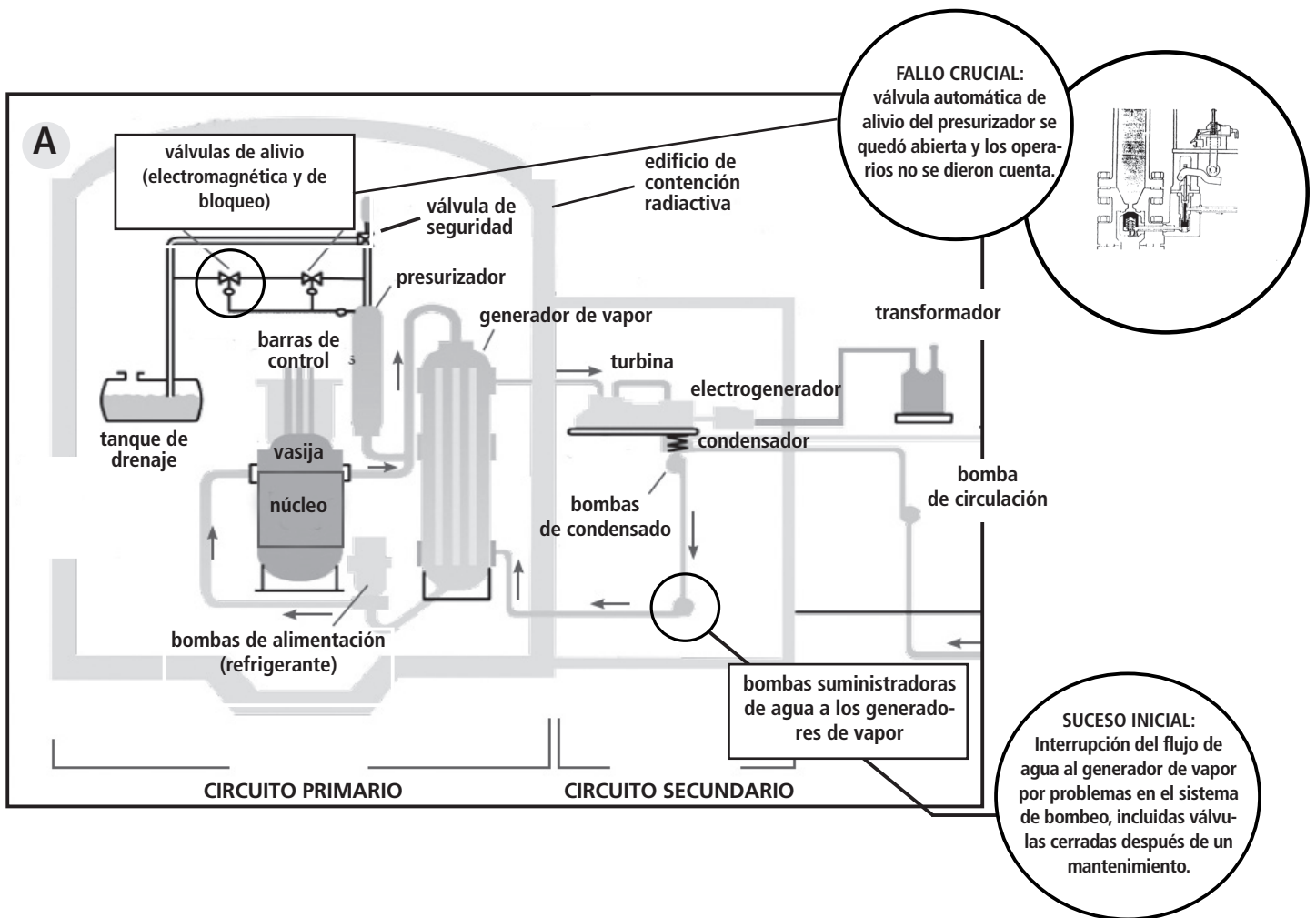
### 2.3.1/ Caracterización técnica de TMI-2

Estaba dotada aquella planta de dos reactores de agua ligera a presión PWR, diseñados y manufacturados por la Babcock and Wilcox Company, el primero de los cuales (TMI-1) fue puesto en funcionamiento en 1974, se encontraba parado en el momento del accidente y luego siguió en operaciones hasta su clausura definitiva en 2019. El segundo reactor (TMI-2) era prácticamente nuevo y funcionaba a 97% de su potencia eléctrica nominal (906 MWe) cuando sufrió la avería. Este tipo de reactores es de ciclo térmico indirecto; o sea, tiene dos circuitos de agua que absorben calor. Al enfriar los elementos de combustible, el agua del circuito primario es radiactiva y circula a presión, manteniéndose este parámetro con ayuda de un sistema compensador («presurizador») para evitar que el refrigerante hierva. Esta agua sale caliente del reactor y circula por el generador de vapor, donde le transfiere todo su calor al agua del circuito secundario. Como esta transferencia térmica se realiza sin haber contacto entre ambos fluidos, separados entre sí por la cubierta metálica de las tuberías, el vapor que llega y mueve al turbogenerador no es radiactivo. Para tener una noción de lo que ocurrió en Three Mile Island, señalamos sus principales eventos secuencialmente, si bien hay que tener en cuenta el factor de simultaneidad como una de las principales características de este accidente, primer ejemplo de fallo de causa común y, por tanto, predecesor de lo ocurrido en Fukushima Daiichi (ver infografía 6).

*Suceso* (4: 00 a.m., 28 de marzo de 1979): El comienzo de TMI-2 se debe a la interrupción del funcionamiento del circuito secundario por la detención de las bombas suministradoras de agua a los generadores de vapor. Denominado «transitorio», este tipo de incidentes puede ocurrir en cualquier instalación nuclear. Tal y como estaba previsto, se conectaron automáticamente las bombas auxiliares de reserva para mantener el flujo de agua, pero sus válvulas se habían quedado cerradas después de un mantenimiento. Aunque la posición de cierre estaba señalizada en el panel de control, su visibilidad era defectuosa y los operarios no repararon en ello hasta ocho minutos después de iniciado el suceso.

*Desconexión de la turbina y el reactor* (0-8 segundos del suceso iniciador): Al cesar el flujo de agua a través de los generadores de vapor, quedó interrumpida la extracción de calor del circuito primario y enseguida subieron la temperatura y presión del agua refrigerante del reactor. Esto provocó que se abriera la válvula electromagnética del presurizador para aliviar la situación, descargando el vapor al tanque de drenaje situado en la parte inferior del edificio de contención. Esta descarga no logró disminuir suficientemente la presión, ya que el calor generado en el núcleo excedía la ya disminuida capacidad de disipación en los generadores de vapor. La presión del circuito primario continuó aumentando hasta el valor de protección automática. Entonces se produjo la parada de la turbina y, ocho segundos después, la reacción de fisión nuclear en cadena fue interrumpida mediante la inserción de las barras de protección en la zona activa.

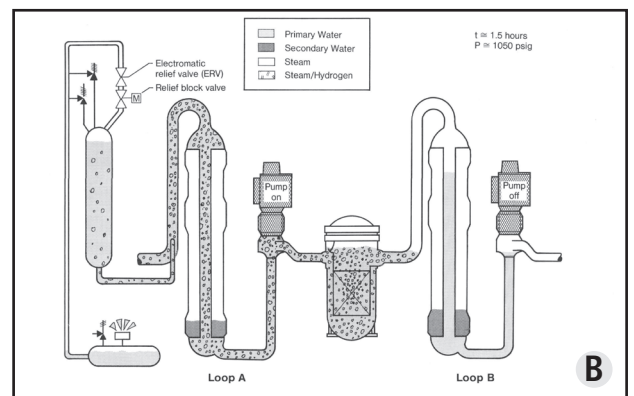
Las bombas de alimentación del circuito primario se mantuvieron trabajando satisfactoriamente, reforzadas por la entrada de sus bombas auxiliares que aumentaron el suministro de refrigerante. Estando el reactor ya detenido, en el sentido de que su reactividad



Del 28 al 30 de marzo de 1979 ocurrió la avería de Three Mile Island o TMI-2 (esquema A), primer accidente superior al diseño base (Beyond Design Basis Accidents, BDBA) en la historia de la energética nuclear. Sus causas y evolución corroboraron las conjeturas probabilísticas del informe WASH-1400 de cuán peligrosas eran las pequeñas pérdidas de refrigerante, pues a partir de ellas podía darse una concatenación de sucesos que condujera a la fusión parcial del núcleo de un reactor PWR por pérdida de la refrigeración (Loss-of-Coolant Accident, LOCA), poniendo en peligro su vasija y la contención radiactiva. Asimismo, puso de manifiesto que ese riesgo obedecía a una razón más profunda: la simbiosis entre el error humano y los fallos intrínsecos a los sistemas tecnológicos complejos, específicamente el llamado «fallo de causa común» (Common-Cause Failure, CCF).

Desde la perspectiva de las ciencias sociales, TMI-2 dio pie a la Teoría de los Accidentes Normales (Perrow, 1984), según la cual un *normal accident* se produce porque una conjunción de fallas triviales en sí mismas se convierte en seria cuando estas interactúan de manera múltiple e inesperada (*complex interactions*) a partir de un suceso o causa inicial que no pudo ser contenido o aislado porque el sistema ha sido diseñado «rígidamente acoplado» (*tight coupling*). Así, la pérdida incontrolada de refrigerante (LOCA) se produjo porque el diseño del circuito primario había sido concebido con arreglo a la operación siempre fiable del presurizador, sin haber previsto que el fallo de sus válvulas de alivio podía conducir a un accidente severo que involucrara al resto del sistema tecnológico y provocara acciones erráticas de los operarios.

Los operarios de TMI-2 enfrentaron síntomas que no lograron descifrar, ya que la coincidencia de la caída de presión en el circuito primario y el aumento del nivel del presurizador no estaba descrita en las normas de operación. Este escenario es abordado en *Analysis of Three Mile Island-Unit 2 Accident* (Nuclear Safety Center, 1980). En la imagen B se muestra cómo a las 1,5 horas de iniciado el accidente, la despresurización del circuito primario se produce por el escape de la mezcla de agua vapor a través del lazo al que está conectado el presurizador (*loop A*), cuya válvula de alivio se quedó abierta. En la imagen C se ilustra como ya a las 2,8 horas tiene lugar el desprendimiento de hidrógeno debido a la oxidación del circonio de las vainas del combustible nuclear por pérdida del enfriamiento (LOCA). Para ese momento también ya estaba ocurriendo la fusión parcial de dichos elementos con liberación de productos radiactivos.







**SUCESO INICIADOR**  
 Detención de las bombas suministradoras de agua a los generadores de vapor por falla mecánica o eléctrica.

Entran en servicio bombas auxiliares de reserva para mantener el fluido de agua al generador de vapor, pero las válvulas de descarga de dichas bombas se habían quedado cerradas después de un mantenimiento.

Aumento de la presión y temperatura del refrigerante (circuito primario) al quedar interrumpida la extracción de calor en los generadores de vapor (circuito secundario).

Aunque la posición de cierre de las válvulas de las bombas auxiliares estaba señalizada en el panel de control, su visibilidad era defectuosa y los operarios no repararon en ello.

Abre válvula electromagnética de alivio del presurizador, descargando el vapor al tanque de drenaje, pero no disminuye suficientemente la presión del circuito primario.

(0 a 8 segundos después del suceso iniciador)

**DESCONEXIÓN DE LA TURBINA Y EL REACTOR**

**FALLO CRUCIAL**  
 La válvula electromagnética de alivio del presurizador no volvió a cerrarse porque se quedó atascada y comenzó la pérdida continua de refrigerante a través de la misma.

Desde los 6 a 20 min de iniciado el accidente, debido a la pérdida del refrigerante por la válvula atascada del presurizador, el circuito primario se vacía parcialmente y su presión decae.

Los operarios no se dieron cuenta de que la válvula de alivio del presurizador seguía abierta, porque recibían una falsa señal de que estaba cerrada. Por tanto, no accionaron una segunda válvula que hubiera solucionado el problema. Solo después de dos horas y 22 minutos fue descubierto este fallo crucial.

Entran en servicio las bombas del sistema de enfriamiento del núcleo de emergencia (ECCS).

Los operadores deciden desconectar el ECCS, al ver que el nivel del agua seguía subiendo en el presurizador. En realidad, el refrigerante escapaba a través de su válvula de alivio atascada y el nivel del agua aumentaba por el arrastre del vapor hacia el tanque de drenaje (ver imagen B).

Despresurización (desde 20 minutos a 2 horas y 22 minutos). El refrigerante hierve hasta convertirse en vapor y, por ese motivo, las bombas de alimentación comienzan a vibrar fuertemente (cavitación).

Los operarios desconectan bombas de alimentación del circuito primario para que no se destruyan. A las 2 horas y 22 minutos, los operarios por fin reparan en que la válvula del presurizador se había quedado abierta y la cierran.

**LOCA**  
 por inhabilitación total del sistema de refrigeración del núcleo.  
 Desprendimiento de hidrógeno debido a la oxidación del circonio de las vainas de combustible (ver imagen C).

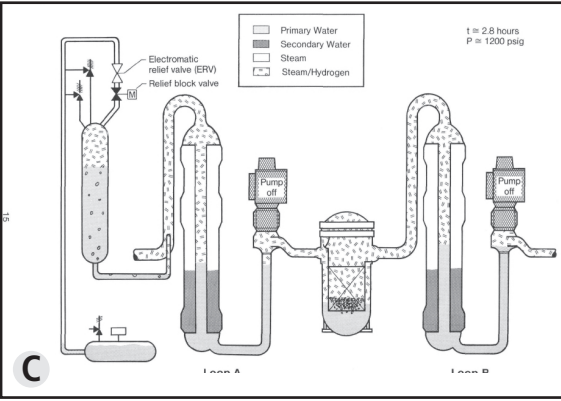
**FUSIÓN PARCIAL DEL NÚCLEO DEL REACTOR**  
 (entre 2 y 6 horas después de iniciado el accidente).  
 La ruptura de las vainas del combustible dio lugar a que los productos de fisión pasaran al agua del circuito primario. A medida que escapaba a través del presurizador, este refrigerante altamente radiactivo fue desbordándose hacia el contenedor y los edificios del reactor y de los servicios auxiliares.

**DECRETADA FASE DE EMERGENCIA**  
 (tres horas y 30 minutos después de iniciado el accidente), cuando fueron detectados altos niveles de radiación. Los esfuerzos se concentran en la recuperación de la circulación del refrigerante del núcleo con ayuda del ECCS.

Mientras se trata de recuperar la refrigeración del núcleo (6 -16 horas), sigue teniendo lugar el desprendimiento de hidrógeno y su acumulación en la parte superior de la vasija.

**DESCUBRIMIENTO DE BURBUJA DE HIDRÓGENO**  
 Su presencia en el interior de la vasija del reactor hizo que se valorara una explosión de esos gases que no solo destruyera ese recipiente, sino la estructura de la contención radiactiva, o sea, la barrera final.

El domingo 1ro de abril, poco después de la visita del presidente estadounidense James Carter a la planta, los expertos determinaron que la burbuja no podía ser inflamable o explosiva debido a la falta de oxígeno libre en la vasija. Durante ocho días tuvo lugar el complejo proceso de venteo o liberación controlada de esos gases radiactivos al exterior para excluir el estallido.



era cero, la refrigeración se mantuvo —tal y como estaba previsto— para absorber el calor debido a la desintegración radiactiva del combustible. Hasta aquí la avería hubiera concluido si no hubiera sucedido el principal fallo técnico: cuando la presión del circuito primario se normalizó, la válvula de alivio del presurizador no volvió a cerrar porque se quedó atascada y comenzó la pérdida continua de refrigerante a través de la misma. Los operarios no se dieron cuenta porque recibían una señal que hacía creer que dicha válvula electromagnética estaba cerrada y, por tanto, no accionaron una segunda válvula que hubiera solucionado el problema. Solo después de dos horas y 22 minutos fue descubierto este fallo crucial.

*Pérdida de refrigerante* (desde los 6 a 20 minutos de iniciado el accidente): Durante ese lapso de tiempo, el circuito primario se fue vaciando parcialmente y, como consecuencia, la presión decayó hasta tal punto que se pusieron en marcha las bombas del sistema emergente de enfriamiento del núcleo (ECCS). No obstante, los operadores decidieron desconectarlas, ya que el nivel del agua seguía subiendo en el presurizador. Al guiarse por este indicador, ellos creían erróneamente que el circuito primario estaba demasiado lleno. Temían que, al desaparecer el colchón de vapor, no se pudiera compensar la presión y la vasija del reactor se resquebrajara. En realidad ocurría todo lo contrario: el refrigerante escapaba a través de la válvula atascada del presurizador, cuyo nivel aumentaba por el arrastre del vapor hacia el tanque de alivio.

*Despresurización* (desde los 20 minutos a dos horas y 22 minutos): Los operadores se enfrentaban con síntomas que no lograban descifrar, ya que la coincidencia paradójica de la caída de presión en el circuito primario y el aumento del nivel del presurizador no estaba descrita en las normas de operación. Tampoco podían saber cuál era realmente el nivel de agua dentro de la vasija del reactor, pues no había sido previsto un instrumento que lo midiera. La presión siguió cayendo y el agua comenzó a hervir hasta convertirse en vapor. Por este motivo, las bombas de alimentación comenzaron a vibrar fuertemente (cavitación) y hubo que desconectarlas.

A partir de este momento, el agua que se perdía por la descarga del presurizador no era remplazada y el accidente empezó a tomar un carácter severo, ya que estaba en curso un LOCA con inhabilitación total del sistema de refrigeración del núcleo. Comienza el desprendimiento de hidrógeno por la oxidación del circonio de las vainas de combustible. Esto contribuyó a la formación de una burbuja de gases en la parte superior de la vasija del reactor que desplazó el agua hacia el presurizador, creando aún más la ilusión de que el primer circuito estaba completamente lleno. Una vez que los operadores repararon por fin en que la válvula del presurizador se había quedado abierta —dos horas y 22 minutos después de haberse iniciado el LOCA—, luego de cerrarla, los mayores esfuerzos se centraron en la recuperación de la circulación del refrigerante del núcleo con ayuda del ECCS.

*Fusión parcial del núcleo del reactor* (entre las 2 y 6 horas después de iniciado el accidente): El desprendimiento de gases y su acumulación en la parte superior de la vasija impedía que tuviera lugar la circulación natural del refrigerante, ya convertido en una

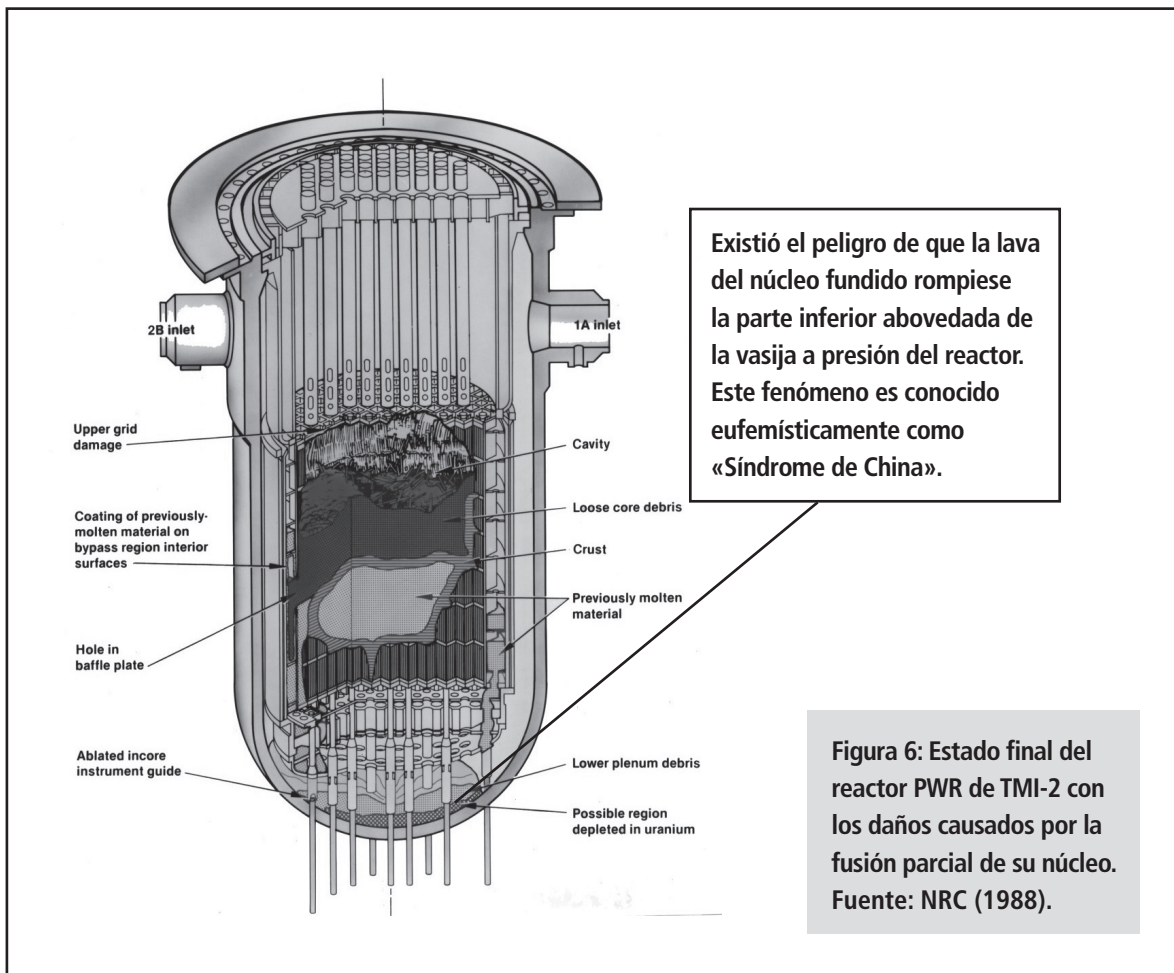
mezcla de agua, vapor e hidrógeno. La temperatura en la parte alta de la zona activa subió por encima de 2 200 °C y los elementos de combustible comenzaron a derretirse. Años más tarde, en 1985, al poder acceder al interior del reactor dañado, se descubrió que aproximadamente la mitad de núcleo se había fundido en las primeras horas del accidente, pero en ese momento nadie sospechó que algo así pudiera estar ocurriendo (Cole *et al*, 1990). La ruptura de sus vainas de circonio dio lugar a que los productos de la fisión pasaran al agua del circuito primario. A medida que escapaba a través del presurizador, este refrigerante altamente radiactivo fue desbordándose hacia el contenedor, el edificio del reactor y los locales de los servicios auxiliares. Todos esos espacios quedaron contaminados por la radiactividad, que más tarde fue parcialmente liberada al exterior. La fase de emergencia fue decretada a las tres horas y 30 minutos de iniciado el accidente, cuando fueron detectados altos niveles de radiación en toda la instalación.

*Refrigeración del núcleo (6-16 horas):* Con tal de recuperar la circulación de refrigerante a través del núcleo del reactor, se maniobra para presurizar y despresurizar el circuito primario hasta que se logra estabilizar la situación termohidráulica y pueden ser conectadas las bombas de alimentación, manteniéndolas en servicio. A las nueve horas y 50 minutos subió la presión en el edificio de contención presumiblemente por una explosión del hidrógeno acumulado, pero enseguida actuó el sistema automático de rociado (*spray*) y fue mitigada esa amenaza.

*Burbuja de hidrógeno (1-8 días):* La presencia de esos gases pasó a primer plano cuando se descubrió finalmente que en la parte superior de la vasija había una gran burbuja de hidrógeno. Los expertos valoraron que podía explotar y romper no solamente la vasija, sino la estructura de contención radiactiva, o sea, la barrera final. El domingo 1ro de abril, poco después de la visita a la planta del presidente estadounidense James Carter, ingeniero nuclear de profesión, la NRC determinó que la burbuja no podía ser inflamable o explosiva debido a la falta de oxígeno libre en la vasija a presión del reactor. Durante ocho días tuvo lugar el complejo proceso de venteo o liberación controlada de los gases radiactivos al exterior para evitar el estallido. La resolución de la cuestión de la burbuja puso fin a la fase aguda de la crisis de TMI-2.

Aunque ocurrió la fusión parcial del combustible nuclear, la vasija del reactor y el sistema de contención resistieron el embate; o sea, en principio, funcionaron *in extremis* esa tercera y cuarta barreras físicas de la defensa en profundidad, aunque existió el peligro de que la lava del núcleo fundido rompiera la parte inferior abovedada de dicha vasija (ver figura 6). Esta posibilidad de ruptura es conocida eufemísticamente a partir de entonces como «síndrome de China» por la película homónima, estrenada el 16 de marzo de 1979, sólo doce días antes de producirse el accidente (Balogh, 1991).

La avería de Three Mile Island puede considerarse el primer episodio público de la gestión del riesgo nuclear y radiológico en condiciones de incertidumbre radical. Puso de manifiesto las contradicciones entre los propios expertos al valorar la magnitud del accidente y, por tanto, su incapacidad de comunicar con claridad y credibilidad a la sociedad qué estaba sucediendo en realidad. Esto se reflejó en las declaraciones fragmentarias, ambiguas o contradictorias



hechas por la Metropolitan Edison, propietaria privada de la planta, sobre la posibilidad de liberación radiactiva y la incapacidad de la NRC para conformar un plan de emergencia, ya que carecía de mando y autoridad para decirle a esa empresa qué hacer. Por eso las decisiones gubernamentales fueron tomadas apresuradamente en medio de una gran consternación. En un inicio fue decretada la evacuación preventiva de niños y mujeres embarazadas dentro de un radio de cinco millas alrededor de la planta, que luego fue extendiéndose hasta 20 millas e involucró a unas 140 mil personas que emigraron voluntariamente (Walker, 2004). Finalmente algunas cantidades de las formas más peligrosas de radiación volátil como el yodo-131 fueron expulsadas a la atmósfera, si bien desde un principio persisten dudas sobre el carácter y magnitud de esa liberación, así como sus consecuencias sobre la incidencia de cáncer de tiroides y de pulmón a lo largo de los años (Wing *et al*, 1997).

Tratando de ser equilibrado, Walker concluye en su citado libro que Three Mile Island demostró que los partidarios de la energía nuclear habían subestimado la probabilidad de un accidente grave, mientras que los opositores a la energía nuclear habían sobrestimado sus posibles consecuencias. Pero lo cierto es que TMI-2 significó un golpe impresionante para la energética nuclear —estadounidense en particular—, acentuando el dilema entre regulación y promoción que había llevado a la disolución de la U.S. AEC en 1974, o sea, cinco años antes del accidente. Al plantearse la disyuntiva entre ubicación y seguridad de los reactores nucleares, los informes Kemeny y Rogovin influyeron en que se valoraran nuevas

directrices regulatorias para su emplazamiento, proponiendo que fuera en áreas alejadas o remotas, independientemente de cuál fuera su diseño.

A esa misma conclusión arribó el *Report of the Siting Policy Task Force* (1979), el informe realizado por la NRC para recomendar cuáles criterios debían seguirse en lo adelante. Sus principales recomendaciones o metas fueron las siguientes: 1) fomentar que la ubicación (*siting*) sea considerada un factor de la defensa en profundidad, estableciendo requisitos de aprobación del sitio, independientemente de cuál sea el diseño de la planta; 2) considerar los accidentes superiores a la base de diseño para establecer la densidad de población y criterios de distribución alrededor de la instalación, y 3) exigir que los sitios seleccionados se atengan al hecho de que siempre existe un riesgo residual durante la explotación. De esta manera, se renunciaba totalmente a compensar el riesgo de emplazamiento en una zona poblada con la introducción de mayores soluciones ingenieriles de seguridad, aduciendo que esta prerrogativa había sido mal interpretada. Asimismo, dicho informe recomendó abandonar el concepto de LPZ (Low Population Zone), zona de baja población, por una más extensa, denominada Zona de Planificación de Emergencia (Emergency Planning Zone, EPZ). En lo adelante, los planes de evacuación debían ser aprobados como condición previa, antes de conceder la licencia de construcción de las centrales nucleares (Allende Landa, 1984).

Una relectura de ese documento arroja grandes similitudes con las recomendaciones internacionales emitidas después de Fukushima Daiichi, y lo mismo provoca otro de los informes del NRC sobre Three Mile Island: el *TMI-2 Lessons Learned Task Force Final Report* (1979). Este plantea como cuestión fundamental la interrelación entre diseño y operación de las plantas nucleares con vistas a la revisión de su proceso de licenciamiento. Al referirse a la defensa en profundidad propone que sea reglamentada la posibilidad de ventilación filtrada del recinto de contención radiactiva como una de las acciones de mitigación para los accidentes con fusión del núcleo. Este criterio no fue previsto en las centrales nucleares japonesas y, en cierta medida, se considera que su omisión incidió en el desastre de Fukushima-Daiichi (Sugiyama y Narabayashi, 2011). De modo que cabe un paralelo entre ambos accidentes en lo que respecta a la efectividad de la DiD en los reactores de segunda generación. Si en TMI-2 el sistema de barreras físicas resistió *in extremis*, en el caso de Fukushima Daiichi quedó demostrada su vulnerabilidad, agravada por el riesgo que entraña la ubicación de las plantas japonesas en una zona de alta actividad sísmica (ver subcapítulo 2.5).

Como primer accidente nuclear que superó las bases de diseño, Three Mile Island condujo a una revalorización del análisis de la seguridad en la tradición ingenieril —estadounidense en particular—, elevando su estudio a un nuevo estadio epistemológico caracterizado por el reconocimiento de la complejidad como condición inherente a los sistemas tecnológicos. En primer lugar, quedó comprobada la necesidad de Evaluación Probabilista del Riesgo (PRA), tal y como había propuesto el informe Rasmussen, sobre todo aplicándola a la identificación del fallo de causa común. Este tiene lugar cuando fallan dos o más estructuras, sistemas o componentes debido a un único suceso o causa específica, ya sea de origen interno o externo, como puede ser el desperfecto de un mecanismo o hasta un tsunami. Y algo muy importante:

ese fallo común puede provocarse al tratar de añadir elementos redundantes con el fin de aumentar la seguridad, creándose un efecto contraproducente porque se ha complejizado aun más el sistema tecnológico (Hagen, 1980).

Durante los sucesos de TMI-2, entre el cúmulo de anomalías que pudieran considerarse potencialmente causales del accidente, sobresale el fallo crucial de la válvula de alivio del presurizador como causa específica que provocó la pérdida de refrigerante (LOCA). A partir de ese momento se sucedieron las demás acciones que condujeron a la fusión parcial del núcleo, como fue la decisión de desconectar el sistema de refrigeración de emergencia. Aquel fallo tecnológico (válvula atascada) provocó que se crearan modelos mentales incorrectos debido a las falsas indicaciones de los instrumentos y otras complicaciones de la interfase hombre-máquina como la demasía de alarmas y señalizaciones. En consonancia, el informe Rogovin concluyó que los errores humanos no se debieron a la ineptitud de los operadores, sino a las insuficiencias en el diseño del equipamiento, en la presentación de la información, en los procedimientos de emergencia y en la falta de capacitación. Sin embargo, el informe Kemeny concluyó que la principal causa de TMI-2 fue el factor humano y no el equipamiento.

### 2.3.2/ *Accidentes normales, alta fiabilidad y comportamiento humano*

A tenor con esa ambivalencia de los propios expertos nucleares, surgen entonces las dos principales reflexiones teóricas o escuelas de pensamiento sobre las causas de los accidentes desde el ámbito de las ciencias sociales: la Teoría de los Accidentes Normales (Normal Accident Theory, NAT) y la Teoría de las Organizaciones de Alta Fiabilidad (High Reliability Organizations Theory, HROT), enunciadas por sus dos respectivos autores: Charles Perrow y Tod La Porte en una obra colectiva dedicada a la dimensión humana de Three Mile Island (Sill *at al*, 1982). Ambos habían sido miembros de la comisión convocada a petición del presidente Jimmy Carter para esclarecer las causas de aquellos sucesos. Mientras que Perrow argüye que TMI-2 fue un accidente «inesperado, incomprensible, incontrolable e inevitable» (Perrow, 1982: 175), La Porte plantea que la energética nuclear no puede desarrollarse mediante el método de ensayo y error; por eso está obligada a comportarse —si puede lograrlo— como un sistema organizacional libre de error (Nearly Error-Free Organizational System). Posteriores aportes teóricos subrayarán las divergencias y confluencias entre estas dos propuestas, reflejando la tensión permanente entre las cuestiones técnicas y las cuestiones organizacionales durante la evaluación y gestión del riesgo tecnológico. Su principal desacuerdo ha sido en torno a si pueden ser evitados los accidentes de potencial catastrófico: la HROT sostiene que sí; la NAT insiste que no

La tesis fundamental de la NAT es intratécnica: los accidentes ocurren debido a que su origen causal es consustancial a los sistemas tecnológicos complejos. Un *normal accident* se produce porque una conjunción de fallas triviales en sí mismas se convierte en seria cuando estas interactúan de manera múltiple e inesperada (*complex interactions*) a partir de un suceso o causa inicial que no pudo ser contenido o aislado porque el sistema ha sido diseñado «rígidamente acoplado» (*tigh coupling*). Así, en Three Mile Island, la pérdida incontrolada

de refrigerante (LOCA) se produjo porque el diseño del circuito primario fue concebido con arreglo a la operación siempre fiable del presurizador, sin tener en cuenta que su válvula de alivio podía fallar. Este tipo de complejidad conduce a que las organizaciones responsabilizadas se enfrenten a irreconciliables paradojas estructurales dictadas por la propia tecnología (Perrow, 1984). Desde el enfoque de la NAT, el análisis del riesgo tecnológico se vería más como una actividad orientada a mantener el funcionamiento del sistema tecnológico complejo que a la prevención de los accidentes, pues siempre existe la posibilidad de que alguno supere las bases de diseño. Esto explicaría que sean *normal accidents*, en el sentido de inevitables, aunque deparen sorpresas tecnológicas a los propios expertos.

En contraposición a esa inexorabilidad «fatalista» de los accidentes normales, los partidarios de la HRTO se dedicaron a estudiar aquellas organizaciones de alto riesgo (*high risk organizations*) que trabajan mucho mejor que lo esperado, como es el caso de las controladoras de tráfico aéreo (Bourrier, 2011). Según una de las más conocidas propuestas de la HRTO, resulta posible gestionar las tecnologías complejas si se crea una organización de alta fiabilidad que combine descentralización, redundancia y flexibilidad hasta crear un estado colectivo del «ser consciente de» (*mindfulness*) (Weick y Sutcliffe, 2001). Este se produce cuando la organización es capaz de afrontar lo impredecible a través de cinco procesos: 1) preocupación por los fracasos en lugar de los éxitos; 2) la renuncia a simplificar las interpretaciones de la realidad; 3) la sensibilidad a las operaciones; 4) el compromiso con la resiliencia, y 5) la deferencia hacia el conocimiento práctico (de expertos), fomentando un sistema fluido de toma de decisiones.

Manteniendo ese «estado de alerta» a todos los niveles de la organización, sería posible discernir el significado de las señales débiles que, emitidas en la primera etapa de un conflicto, se confirman como indicadoras inequívocas de un peligro. De esta manera, la toma de decisiones podría antecederse a lo inesperado, y lo que es muy importante: dichas organizaciones deberían también ser capaces de solventar las situaciones creadas por los hechos imprevistos, una vez ocurridos, recuperándose de las consecuencias de los errores humanos, si estos fueron cometidos. Esta capacidad de resiliencia podría lograrse mediante la toma de decisiones por parte de quienes tienen los conocimientos requeridos de la situación, independientemente del lugar que ocupen en la jerarquía de la organización. La propuesta fundamental de la HRTO es que resulta posible establecer conexiones entre las nociones de *high risk organizations* y *high reliability organizations*, sobre la base de que ambos criterios comparten un enfoque común: la teoría de las organizaciones.

Al complementarse entre sí, la NAT y la HROT sirven como una contrapartida de los científicos sociales a la implementación acrítica de la evaluación probabilista del riesgo y/o la seguridad (PRA y/o PSA) por parte de los expertos nucleares. A esas dos propuestas teóricas se sumaron los aportes del Análisis de la Fiabilidad Humana (Human Reliability Analysis, HRA), principalmente los dedicados a la taxonomía del error humano (Reason, 1990a) y a la ingeniería de sistemas cognitivos (Rasmussen, 1986). Estos estudios cobraron gran interés entre ingenieros y psicólogos como respuesta a la tendencia justificativa de

atribuir la responsabilidad de los accidentes únicamente a la ineptitud de los operarios/ explotadores de la tecnología. Si ya esto había ocurrido durante Three Mile Island, aunque se reconocieran algunas dificultades del equipamiento, el desastre de Chernobyl obligó a profundizar en la interacción del hombre con la máquina —o sea, el reactor nuclear—, así como la importancia del contexto en que los operadores de primera línea ejercen su actividad, incluidos los factores socioculturales e ideológicos.

Con el fin de evaluar el comportamiento humano como causa de riesgo tecnológico, fueron creadas varias metodologías para aplicarlas indistintamente en la esfera industrial, pero entendiéndose a la postre que un abordaje que privilegie solo el error humano como causa fundamental de los accidentes, no esclarece sino que —por el contrario— oscurece la comprensión de cómo estos ocurren, o lo que es peor: oculta sus verdaderas causas. Es por eso que se fue produciendo un abandono de la perspectiva individual de la fiabilidad humana hacia un reconocimiento de que «hemos entrado en la era del accidente organizativo» (Reason, 1990b: 18)<sup>7</sup>. Sobre esa base, la High Reliability Organizations Theory (HRTTO) incorporó los resultados del Human Reliability Analysis (HRA), desarrollándose el concepto de «cultura de la seguridad en las organizaciones» (*organisational safety culture*) (Reason, 1997; Hopkins, 2007). Este enfoque organizacional y cultural ha interiorizado las propuestas intratécnicas de la Normal Accident Theory (NAT) para subrayar las llamadas «paradojas de la seguridad», en el sentido de que las defensas, barreras físicas y salvaguardias no solo protegen un sistema, sino que también pueden provocar su catastrófica descomposición (Rijpma, 1997; Reason, 2000). Esto se explica porque la interrelación entre complejidad, acoplamiento rígido y fiabilidad puede generar tres tipos de problemas:

- 1) el problema *trade-off* (o lo uno o lo otro), cuando la organización se encuentra ante el conflicto de priorizar las exigencias de producción o velar por su protección;
- 2) el problema del control, cuando las normas previstas de operación resultan inapropiadas o extemporáneas en determinados contextos de actuación, y
- 3) el problema de la «opacidad», cuando la defensa en profundidad y sus sistemas redundantes pueden ocultar un peligro latente o inducir una falsa seguridad en los mantenedores y operadores del sistema.

Nuestra categoría de «sorpresa tecnológica» se fundamenta en que esas «paradojas de la seguridad» no se conocen hasta que haya ocurrido el accidente superior a la base de diseño (BDBA), de lo contrario perdería sentido definirlo como tal, ya que su posibilidad de ocurrir sería prevista de antemano. A partir de esa triada problemática puede explicarse el trasfondo del accidente de Chernobyl, cuyas causas tecnológicas otorgan un significado más profundo a la complejidad interactiva señalada por la NAT. A la complejidad recóndita y paradójica del RBMK-1000 como prototipo dual (civil y militar) se debía que, «a pesar de sus años de funcionamiento, no todos los aspectos de la física nuclear se conocieran completamente» (Sagan, 1993, 34).(Sagan, 1993: 34; Weick y Sutcliffe, 2007).

---

<sup>7</sup>Es referencial el «modelo de queso suizo» (Swiss Cheese Model, SCM) del psicólogo James Reason, elaborado con la colaboración del ingeniero nuclear John Wreathall. Su idea es que las barreras de defensa de una organización son como rebanadas con huecos, cuyo alineamiento momentáneo facilita la posibilidad de accidente (Larouzée, 2017)).



#### 2.4/ *Chernobyl: primera catástrofe sociorradioecológica de magnitud global*

La madrugada del sábado 26 de abril de 1986, explotó el reactor del cuarto bloque de la Central Electronuclear (CEN) de Chernobyl, situada en la periferia de la ciudad de Pripyat, a orillas del río homónimo, a 12 km de la ciudad de Chernobyl y 109 km de Kiev, capital de Ucrania, entonces una de las quince repúblicas de la Unión Soviética. Las causas tecnológicas del desastre tardaron en esclarecerse y, a lo largo de los años, han coexistido de manera confusa versiones oficiales ya superadas, con otras de índole especulativa como las hipótesis del sabotaje y las geofísicas, incluidos los efectos de un sismo (Abramov *et al*, 2006). Igualmente sus consecuencias radiológicas a corto, mediano y largo plazo han sido evaluadas de manera contradictoria —y hasta antagónica—, tanto desde el punto de vista biológico como psicológico, social, etc. Más adelante se analizará cómo la exposición a la radiación artificial afectó a Bielorrusia, Ucrania, Rusia y parte de Europa Occidental (ver capítulo 3). Al ser la primera catástrofe sociorradioecológica de magnitud global (Babosov, 1996), Chernobyl significó un nuevo estadio en la comprensión del carácter único del riesgo nuclear y radiológico.

Debe considerarse este subcapítulo el más importante fundamento intratécnico de nuestra tesis doctoral, al considerar que Chernobyl es el ejemplo paradigmático de los dilemas morfogenéticos de la energética nuclear. Aquí abordamos las posibles causas tecnológicas de ese accidente severo con arreglo a las dos versiones oficiales del Grupo Internacional Asesor sobre Seguridad del OIEA: sus informes INSAG-1 (IAEA, 1986) e INSAG-7 (IAEA, 1992). A esas versiones contraponemos las conclusiones del libro *Chernobyl. La venganza del átomo pacífico*, escrito por el ingeniero físico Nikolai Vasílevich Karpan (2005), quien trabajó en esa central atómica y ha historiado la tragedia como investigador independiente. Estas fuentes ayudan a comprender cuán tremendamente complejo resulta evaluar ese desastre nuclear en retrospectiva, por lo que hasta hoy perviven dos puntos de vista irreconciliables: la justificación de los proyectistas/constructores del RBMK-1000, quienes achacan la responsabilidad del accidente a los errores de operación («versión termohidráulica»), y la réplica de los explotadores, que lo atribuyen a las graves deficiencias constructivas de ese prototipo de reactor nuclear («versión neutrónica»), incluido su sistema de control y protección.

Desde nuestra perspectiva intratécnica, mantendremos una posición equidistante con respecto a esas dos visiones antagónicas, considerando que una serie de factores epistémicos impide esclarecer totalmente ese accidente superior a la base de diseño (BDBA). Difícilmente el científico social pueda dilucidar problemas técnicos que resultan debatibles y polémicos hasta para los propios expertos nucleares. Aun así, es posible analizar la avería de Chernobyl como ejemplo paradigmático de las ya mencionadas «paradojas de seguridad», siguiendo las aportaciones de la NAT (Perrow, 1984; 1999) y de los enfoques organizacional y cultural de la HROT y el HRA, respectivamente (Reason, 2000). Tanto Perrow como Reason analizaron dicho accidente, pero cometieron el error de asumir como válidas las primeras versiones oficiales sobre sus causas tecnológicas y el papel decisivo del factor humano. También suscita

dudas que dichos autores establezcan similitudes genéricas entre la energética nuclear y otras esferas tecnológicas —aeronáutica, por ejemplo—, obviando que tienen complejidades distintas. Aun así, el enfoque combinado de la NAT, la HROT y el HRA es un intento fructífero para asomarse a los grandes accidentes nucleares históricos desde las ciencias sociales. Con su ayuda se comprende mejor el problema de la atribución de responsabilidades entre los propios expertos durante la evaluación de sus fracasos (Hilgartner, 2009).

Ningún BDBA es igual a otro. Existen diferencias cruciales entre TMI-2 y Chernobyl que dificultan definir a este último como un *normal accident*, comparándolo con el primero. La causa tecnológica principal de TMI-2 fue de carácter termohidráulico: la interrupción y pérdida incontrolada del suministro de refrigerante (LOCA) a causa del «fallo de causa común», que por primera vez se ponía de manifiesto en la esfera nuclear. Hay bastante consenso entre los expertos de cuál fue el suceso inicial, el fallo crucial y cómo se produjo la secuencia accidental hasta provocar la fusión parcial del reactor nuclear, aunque se discutan los supuestos errores humanos. En el caso de Chernobyl, además del factor termohidráulico, se trató de una sorpresa tecnológica profundamente relacionada con las aplicaciones ingenieriles de la física neutrónica, la construcción del reactor nuclear y el diseño de su sistema de control y protección. Por eso perduran diferentes versiones sobre cuál pudo ser el suceso iniciador y cómo evolucionó el accidente.

Aquí nos atenemos en principio a la tesis genérica de la supercriticalidad incontrolada del reactor RBMK-1000 debido a factores físicos (neutrónicos y termohidráulicos), estrechamente interrelacionados e inseparables. El reactor nuclear se «aceleró» neutrónica y térmicamente; no hubo manera de frenarlo y, lo que es peor, cuando se intentó pararlo, todo hace indicar que las barras de control y protección (sus «frenos») lo aceleraron aún más. Las potencias térmica y neutrónica se incrementaron de manera exponencial en unos pocos segundos, sin que hasta hoy día se tenga una versión concluyente sobre la secuencia que condujo al desenlace catastrófico: una, dos o más explosiones cuyo carácter sigue en disputa por los expertos, si fueron de origen térmico o nuclear. Tampoco está suficientemente claro qué cantidad de productos radiactivos fueron lanzados a la atmósfera.

Paradójicamente, el accidente de Chernobyl se produjo durante la realización de un experimento cuyo objetivo era incrementar la defensa en profundidad de la instalación. Su propósito era averiguar cuánto tiempo continuaría generando energía eléctrica por inercia uno de sus dos turbogeneradores de 500 MWe, mientras se frenaba su rotor, una vez le fuera cortada la afluencia de vapor. Este remanente de energía quería aprovecharse para garantizar el suministro de electricidad a las bombas del circuito refrigerante (circulación y alimentación) del RBMK-1000, cubriendo el período de 35 segundos que demorarían en hacerlo las fuentes eléctricas de emergencia (generadores diésel). Esto se consideraba importante en caso de producirse la pérdida total de energía eléctrica desde el exterior o *blackout*, como sucedió años después en Fukushima Daiichi. Aunque hoy parece descabellado, era un experimento relacionado con la gran problemática de la energética nuclear: la necesidad de mantener ininterrumpidamente la refrigeración del núcleo del reactor para evitar la fusión de sus

elementos de combustible. Con tal de ejecutar dicha prueba se aprovechó que el cuarto bloque saldría de servicio para un mantenimiento capital.

Adoctrinados en el axioma de que los reactores nucleares no explotan, ya que ninguna normativa de seguridad se refería a esta posibilidad ni remotamente, los expertos soviéticos debieron explicarse a sí mismos por qué sucedió «lo imposible» para transmitirlo al resto de la comunidad tecnocientífica nuclear en el mundo<sup>8</sup>. Esto exigía reconstruir la secuencia del accidente y determinar cómo pudo estallar el RBMK-1000, que hasta ese momento era elogiado como un logro de la ciencia soviética (Petrosian, 1985). Ante la presión internacional, del 25 al 29 de agosto de 1986 se celebró una reunión en Viena, en la sede del OIEA, para escuchar qué había sucedido. En nombre de la delegación rusa, el académico Valeri Aleksévich Legásov presentó el documento «Información sobre el accidente de Chernobyl y sus consecuencias, preparada para el OIEA», basado en las conclusiones de una comisión gubernamental para el estudio de las causas de esa avería y la ejecución de las actividades de emergencia y rehabilitación necesarias. Publicada en la revista *Atomnaya Energiya* (Abagyan, 1986), esa primera investigación de las causas del accidente establece un correlato entre las acciones de los operadores, declaradas por ellos mismos como protagonistas o testigos; la información técnica registrada por los sistemas computarizados, a duras penas recopilada, y un modelo matemático para integrar estas evidencias. Su conclusión fue la siguiente:

El principal motivo de la actuación del personal fue el deseo de terminar el experimento. La violación del orden establecido para la preparación y realización de las pruebas, la violación del propio programa del experimento, la negligencia en el manejo del reactor nuclear testimonian que el personal no entendía suficientemente las características de los procesos que ocurren en el reactor nuclear y habían perdido el sentido del peligro. Los operadores de la instalación nuclear no tuvieron en cuenta los sistemas defensivos de protección capaces de evitar la avería, haciendo coincidir la desconexión intencional de los medios técnicos de defensa con la violación del reglamento de explotación, considerando que esa combinación de eventos era imposible. Por lo tanto, la causa principal del accidente fue una combinación extremadamente improbable de violaciones de los procedimientos por parte del personal de operación de la central (Abagyan, 1986: 15).

Este dictamen fue refrendado por el Grupo Asesor Internacional de Seguridad Nuclear (INSAG por sus siglas en inglés), creado para asesorar al director general del OIEA. Los mismos términos del documento soviético fueron reproducidos en el INSAG-1, primer informe público de esa agrupación experta. La completa atribución de la responsabilidad a los operadores propició que estos fueran condenados a duras penas de prisión en un juicio sesgado donde no hubo nadie que estuviera de su parte y los

---

<sup>8</sup> El autor de esta tesis doctoral perteneció al último grupo de estudiantes extranjeros del Instituto Energético de Moscú que estuvo en la CEN de Chernobyl, realizando sus prácticas de cuarto año de la carrera Centrales Atómicas e Instalaciones. Unos meses después ocurrió el accidente y, como alumnos, fuimos testigos del gran desconcierto que cundió entre nuestros profesores al no poder explicar por qué había explotado el RBMK-1000 (Calcines, 1996).

defendiera de las imputaciones (Karpan, 2005). Sin embargo, varias cuestiones quedaban en tinieblas. Para sorpresa y dolor de esos hombres, quienes sufrieron dosis mortales de radiación, su obstinación en realizar aquel experimento había devenido trágicamente la prueba de que un reactor electronuclear podía explotar, algo que sucedía por primera vez en la historia. Si bien el desastre podía ser achacado a un dislate humano, el informe gubernamental soviético y su corroboración por el INSAG-1 habían funcionado como un test del RBMK-1000 que debía ser continuado. ¿Cómo es posible que este modelo de reactor nuclear fuera desestabilizado por sus operarios hasta hacerlo estallar como una bomba? ¿Y si hubiera sido un sabotaje o —como se diría hoy día— un acto terrorista?

Como una revisión total del INSAG-1, más que un complemento, el INSAG-7 intenta responder a esas interrogantes a partir de otros dos informes soviéticos también oficiales, ambos fechados en 1991; o sea, cinco años después de la catástrofe: el informe de la comisión gubernamental de la URSS para la supervisión de las mejoras de seguridad introducidas en la industria y energética nucleares, y el informe con los resultados de una modelación matemática más rigurosa del accidente. Esta última fue implementada por un grupo de especialistas de varios centros: el Instituto de Energía Atómica I. V. Kurchátov, el Instituto de Investigaciones Científicas y Constructivas de la Técnica Energética (NIKIET, por sus siglas en ruso), el Instituto Nacional de Investigación Científica para la Explotación de las Centrales Nucleares (BNIIAES) y el Instituto de Investigaciones Nucleares de Kíev de la Academia de Ciencias de Ucrania.

Con esa nueva información, los expertos del OIEA publican el INSAG-7 en 1992, cuando ya se había producido la desintegración de la URSS hacía poco menos de un año, en diciembre de 1991. A ese colapso socioeconómico que decidió la Guerra Fría contribuyó también la catástrofe de Chernobyl, provocando el descrédito del sistema científico nuclear soviético. Es lo que rezuma el INSAG-7 en su penúltimo apartado, titulado «Observaciones generales sobre la falta de cultura de la seguridad»:

En su informe sobre el accidente de Chernobyl [INSAG-1], el Grupo Internacional Asesor sobre Seguridad del OIEA (INSAG) introdujo el nuevo término “cultura de la seguridad” que describe el modo de seguridad que debe existir en una planta nuclear. En un informe posterior, INSAG-4, titulado “La cultura de la seguridad”, este concepto ha sido desarrollado y el INSAG ha seguido el comportamiento de la cultura de la seguridad desde su consolidación inicial en el régimen jurídico nacional relacionado con la seguridad nuclear [...] En la discusión previa se ha señalado repetidamente que el régimen de explotación en la CEN de Chernobyl se caracterizaba por su bajo nivel de cultura de la seguridad. De acuerdo con las opiniones expuestas en INSAG-4, el INSAG apoya la opinión actualizada de que en la Unión Soviética, antes del accidente de Chernobyl, no había una apropiada cultura de la seguridad. Muchos de los requisitos de la cultura de la seguridad existían en los reglamentos, pero no se cumplían en la práctica. Muchas otras cuestiones esenciales no existían en lo absoluto. Las prácticas dentro de las centrales nucleares, y la experiencia de Chernobyl no se diferenciaba de las demás, carecían de los componentes de la cultura de la seguridad (INSAG, 1992: 27).

Cada uno de estos informes del OIEA sobre las causas de Chernobyl tributa a dos épocas distintas: el antes y el después de la desintegración de la Unión Soviética. El INSAG-1 responde a los intereses de los proyectistas y constructores del RBMK-1000 cuando todavía estos renombrados expertos soviéticos pueden salvar su responsabilidad, inculcando a los operadores de la planta en consonancia con el pretexto de salvaguardar el prestigio internacional de su país. Ya desintegrada esa potencia mundial, el INSAG-7 sistematiza las nuevas informaciones recibidas sobre el accidente como colofón del proceso que, desde 1989 a 1991, puso al descubierto las interioridades de su sistema tecnocientífico nuclear, exponiéndolas a la experticia de los homólogos extranjeros (Schmid, 2015).

Este segundo informe del OIEA funciona con un propósito ambivalente: mantiene la responsabilidad de los operadores/explotadores, pero reconoce que las verdaderas causas tecnológicas del desastre son las graves deficiencias constructivas del reactor. No se limita a esclarecer por qué explotó el RBMK-1000, sino que aprovecha para enjuiciar a toda la energética nuclear en la Unión Soviética, empleando el nuevo concepto de «cultura de la seguridad». Introducido por primera vez en el INSAG-1, este término fue conceptualizado en el INSAG-4 para aplicarlo concretamente a la experiencia de Chernobyl (IAEA, 1991). A estos documentos del OIEA se sumó la Escala Internacional de Sucesos Nucleares (INES por sus siglas en inglés), puesta en vigor desde 1990 para clasificar retroactivamente los incidentes y accidentes en siete niveles (IAEA, 1990). El séptimo y máximo nivel es adjudicado a Chernobyl, seguido por Kyshtym con nivel 6, y después vienen Windscale y Three Mile Island, ambos con nivel 5.

Aunque aparentan ser neutrales en la consecución de sus objetivos, todos los documentos mencionados —sin exclusión— evidencian el trasfondo genésico de la energética nuclear como tecnología inherentemente política que siempre soslaya con toda intención su vínculo militar primigenio. Es así que, al descalificar a la rama atómica en la URSS, el análisis de Chernobyl omite la cuestión fundamental: el RBMK-1000 fue concebido para la producción simultánea de energía eléctrica y plutonio con fines bélicos. Sin tener en cuenta este factor del doble uso (militar y civil) resulta imposible entender por qué ese modelo de reactor explotó. No obstante, sobre este aspecto no se hace ninguna referencia explícita en los informes gubernamentales soviéticos y ex-soviéticos, ni tampoco en los del OIEA. A continuación nos acercamos a los orígenes históricos del RBMK-1000 y, más adelante, exponemos las complejidades relacionadas con la explicación de las causas tecnológicas de Chernobyl, guiándonos por el INSAG-7. Nuestro propósito es aquilatar la trascendencia del doble uso (militar y civil) en la concepción de este aciago modelo de reactor nuclear.

#### *2.4.1/ El RBMK-1000: «cazar dos liebres de un tiro»*

Fue concebido el RBMK-1000 aprovechando la experiencia soviética en el diseño y explotación de sus primeros reactores militares basados en el empleo del grafito (moderador) y el agua ligera (refrigerante) para la producción de plutonio-239. Esta serie comenzó experimentalmente en el Laboratorio No. 2, donde hoy se encuentra el célebre Instituto

Kurchátov, con la concepción y prueba exitosa en 1946 del reactor F-1, homólogo del Chicago Pile-1, el prototipo pionero estadounidense estrenado en 1942. Siempre bajo la dirección de Ígor Vasílievich Kurchátov, físico eminente, correspondió al ingeniero mecánico Nikolai Antónovich Dollezhal construir el primer reactor soviético a escala industrial: el A-1 (de *Annushka*, Anita). Este comenzó a funcionar en 1948 en el complejo *Mayak* y produjo el material físil para la bomba atómica estrenada al año siguiente por la URSS. A diferencia de aquel modelo estadounidense, los rusos introdujeron la disposición vertical del combustible en canales tecnológicos, implementando novedosas soluciones técnicas para su enfriamiento con agua y para la descarga de los bloques de uranio irradiados con destino a las plantas de reprocesamiento, donde se les extrae la «cosecha» de plutonio-239 (Kruglov, 1995).

Enfriado por agua que era tomada y vertida directamente a una reserva acuífera (río o lago), ese prototipo vertical de reactor militar plutonígeno fue considerado idóneo por los soviéticos para adaptarlo con fines energéticos, acoplándolo como una caldera al turbogenerador, según el circuito térmico tradicional. De esta misma manera, Kurchátov y Dollezhal concibieron el AM-1, llamado así por las siglas de *Atomni Mir* (Átomo Pacífico), puesto en servicio el 26 de junio de 1954 en la CEN de Óbninsk, reconocida como la primera de su tipo en el mundo. Luego siguieron sus versiones ampliadas AMB-1 y AMB-2 (*Atomni Mir Bolshoi*; Atómo Pacífico Grande), estrenadas en 1964 y 1967 en la central electronuclear de Beloyarsk, llamada I. V. Kurchátov en honor al científico tras su deceso en 1960.

Pero realmente el RBMK-1000 responde a un proyecto posterior que, según reconoce el propio Dollezhal en sus memorias, se propuso «cazar dos liebres de un tiro»: combinar la producción de isótopos y las funciones energéticas (Dollezhal, 1989). No se trataba ya solamente de concebir un reactor agua-grafito de gran potencia para la generación exclusiva de electricidad, sino de que este mantuviera incorporada aquella función militar primigenia: la producción de plutonio 239. Como producto típico de la Guerra Fría («paz sin paz»), esta idea surgió dentro del grupo de científicos soviéticos que asistieron a la segunda y tercera conferencias de Ginebra sobre los usos pacíficos de la energía nuclear, celebradas en 1958 y 1964. Aprobado en 1966 por las instancias gubernamentales, la realización del RBMK-1000 tendría la dirección científica de Anatoly Petróvich Alexándrov, secundado por el también físico Saveliy Moiseyevich Feynberg, a quien suele atribuírsele el proyecto en lo que concierne a la física neutrónica (Rumiantsev, 2011). Su constructor principal sería también Dollezhal, encargado de las partes termohidráulica, mecánica y demás aspectos ingenieriles.

El RBMK-1000 aprovecha la disposición vertical de esos canales tecnológicos (cerca de 2500) en la estructura de grafito, la inmensa mayoría de los cuales (entre 1400 y 1600) son canales de combustible (ver infografía 6). Estos últimos son tuberías de circonio que contienen un par de conjuntos combustibles (TVS en ruso, de *Teplo Videliayuchie Sborki*), uno encima de otro, cada uno con 18 barras de dióxido de uranio poco enriquecido: al 1,8 % en los primeros prototipos y después al 2 % (Dollezhal y Yemelianov, 1980). El agua hierve dentro de esos canales y el vapor es separado en un domo, como si de una caldera tradicional se tratase, para dirigirlo hacia la turbina. Al no requerir vasija para el cuerpo del reactor,

ni un generador de vapor independiente, este diseño facilita conseguir el doble uso —civil y militar—, extrayendo dichos conjuntos de combustible (TVS) del interior de los canales tecnológicos con ayuda de una máquina de recarga. No hace falta detener el reactor para recoger la «cosecha» de plutonio-239. De ser necesario, podría dedicarse solamente a esta función militar. El RBMK-100 resultó un artefacto híbrido, único de su tipo en el mundo, simbiosis entre reactor militar plutonígeno y soluciones de la energética tradicional para ensamblarlo con el turbogenerador en un ciclo térmico directo.

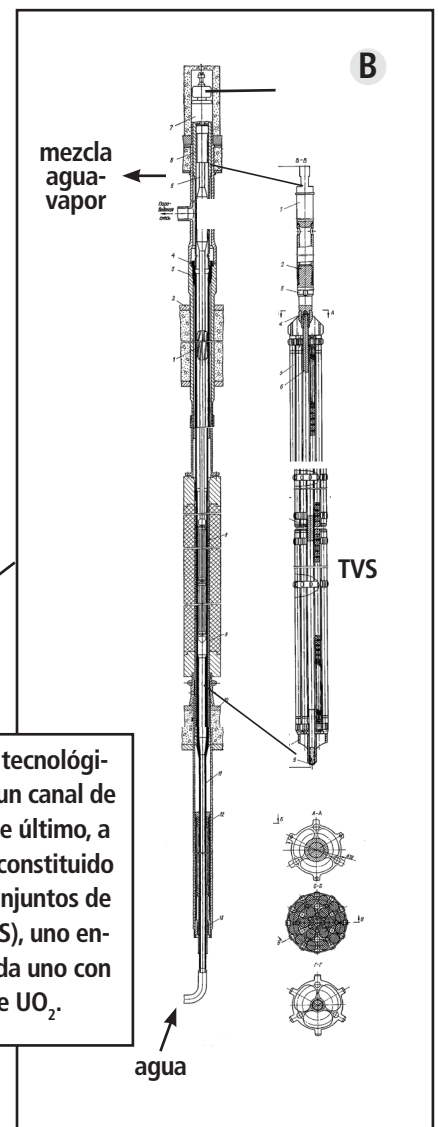
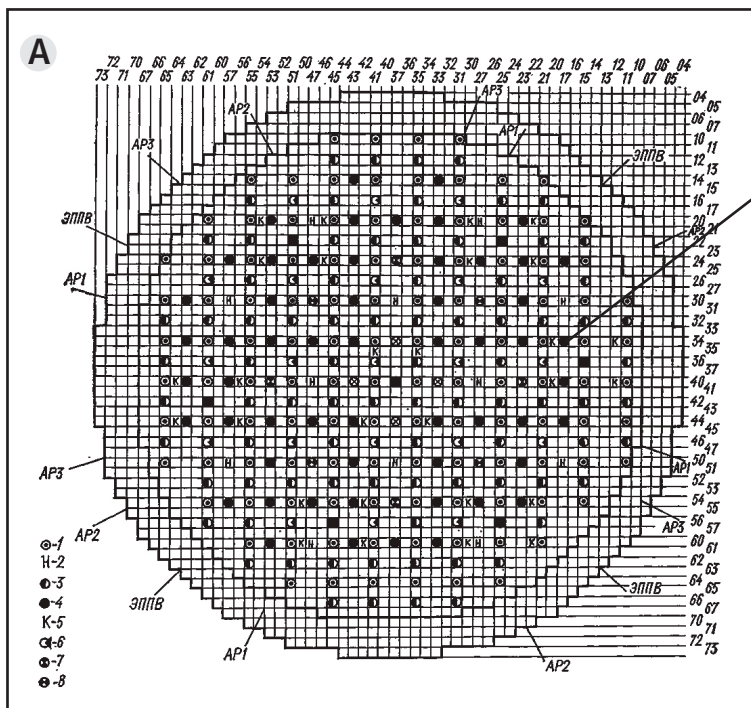
Dichas ventajas fueron esgrimidas cuando, en el resto del mundo, comenzó a elevarse la potencia de los reactores nucleares hasta 1000 MWe para hacerlos más rentables. Esta tendencia era liderada por los LWR: PWR y BWR (en ruso VVER y VK, respectivamente). Dominada por los estadounidenses desde 1955 a partir de su exitosa aplicación en los submarinos nucleares, el empleo de esa tecnología de agua ligera como refrigerante y moderador había comenzado a ser implementada por los soviéticos desde 1964, cuando pusieron en servicio el primer VVER con 200 MWe de potencia eléctrica en la CEN de Novovoronezh<sup>9</sup>. Pero ese aumento de la potencia de los LWR requería grandes vasijas a prueba de presión, un componente para el cual la industria soviética no estaba todavía preparada desde el punto de vista constructivo y metalúrgico. A favor del RBMK-1000 pesó entonces la existencia previa de una infraestructura de construcción de maquinarias asociada a sus ancestros militares, con vasta experiencia en el procesamiento del grafito (Kruglov, 1995).

Mientras hubo que esperar hasta 1979 para que entrara en servicio el primer VVER-1000, el hecho de que en 1973 ya funcionara el primer RBMK-1000 en la CEN de Leningrado, al que se sumó otro en 1975, inclinó definitivamente la balanza hacia el desarrollo de la tecnología agua-grafito-canales como el mascarón de proa de la energética nuclear en la URSS (Dollezhal, 1989; Burlakova *et al*, 2006). Rápidamente nuevos exponentes de una versión mejorada o segunda generación del RBMK-1000 fueron instalados en esa planta leningradense en 1979 y 1981. El despegue de esos reactores de gran potencia con canales tiene lugar a partir del mismo año de ocurrir Three Mile Island, cuyas lecciones fueron totalmente desestimadas por los expertos soviéticos desde el momento en que las instancias oficiales dieron por sentada la imposibilidad de que un suceso semejante pudiera ocurrir en la URSS (Sidorenko, 2002).

Hacia abril de 1986, trece años después de haberse estrenado, ya eran catorce RBMK-1000 en total, distribuidos en las CEN de Kursk (4), Smolensk (2) y Chernobyl (4), además de los ya mencionados en Leningrado (4). Desde 1983, en la CEN de Ignalina, en Lituania, había comenzado a trabajar el primero de los dos únicos RBMK-1500, mientras que el segundo lo hizo en 1987 (hoy los dos están clausurados). Ya ocurrido el accidente de Chernobyl, no fue

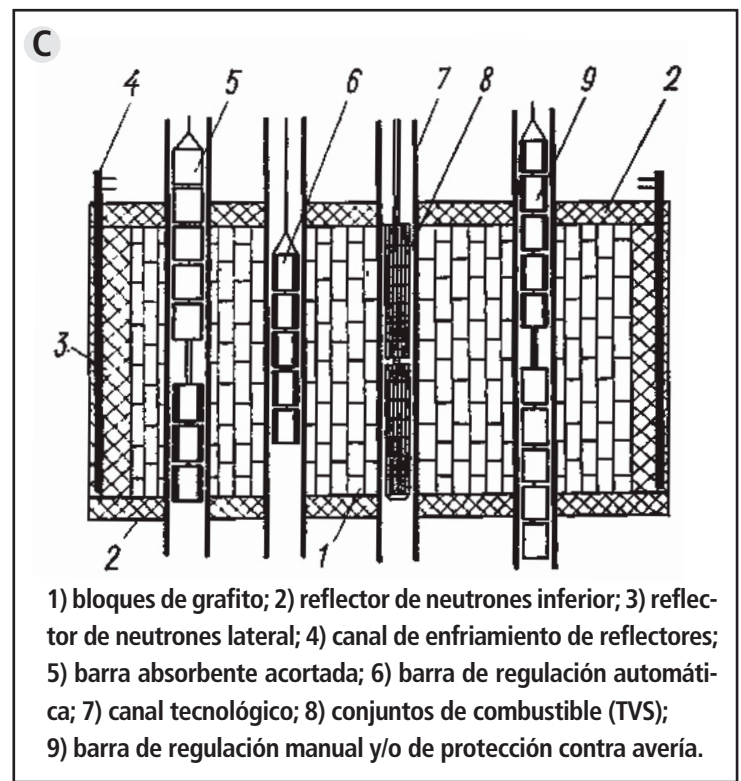
<sup>9</sup>Durante la década de 1970, los VVER-440 fueron exportados a otros países, en su mayoría del campo socialista. Estos reactores de agua ligera fueron instalados en la República Democrática Alemana, Checoslovaquia, Bulgaria y Hungría, además de Finlandia. También se preveían instalaciones en Polonia, Rumania, Libia y, tal vez, en Viet Nam. Cuando ocurrió la tragedia de Chernobyl, en Cuba se construía la CEN de Juraguá en la localidad homónima en la provincia sureña de Cienfuegos, a unos 245 km de La Habana. Hoy desmantelada, era la primera prevista de tres centrales electronucleares que estarían ubicadas en el centro, oriente y occidente de la isla (Petrosian, 1985; Castro Díaz-Balart, 1991).

El reactor de gran potencia con canales RBMK-1000 (*Reaktor Bolshoi Moshnosti Kanalni*) no solamente fue concebido para la generación de electricidad, sino que mantuvo incorporada la función primigenia de sus ancestros basados en la tecnología agua-grafito: la producción de plutonio 239 con fines bélicos. Como producto típico de la Guerra Fría, la idea de este prototipo surgió dentro del grupo de científicos soviéticos que asistieron a la segunda y tercera conferencias de Ginebra sobre los usos pacíficos de la energía nuclear, celebradas en 1958 y 1964. Aprobada en 1966 por las instancias gubernamentales, su realización tendría la dirección científica de Anatoly Petróvich Alexándrov, secundado por el también físico Saveliy Moiseyevich Feynberg, a quien suele atribuírsele el proyecto en lo que concierne a la física neutrónica (Rumiantsev, 2011). Su constructor principal fue Nikolai Antónovich Dollezhal, encargado de las partes termohidráulica, mecánica y demás aspectos ingenieriles (Dollezhal y Yemelianov, 1980).



Izquierda: canal tecnológico, conteniendo un canal de combustible. Este último, a la derecha, está constituido por un par de conjuntos de combustible (TVS), uno encima de otro, cada uno con 18 barras de  $UO_2$ .

El núcleo de los reactores RBMK-1000 está constituido por cerca de 2500 bloques macizos de grafito apilados en columnas verticales y con aberturas axiales, formando una rejilla con cuadrantes cuando se mira desde arriba (imagen A). Estas aberturas contienen los canales tecnológicos, la mayoría de los cuales (entre 1440 y 1660) contienen canales de combustible. Estos últimos son tuberías de circonio con un par de conjuntos combustibles (TVS en ruso, de *Teplo Videliayuchiye Sborniki*) en su interior, ensamblados uno encima de otro, cada uno con 18 barras de dióxido de uranio poco enriquecido entre 1,8 - 2 % (imagen B). El agua refrigerante entra por la parte inferior de cada canal tecnológico con combustible y, a una altura de 2,5 metros, se calienta hasta la temperatura de saturación. Ya más arriba comienza a ebullición y sale de la zona activa con un 14,5 % de concentración de vapor. Junto a los canales con combustible, se encuentran los canales tecnológicos con los diferentes tipos de órganos del sistema de control y regulación del reactor, también dispuestos en las aberturas axiales de las columnas de grafito (imagen C).

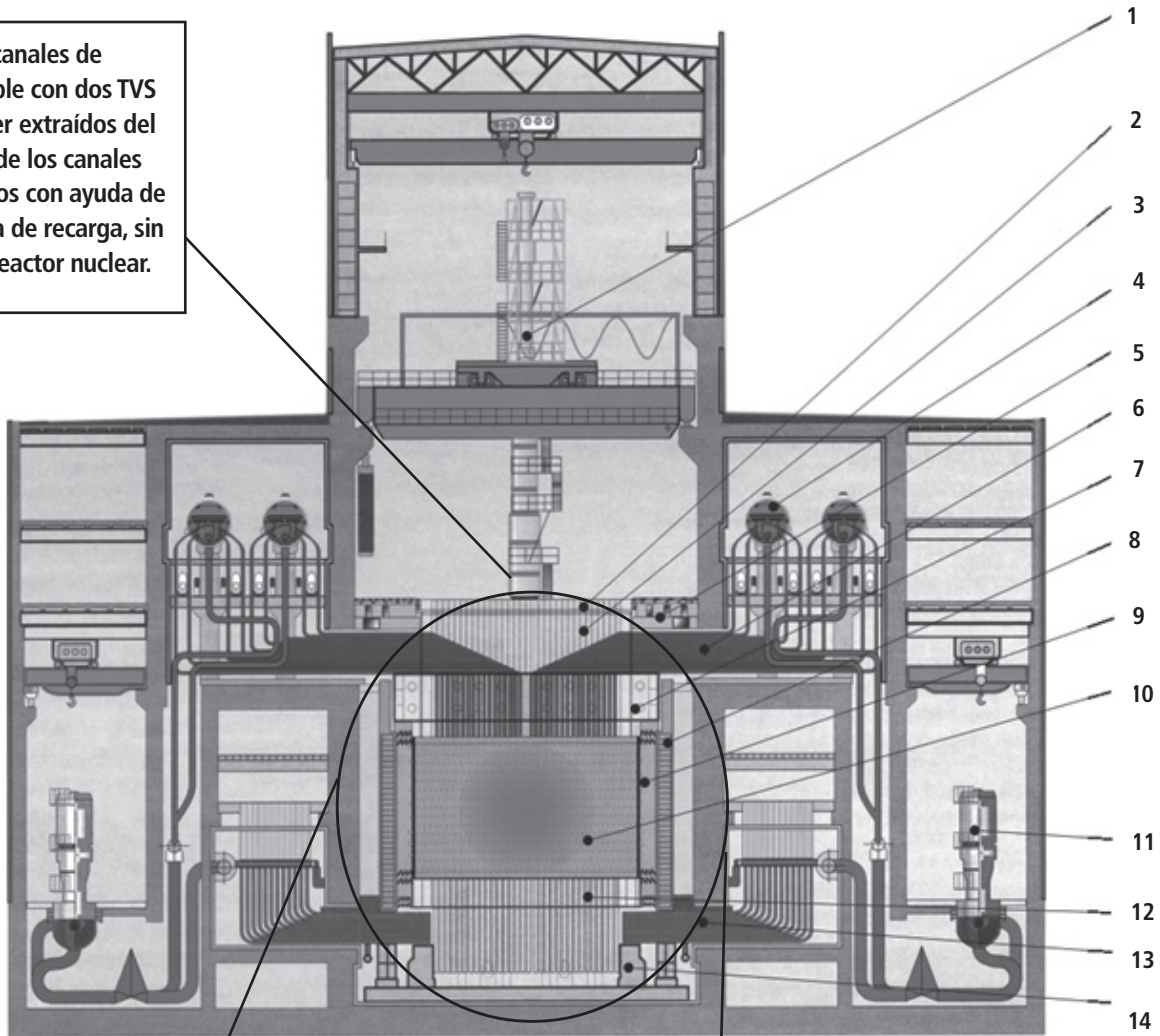
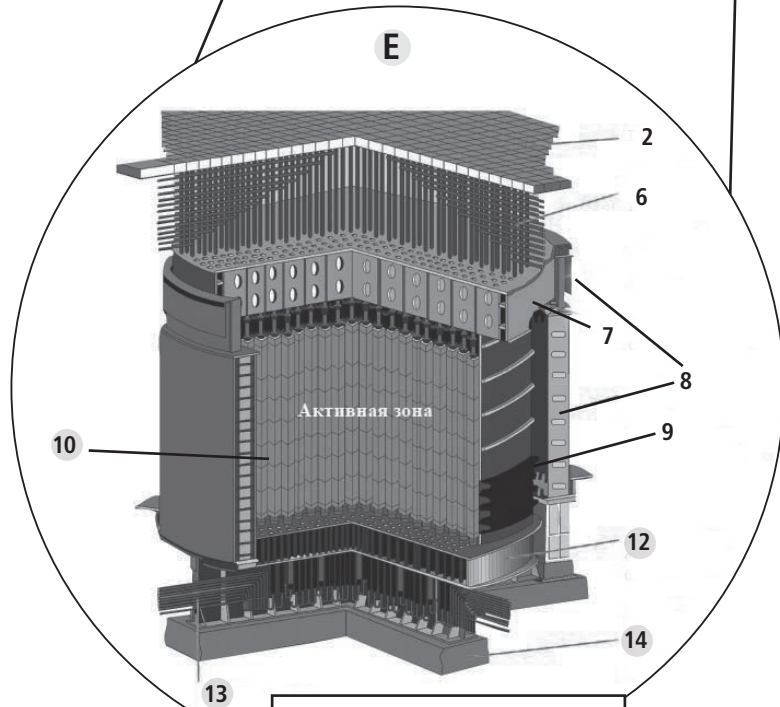


1) bloques de grafito; 2) reflector de neutrones inferior; 3) reflector de neutrones lateral; 4) canal de enfriamiento de reflectores; 5) barra absorbente acortada; 6) barra de regulación automática; 7) canal tecnológico; 8) conjuntos de combustible (TVS); 9) barra de regulación manual y/o de protección contra avería.



**D**

Los canales de combustible con dos TVS pueden ser extraídos del interior de los canales tecnológicos con ayuda de la máquina de recarga, sin parar el reactor nuclear.

**E**

La zona activa se encuentra rodeada por varias barreras físicas de contención radiactiva: laterales, superiores e inferiores.

- 1) Máquina para extracción y recarga de los canales tecnológicos con conjuntos de combustible
- 2) Placa de hormigón superior para sostener los canales tecnológicos
- 3) Tramo superior de los canales tecnológicos
- 4) Domo-separador de vapor
- 5) Cubierta superior (esquema G)
- 6) Tuberías conductoras de la mezcla agua-vapor hacia el domo
- 7) Estructura superior para protección biológica (esquema E)
- 8) Estructuras para protección biológica rellena de agua (esquema L y D)
- 9) Estructura lateral para protección biológica con mezcla Ni-He (esquema KZh)
- 10) Zona activa del reactor (pila de grafito) con canales tecnológicos
- 11) Bomba principal de circulación
- 12) Estructura inferior para protección biológica y apoyatura de la pila de grafito (esquema OP)
- 13) Tuberías conductoras de agua hacia la zona activa del reactor
- 14) Placa inferior de metal en forma de cruz (esquema C)

Fuentes utilizadas: imágenes A, B y C (Dollezhal y Yemelianov, 1980); imagen D (Abramov *et al*, 2006) e imagen E (Borovoi y Belijov, 2011).

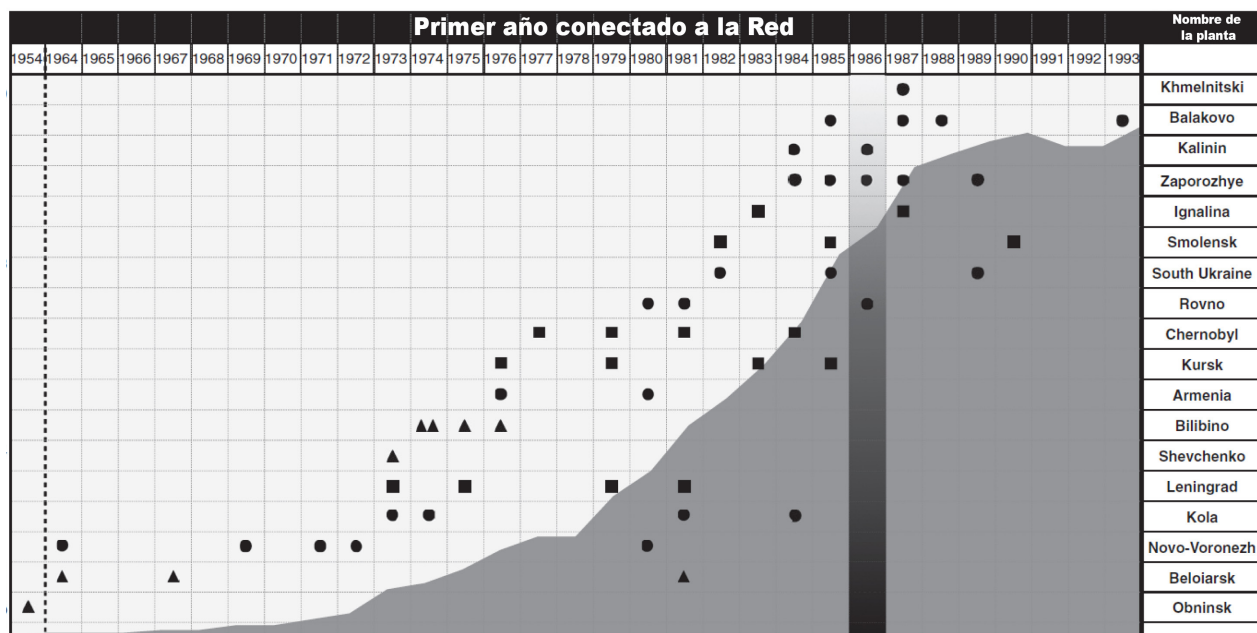


Figura 7: Puesta en marcha de reactores nucleares por tipologías en la Unión Soviética. Fuentes: Smichd (2015).

hasta 1990 que entró en servicio el último RBMK-1000 en la CEN de Smolensk (Burlakova *et al*, 2006). De esos 17 reactores agua-grafito (ver figura 7), todavía funcionaban diez en 2021, generando cerca del 50 % de la electricidad producida por las centrales atómicas en Rusia, aunque desde 2016 hay planes de cerrarlos a todos en un plazo de quince años.

Hasta el momento del desastre en 1986, el RBMK-1000 era divulgado públicamente como un modelo de eficiencia técnica y económica, además de considerarse «confiable» por sus creadores en términos de seguridad (Dollezhal y Yemelianov, 1980). Sin hacer mención alguna a su ventaja de «cosechar» plutonio-239, sacándolo a tiempo antes de que se complicara con el plutonio-240, se destacaba que su máquina de extracción y recarga permitía sustituir un canal ligeramente dañado; es decir, con alguna rotura o fusión de las barras de combustible en su interior. No es necesario, por tanto, detener la instalación en caso de tal avería. Basta con clausurar dicho canal y sustituirlo por otro, instaurándose la llamada «segmentación del circuito del refrigerante» (Dollezhal y Yemelianov, 1980: 182). Este recambio sobre la marcha resulta imposible hacerlo en los LWR, ya que estos reactores de agua ligera tienen todos sus componentes encerrados dentro de la vasija. Por esta y otras presuntas ventajas, como la facilidad para enfrentar un LOCA, dado que su circuito primario posee una gran reserva de refrigerante en el domo-separador, el RBMK-1000 llegó incluso a ser elogiado como la «solución radical de la seguridad» (Petrosian, 1985: 182).

¿Qué era preferible potenciar entonces: el reactor de vasija dominado por Occidente o el reactor de canales únicamente desarrollado en Rusia? Aunque los expertos soviéticos se dividían con respecto a esta disyuntiva, sus debates no trascendían a partir de cierto nivel de jerarquía organizacional y mucho menos eran ventilados públicamente. Los partidarios acérrimos de los reactores con canales enarbolaban que su potencia podía ser aumentada sin mayores complicaciones, mientras que los LWR estaban limitados por la resistencia metálica de su vasija a la presión del refrigerante en su interior. Luego de haber

conseguido que el RBMK-1500 fuera el reactor más potente del mundo, comenzaron planes para crear el RBMK-2000 y el RBMK-3600, así como los RBMKP-2400 y RBMKP-4800 (Dollezhal y Yemelianov, 1980). Hasta que sobrevino el desastre de Chernobyl y, entonces, salieron a relucir las graves deficiencias que ocultaba el RBMK-1000 bajo la «opacidad» de sus pretendidas soluciones radicales de seguridad.

#### 2.4.2/ *El INSAG-7: versión oficial del accidente*

Si bien ha quedado como la versión definitiva del OIEA, el INSAG-7 analiza las deficiencias tecnológicas del RBMK-1000 por separado, renunciando a establecer cómo se vincularon entre sí durante la posible secuencia del accidente, nunca totalmente esclarecida, ya que depende de las diferentes modelaciones aplicadas (matemáticas y por simuladores). Aunque descalifica la mayoría de las conclusiones del INSAG-1, que inculpaban solamente a los operarios, no se propone reivindicarlos. A fin de cuentas, el INSAG-7 sostiene que sus acciones condujeron a desestabilizar el reactor nuclear, colocándolo en una situación nunca prevista en el reglamento de explotación. Su veredicto final es el siguiente:

El accidente se produjo debido a la superposición de estos principales factores: las características físicas del reactor, las particularidades constructivas de sus órganos de regulación y la puesta del reactor en condiciones no reglamentadas y no investigadas por un órgano independiente sobre las cuestiones de seguridad. El más importante es que precisamente las características físicas del reactor condicionaron su comportamiento errático (IAEA, 1992: 29).

A continuación analizamos esas características físicas y particularidades constructivas, tal y como fueron señaladas por el INSAG-7, pero señalando cómo el doble uso (militar y civil) del RBMK-1000 condicionó que las paradojas de seguridad se encuentren implícitas en el propio diseño de su defensa de profundidad. También tendremos en cuenta criterios más recientes que, incluso, intentan rehabilitar ese modelo de reactor nuclear tras haberse introducido mejoras de seguridad después de Chernobyl (Abramov *et al*, 2016). No por esto las lecciones de este accidente severo han dejado de tener validez; todo lo contrario: ejemplifican cómo los expertos todavía difieren al interpretar cuál pudo ser su cadena causal, aun cuando las graves deficiencias tecnológicas del RBMK-1000 hayan sido identificadas y hasta se maneje que fueron corregidas totalmente.

#### *El coeficiente de vapor (huecos) de la reactividad es positivo*

Siendo el RBMK-1000 un reactor nuclear de agua en ebullición, este indicador expresa que su coeficiente de multiplicación neutrónica efectiva ( $k_{efec}$ ) aumenta proporcionalmente a la cantidad de vapor dentro de la zona activa. Las burbujas son llamadas «huecos» o «vacíos» porque dejan pasar los neutrones sin absorberlos. Mientras mayor sea el volumen de vapor, más neutrones rápidos pueden llegar hasta el grafito y, moderados por este, fisiónar los núcleos de uranio-235. Incluso puede quedarse este tipo de reactor sin

refrigerante, que no perdería su capacidad de moderar neutrones y, por tanto, la reacción de fisión nuclear en cadena seguiría creciendo y liberando energía hasta que el sistema tecnológico se autodestruya de alguna manera.

La «autoaceleración» o «embalamiento» del RMBK-1000, tanto de su potencia térmica como de su reactividad neutrónica, estuvieron condicionados inobjetablemente por ese valor positivo del coeficiente de vapor. Ahora bien, esa positividad depende de cómo sea proyectada la zona activa del reactor nuclear. Entre otros factores, resulta determinante la dimensión y geometría de los bloques de grafito como rejilla-soporte de cada uno de los canales con las dos TVS y sus 18 barras de UO<sub>2</sub> percápita. A esto se suma el grado de enriquecimiento con uranio-235 (1,8 % en un inicio) y cuánto tiempo el combustible permanece dentro del núcleo hasta conseguirse la «profundidad de quemado»; o sea, la estipulada composición isotópica tras ser irradiado. Los proyectistas eligieron estos parámetros para que pudiera obtenerse plutonio-239 con fines militares, a la par que ese modelo satisficiera los requisitos de eficiencia técnica y económica durante la generación de energía eléctrica (Rumyantsev, 2011). Es por eso que el diseño ingenieril de este reactor híbrido implicó aceptar que el coeficiente de vapor de la reactividad fuera altamente positivo en ciertos regímenes de trabajo (sobre todo a baja potencia), a diferencia de los tradicionales reactores plutonígenos industriales, donde dicho coeficiente es menor o negativo (Borisenko, 2017).

Diversas medidas paliativas debían tenerse presentes para compensar esta característica adversa del RMBK-1000 durante su explotación. Para ponerlo en marcha, como parte de su carga inicial, se introducían en su zona activa de 230 a 240 canales adicionales con barras absorbentes de neutrones, independientes de los cerca de 1440 canales, cada uno con su par de TVS con 18 elementos de combustible. En la medida que el UO<sub>2</sub> se iba «quemando» a lo largo y ancho del reactor, la disminución de su reactividad era compensada introduciendo canales de combustible más frescos en sustitución de los canales con absorbentes neutrónicos. Pero una vez que estos últimos eran sacados en su totalidad y quedaban únicamente los conjuntos de UO<sub>2</sub> en la zona activa, el coeficiente positivo de vapor para la reactividad predominaba y solo podía ser compensado con los medios de control y protección, automáticos o accionados por los operadores. En el cuarto bloque de Chernobyl habían 1659 canales con combustible al ocurrir el accidente, el 75 % de los cuales eran de la carga inicial; un solo canal adicional con barras absorbentes, y un canal tecnológico vacío, o sea, con agua (Karpan, 2005). Las condiciones termofísicas eran tales que los operadores debían estar muy atentos.

#### *Construcción de las barras reguladoras del sistema de control y protección*

Compuestas por un absorbente neutrónico (carburo de boro), las barras reguladoras permiten controlar de manera manual y automática la criticidad del reactor nuclear durante la explotación. Junto a las barras de protección, sumaban más de 200 de varios tipos y tamaños. La mayoría tenía un desplazador de grafito en su punta para evitar que, cuando fueran extraídas completamente de la zona activa, el agua ocupara todo el

espacio que dejaban vacante. Esto se hizo con el fin de evitar la absorción perniciosa de neutrones por el agua y, en su lugar, propiciar la presencia beneficiosa del grafito como moderador de estas partículas. Sin embargo, por una errática decisión de diseño, se había dejado 140 cm de agua por encima y 125 cm por debajo de ese desplazador de grafito, además de que tanto el largo del mismo (4,55 m) como de la barra absorbente (6,2 m) eran menores que la altura de la zona activa (7 m). Por ese motivo, al ser introducidas todas esas barras reguladoras dentro del reactor para apagarlo, desplazando masivamente el agua, sus terminaciones de grafito provocaron con su función moderadora un aumento súbito de la reactividad (ver infografía 7). La inducción de esta sobrecriticidad en la parte inferior del núcleo es considerada uno de los factores cruciales en la explosión del RBMK-1000, al añadir más reactividad positiva a la ya provocada por el coeficiente de vapor, máxime si el refrigerante ebullició o se había vaporizado. Resultó como si los «frenos» de un automóvil se hubieran convertido en «aceleradores».

#### *Velocidad de inserción de las barras de protección contra avería*

Todas las barras reguladoras, así como específicamente las barras de protección contra avería, son introducidas en la zona activa cuando se activa manualmente, sosteniéndolo, el interruptor conocido como AZ-5 (*Avarínnaya Zashita*; Protección contra Avería). Su velocidad de inserción fue demasiado lenta (0,4 m/s), pues el agua que bullía en el interior de los canales actuó como un amortiguador de las mismas. Junto al efecto «acelerador» de los desplazadores de grafito, el RBMK-1000 se hizo «imparable» porque todas las barras absorbentes de neutrones (reguladoras y de protección) se quedaron atascadas.

#### *Regulación de la potencia*

La relación biunívoca entre las potencias térmica y neutrónica del RBMK-1000 era controlada en régimen estacionario por dos sistemas de medición y control que se complementaban entre sí. Cuando dichas potencias eran mínimas, como es el caso de los arranques, paradas y otros regímenes transitorios, esos sistemas automáticos eran desconectados y el control del reactor nuclear pasaba a depender de la experiencia e intuición de los operadores. Estos se veían obligados a realizar hasta 1000 operaciones en una hora (Karpan, 2005). Al tener los operarios muy poca experiencia de trabajo en tales condiciones, se produjeron bruscas disminuciones de la potencia térmica (desde 1700 MWt hasta prácticamente 0) y se produjo el «envenenamiento» por xenón-135 a partir del yodo-135, también llamado «pozo de xenón» o «pozo de yodo». Por su elevada sección eficaz para absorber neutrones (hasta 100 veces más que el uranio-235), esos elementos de vida media corta perjudican la reacción de fisión nuclear en cadena. Para compensar esa caída de potencia y subirla hasta 200 MWt, los operadores sacaron casi todas las barras reguladoras (los «frenos») en forma improvisada, sin atenerse a lo estipulado en las normas de operación. Este proceder sí puede considerarse una violación de las mismas, como enseguida veremos.

### *Dispositivos de control y medición de la reserva operativa de reactividad*

Por reserva operativa de reactividad (OZR por sus siglas en ruso; de *Operativny Zapaz Reaktivosti*) se entiende la reactividad positiva que alcanzaría el reactor nuclear si fueran sacadas de su interior todas las barras del sistema de regulación (todos los «frenos»). En términos operacionales esta reserva operativa era entendida ambiguamente como una restricción para contrarrestar cualquier aumento o disminución de la criticidad, así como para regular las desigualdades térmicas en la zona activa. Para el RBMK-1000 estaba definido que el valor mínimo de OZR era equivalente a 15 barras reguladoras, por lo que debía mantenerse esa cantidad dentro de la zona activa. Las normas de operación estipulaban que, por debajo de ese número, había que apagar obligatoriamente el reactor nuclear. Significa algo así como que este pudiera «encabritarse» de no tenerlas en su interior.

Los operadores violaron esa norma por algún tiempo, dejando apenas seis barras dentro de la zona activa. Ellos nunca habían sido alertados de que la disminución del OZR por debajo de 15 barras podía no ya ser peligrosa, sino fatal por dos motivos cruciales. En primer lugar, su reinsertión incrementaría el coeficiente positivo de vapor. Y, por si fuera poco, conduciría a un aumento incontrolable de la reactividad cuando todas esas barras absorbentes —junto a las de protección— fueran nuevamente introducidas al unísono para apagar el reactor por la activación del botón AZ-5. En resumen: si no se mantenían al menos 15 barras de regulación dentro de la zona activa, estos «frenos» se transformaban en «aceleradores», independientemente del defecto constructivo de los desplazadores de grafito. Por increíble que parezca, esto solo se hizo transparente después de Chernobyl. Tal es así que, aunque el cálculo computacional del OZR se reportaba por escrito, no había previsto ningún indicador permanente de su valor en el panel de control, ni señalización preventiva para alertar a los operarios y tampoco una protección contra avería frente a tamaña peligrosidad. Este fue otro de los factores cruciales de la «sorpresa tecnológica» que deparó el RBMK-1000.

### *Tamaño de la zona activa:*

Debido a las grandes dimensiones de la zona activa del reactor con canales de gran potencia (7 m de altura y 11, 8 m de diámetro), ocurre que las múltiples reacciones de fisión en cadena se encuentran poco relacionadas entre sí, alejadas unas de las otras. Por este motivo había que efectuar la regulación espacial del desprendimiento de energía como si existieran muchos pequeños reactores —cerca de 80— contenidos dentro del mismo RBMK-1000 (Karpan, 2005). Los operadores se veían obligados a evitar todo el tiempo que se formaran las llamadas «supercriticidades locales» (Karpan, 2005; Romyantsev, 2011). Bastaban pequeñas redistribuciones de reactividad para que se produjeran desigualdades térmicas significativas que complejizan la extracción del calor por el agua refrigerante que circula dentro de los canales de combustible. Durante el accidente estas desigualdades se incrementaron a toda la altura del reactor nuclear por diferentes motivos, pero esencialmente cuando fueron introducidas las barras reguladoras con las anomalías ya apuntadas. Mientras en la parte superior de la zona activa disminuyeron las potencias térmica y neutrónica, en la parte inferior crecieron

en forma abrupta, de ahí que el estallido del reactor se haya producido desde abajo. Según la versión neutrónica, esto se debió a la supercriticalidad provocada por los desplazadores de grafito (Karpan, 2005). En cambio, la versión termohidráulica sostiene que ocurrió por el aumento del coeficiente positivo de vapor debido a la ebullición prematura del refrigerante a la entrada del reactor (Abramov *et al*, 2006).

#### *Delta de temperatura del refrigerante a la entrada del reactor*

Para garantizar la refrigeración de la zona activa, el agua debe penetrar con una temperatura ligeramente inferior al punto de ebullición. Solo puede hervir a partir de determinada altura de los canales de combustible. Si esa diferencia o delta de temperatura se incumple, entonces se incrementa el coeficiente positivo de vapor o huecos de reactividad. De hecho, diagnósticos más recientes del RBMK-1000 sostienen que la ebullición prematura del refrigerante en la entrada a la zona activa debió ser el suceso iniciador del accidente, seguido por la inserción de las barras reguladoras tras el accionamiento del botón AZ-5, estando el reactor nuclear a una baja potencia (6-8 %) (Kliushnikov *et al*, 2010; Sharaevski *et al*, 2016). Por ese mismo motivo de la ebullición, las bombas de circulación pudieron cavitarse, haciendo que el control del reactor fuera imposible por razones termohidráulicas, a las que siguieron las razones físico-neutrónicas. En este caso quedarían excluidos los defectos constructivos de los medios de control y protección —o sea, de las barras absorbentes— como principal causa del accidente, aunque hubieran influido en el incremento de la supercriticalidad.

#### *Sistema del circuito de enfriamiento*

Esta hipótesis termohidráulica de la cavitación fue sostenida en su acepción más radical por Dollezhal, el constructor del RBMK-1000, ya que condicionaba todo el accidente a las decisiones tomadas durante el experimento y lo eximía de los errores del diseño constructivo del sistema de control y protección (Dollezhal, 1989). Aunque fue desechada en un principio por las primeras comisiones gubernamentales soviéticas y/o rusas, el INSAG-7 no descarta esa posibilidad de la cavitación, retomándola como una causa agravante del coeficiente positivo de vapor o huecos de la reactividad. Según este análisis, el circuito de refrigeración pudo verse afectado al producirse un desbalance entre sus dos flujos de agua: refrigerante (más caliente) y condensado (más frío). Al ponerse en marcha todas las bombas de circulación durante la prueba, aumentó el flujo del refrigerante proveniente de los domos separadores, cuya presión y temperaturas se elevaron al ser desconectado el suministro de vapor al turbogenerador. Al unísono, enseguida disminuyó el condensado (más frío) suministrado por las bombas de alimentación al circuito primario.

Como ambos flujos (refrigerante y condensado) se mezclan antes de penetrar en la zona activa, al predominar el más caliente —o sea, el refrigerante—, su temperatura alcanzó el punto de ebullición y las bombas de circulación cavitaron, además de que perdían revoluciones a medida que frenaba el rotor de la turbina. Al convertirse el agua en vapor, la refrigeración forzada del núcleo del reactor quedó interrumpida; creció el

coeficiente de la reactividad de huecos y se produjo el «embalamiento» neutrónico, con el consiguiente aumento en picada de la potencia térmica.

### *Barreras físicas de contención*

Como ya hemos explicado, el RBMK-1000 fue diseñado para permitir el cambio de los canales tecnológicos con sus conjuntos de combustibles sin apagar el reactor, tanto para realimentarlo como para recoger la cosecha de plutonio-239. Esto requiere grandes grúas encima del núcleo y, por tanto, la instalación es muy alta. Por eso no fue prevista una solución constructiva que englobara tanto a la zona activa como al resto del circuito primario dentro de un mismo edificio o cápsula de contención, a manera de los reactores de vasija como los LWR. En lugar de esa solución, que se consideraba demasiado costosa, a partir de la segunda generación de RBMK-1000 se dispuso un sistema de barreras físicas por compartimentos, provistos de sólidos muros de hormigón armado y paredes de acero, niveles de descompresión progresiva y cámaras de arena, boro y agua, así como otras soluciones adicionales de defensa biológica. En particular, la zona activa se encuentra rodeada por varias barreras físicas: laterales, superiores e inferiores (ver infografía 6). Así, la pila de grafito se apoya en el esquema OR, al cual se encuentran soldados los tramos inferiores de los canales tecnológicos, mientras que sus tramos superiores se afianzan al esquema E y después atraviesan la placa de hormigón superior que tapa el reactor. Esta solución permite el cambio de los canales de combustible (TVS) con la máquina de extracción y recarga, sacándolos de los canales tecnológicos por su parte superior.

Todo ese sistema compartimentado de barreras físicas de contención radiactiva fue calculado para resistir únicamente la destrucción de dos canales de combustible con sus TVS, como consecuencia de la máxima avería por proyecto: la ruptura del colector principal de suministro del refrigerante a la zona activa. Esta limitación se debía a la capacidad de despresurizar esos recintos de contención, atendiendo al diámetro de las tuberías que descargarían el condensado del vapor radiactivo —como resultado de tal accidente— a una piscina burbujeante situada debajo del reactor. Es obvio que este sistema de barreras físicas no podía contener una explosión como la de Chernobyl, que ni siquiera había sido imaginada. Su enorme potencia hizo saltar por los aires la placa superior de unas 2000 toneladas, levantando en vilo el núcleo del reactor: la pila de grafito con estructuras constructivas y canales tecnológicos. Fragmentos de metal y hormigón, polvo de grafito y pedazos de combustible cayeron a más de un kilómetro (Kravchuk, 2010). A partir del cráter resultante se ha intentado explicar el por qué de las dos explosiones que escuchó la mayoría de los testigos, así como saber cuál fue su naturaleza (térmica o nuclear), pero ninguna de las versiones es concluyente.

### *Historicidad de accidentes ocultos*

Al igual que sucedió luego de Three Mile Island, cuando salieron a relucir episodios anteriores que ya alertaban sobre la posibilidad de un LOCA con fusión del núcleo, lo



mismo sucedió al ser analizados en retrospectiva tres accidentes que ya evidenciaban las graves deficiencias tecnológicas del RBMK-1000 antes de ocurrir Chernobyl. Escondidas totalmente no ya solo de la opinión pública, sino de los propios explotadores de las CEN con ese tipo de reactor nuclear, las pruebas documentales de tales episodios fueron exhumadas como parte de las investigaciones efectuadas en 1991, cuando sobre el sistema tecnocientífico nuclear se cernían fuertes presiones políticas y sociales en consonancia con las transformaciones socioeconómicas y políticas que llevaron a la desintegración de la URSS. Así fueron identificados dos sucesos precursores en 1975 y 1983, respectivamente, así como otro percance en la propia CEN de Chernobyl en 1982.

El primero de esos accidentes había tenido lugar en la CEN de Leningrado, el 30 de noviembre de 1975, y por sus características se considera el augurio de Chernobyl (Karpan, 2005). Atribuido en un inicio a la destrucción de un elemento de combustible por error de fábrica, este episodio puso de manifiesto —por primera vez— las peligrosidad del RBMK-1000 a baja potencia, cuando se intensifican su inestabilidad neutrónica y térmica, además del coeficiente positivo de vapor o huecos de la reactividad. En realidad esas deficiencias salieron a relucir cuando, tras haberse disparado el reactor nuclear por la desconexión de sus turbogeneradores, fue nuevamente puesto en servicio. Por un error en el control del flujo refrigerante se produjo una gran distorsión de la energía liberada en la zona activa, el envenenamiento por xenón y otras anomalías. La temperatura del combustible aumentó; decenas de conjuntos de combustibles terminaron dañados y se produjo la ruptura de la cubierta de un canal tecnológico. Hubo una liberación significativa de radiación fuera de los límites del reactor y hasta de la planta (Karpan, 2005). Por la manera en que evolucionó aquel accidente, se afirma que pudo llegar a ser un Chernobyl. No lo fue porque las barras de control y protección de aquel RBMK-1000 estaban bien diseñadas. El largo de sus desplazadores de grafito abarcaba toda la zona activa, sin tener agua por debajo, por lo que no provocaron una adición de reactividad durante su inserción (Borisenko, 2017).

Tras aquella avería se adoptaron varias medidas para disminuir el coeficiente positivo de vapor o huecos de la reactividad, como fue aumentar el enriquecimiento del combustible desde 1,8 % a 2 %. Fue entonces cuando se reglamentó que la reserva mínima operativa de reactividad (OZR) fuera 15 barras reguladoras. La concepción errática de rediseñarlas, acortándoles sus desplazadores de grafito por consideraciones constructivas, se puso de manifiesto en 1983 cuando su inserción provocó un despunte de reactividad positiva en un RBMK-1500 durante su parada en la CEN de Ignalina. A la posibilidad de que ese mismo reactor tuviera un embalamiento neutrónico en caso de una avería con pérdida del refrigerante fue dedicada una investigación del Instituto Kurchátov, publicada ese mismo año. Las serias deficiencias constructivas que mostraba en la práctica el sistema de control y protección de los RBMK-1000, así como del RBMK-1500, habían «asustado» a los investigadores y fueron dirigidas cartas a las instancias ministeriales y al constructor principal. Este respondió que esas deficiencias eran conocidas, aunque dio por sentado que era muy poco probable una situación tan peligrosa como la descrita. La solución

del problema quedó aplazada para más adelante, cuando se renovara el diseño de dichos órganos de control y protección (Sidorenko, 2002).

Para el modelaje del accidente de Chernobyl se tuvo en cuenta también una avería ocurrida en esa propia CEN en 1982, cuando se produjo la destrucción de un canal con combustible por falta de enfriamiento. Aunque había sido achacada a un error humano durante el arranque de esa unidad, otra versión señalaba que se debió a deficiencias de fábrica en los canales tecnológicos. Como resultado, hubo una liberación significativa de radiactividad al medio ambiente (Karpan, 2005). De modo que existía una historicidad negativa del RBMK-1000 a lo largo de su existencia, cuyos pormenores no fueron sistematizados para el conocimiento del personal de explotación y las instancias reguladoras, ya que imperaba el secretismo ramal, entre ministerios y hacia el interior del propio sistema tecnocientífico nuclear, además del secretismo de cara a la opinión pública (Schmid, 2016). Esas exhumaciones de las averías precedentes también se hicieron para demostrar que esos graves problemas eran sabidos tanto por Dollezhal, constructor principal del RMBK-1000, como por su director científico: el académico Alexándrov, a la sazón presidente de la Academia de Ciencias de la URSS desde 1975 hasta que pidió su liberación luego del desastre. Ellos habrían encubierto de manera premeditada tales deficiencias y de ahí que fueran los verdaderos culpables del desenlace fatal (Dyatlov, 2003; Sharaevski *et al*, 2016).

«¿Cuáles de esos puntos débiles causaron el accidente? ¿Tiene realmente valor conocer cuál de esas deficiencias fue la causa real, si cualquiera de ellas pudo ser potencialmente el factor determinante?» (IAEA, 1992). Al optar por abrir estas interrogantes, el INSAG-7 declina analizar las posibles secuencias que proponen los dos informes oficiales soviéticos y/o rusos a partir de modelos matemáticos y con simuladores. Estos tratan de establecer una correspondencia entre el aumento del coeficiente positivo de vapor o huecos de la reactividad y la actuación de los operadores durante el experimento. ¿Cuándo y por qué accionaron el interruptor AZ-5? ¿Comenzó la sobrecriticidad incontrolada antes o después de esa acción? Pero estas cuestiones no son dirimidas en el INSAG-7, aunque se haga referencia a las investigaciones realizadas por la parte rusa. La cautela de los expertos del OIEA podría explicarse porque evitaban sutilmente repetir el fiasco del INSAG-1, cuando refrendaron un dictamen técnicamente insostenible.

Es notorio que ese primer documento del OIEA sobre las causas de Chernobyl haya sido retirado de la consulta pública en internet y, en su lugar, solo pueda consultarse solamente el INSAG-7. Aunque este se mantiene como la versión definitiva del accidente refrendada internacionalmente, sus conclusiones han sido desestimadas en Rusia a medida que el sistema tecnocientífico nuclear se fue recuperando con creces de aquella etapa de descrédito. Hoy se propugna como condición geoestratégica que el «escudo nuclear» constituye el sostén de la seguridad tanto militar como energética de ese país. En consonancia, la visión de Chernobyl ha ido cambiado a lo largo de los años como un constructo sociopolítico que involucra a expertos y no expertos, decisores y afectados, a todos los protagonistas de aquel accidente sin parangón, cuya categorización como

primera catástrofe sociorradioecológica de magnitud global puede basarse precisamente en la indefinición de sus causas y las incertidumbres de sus consecuencias.

#### 2.4.3/ *El RBMK-1000 y sus paradojas de la seguridad*

Según sostuvo Nikolai V. Karpan en entrevista con motivo de cumplirse el 30 aniversario del accidente en 2016, las instancias gubernamentales soviéticas encabezadas por el presidente Mijail Gorbachev manejaron desde un inicio otro dictamen técnico que había sido realizado en secreto por especialistas de varios centros científicos conjuntamente con la Fiscalía General de la URSS. Su conclusión había sido inequívoca: «El reactor RBMK tiene la propiedad de “acelerarse” debido a errores en la física y en la construcción de su zona activa» (Karpan, 2016). Sobre la base de este veredicto y tras el análisis pormenorizado de todos los informes oficiales, incluido el INSAG-7, ese ingeniero e historiador independiente de la tragedia concluye que el personal del cuarto bloque de la CEN de Chernobyl cometió solamente dos violaciones de las normas de operación por las cuales podían ser imputados:

1) El experimento del turbogenerador fue realizado a 200 MWt (térmicos), mientras que su propio programa estipulaba que no podía disminuirse la potencia por debajo de 700 MWt.

2) Durante el proceso de parada del bloque energético para su reparación se registró una disminución no reglamentada, aunque por poco tiempo, de la reserva operativa de reactividad (OZR), al extraer las barras reguladoras hasta quedar menos de 15 dentro de la zona activa.

«¿Podían estas violaciones llevar a la explosión del reactor nuclear o no?» — reflexiona Karpan—. Una primera variante de la respuesta es no. Esto si el reactor hubiera sido proyectado cumpliendo desde un primer momento con todas las exigencias de seguridad. La segunda variante de la respuesta es sí. Esto si el reactor era nuclearmente peligroso (explosivo), lo que no debe ser en ninguna circunstancia (...) ¿Era peligrosamente explosivo el reactor del cuarto bloque de la CEN de Chernobyl? Por supuesto que sí, ya que explotó después de haber sido efectuado el experimento con éxito y tenía lugar su parada programada mediante el accionamiento del interruptor previsto AZ-5» (Karpan, 2016).

Al dar por sentado que la sobrecriticidad incontrolada ocurrió luego de la inserción de las barras reguladoras en la zona activa durante la parada del reactor nuclear, Karpan refrenda la versión de Anatoli Stepánovich Dyatlov, responsable del experimento y principal inculpado por lo sucedido. Sustituto del ingeniero principal para la explotación de la CEN de Chernobyl, Dyatlov recibió altísimas dosis de radiactividad y, aun así, fue condenado a diez años de prisión, que no llegó a cumplir pues fue liberado por su mal estado de salud. Su testimonio *Chernobyl. Cómo fue*, escrito cuatro años antes de su muerte en 1995, es un dramático alegato de su pretendida inocencia. Su respuesta a las inculpaciones del INSAG-1 en una carta que envió al entonces director del OIEA, Hans Blix, fue publicada como artículo en la revista *Nuclear Engineering International* (Dyatlov, 1995).

El principal argumento técnico de Dyatlov es que, aun cuando un reactor nuclear fuera sumido en condiciones anormales de trabajo, su reactividad debe ser compensada siempre por los medios de control y protección como un principio inalienable de la seguridad

La madrugada del sábado 26 de abril de 1986, explotó el reactor RBMK-1000 del cuarto bloque de la Central Nuclear (CEN) de Chernobyl durante la realización de un experimento cuyo objetivo era incrementar —paradójicamente— la defensa en profundidad de la instalación. Según el informe del INSAG-7, versión oficial del Grupo Internacional Asesor sobre Seguridad del OIEA, este accidente se produjo debido a la superposición de las características físicas del reactor, las particularidades constructivas de sus órganos de regulación y la puesta del reactor en condiciones no reglamentadas (IAEA, 1992).

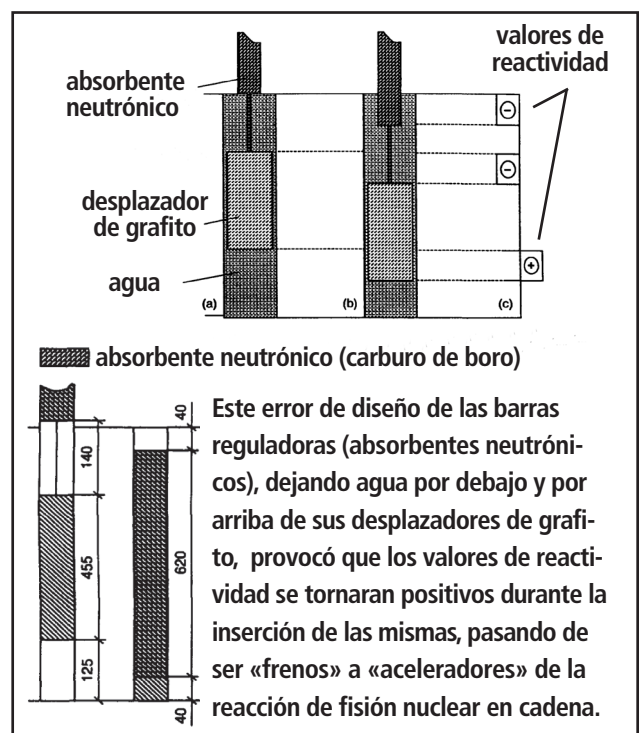
Sin embargo, hasta hoy día perviven dos puntos de vista irreconciliables sobre sus causas tecnológicas: la justificación de los proyectistas/constructores del reactor, quienes achacan la responsabilidad a los errores de operación (versión «termohidráulica»), y la réplica de los operarios/explotadores, que lo atribuyen a las graves deficiencias del RBMK-1000 (versión «neutrónica»). Pero lo cierto es que estos factores físicos (neutrónico y termohidráulico) no pueden desligarse el uno del otro. De ahí que coexistan varias hipótesis, igualmente válidas pero excluyentes entre sí, sobre cuál fue el suceso iniciador del accidente y su cadena causal con arreglo a la relación entre el hombre y la máquina. Esto dificulta definir este BDBA como un *normal accident*, comparándolo con TMI-2.

Chernobyl puso de manifiesto cuán profunda es la interrelación entre complejidad, acoplamiento rígido y fiabilidad en la energética nuclear. Más que un BDBA, la explosión del RBMK-1000 por supercriticalidad incontrolada fue el resultado de su propio diseño para doble uso (civil y militar). Este cometido determinó que su defensa en profundidad tuviera implícitas las «paradojas de la seguridad» y sus tres problemas concomitantes: el problema *trade-off* (o lo uno o lo otro), el problema del control y el problema de la «opacidad».

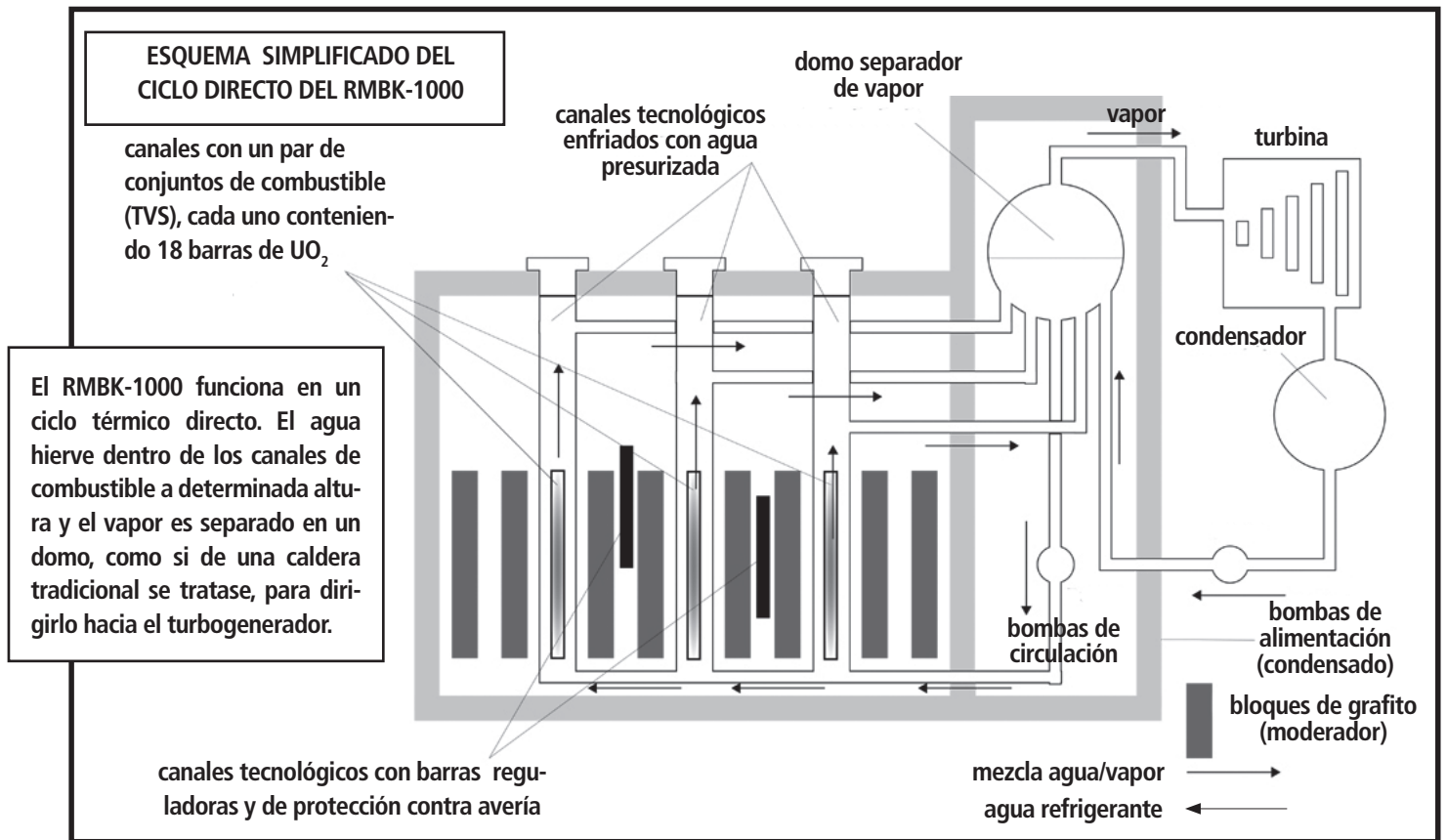
**EL PROBLEMA TRADE-OFF (O LO UNO O LO OTRO):** cuando la organización se encuentra ante el conflicto de priorizar las exigencias de producción o velar por su protección. Los proyectistas del RBMK-1000 se plantearon «cazar dos libres de un tiro»: energía eléctrica y plutonio-239, aunque esto implicara aceptar que predominara el *coeficiente positivo de vapor* o *huecos* de la reactividad en detrimento de la seguridad. La supercriticalidad incontrolada del RBMK-1000 en Chernobyl estuvo condicionado inobjetablemente por esa característica termofísica y neutrónica.

**EL PROBLEMA DEL CONTROL:** cuando las normas previstas de operación resultan inapropiadas o extemporáneas en determinados contextos de actuación. En este caso, eran confusas, contradictorias o no esclarecían suficientemente cómo actuar en consonancia con las características físicas adversas del RBMK-1000, sobre todo en los regímenes de trabajo a baja potencia. Esto incluye el desconocimiento de por qué era obligatorio detener el reactor si no era mantenida la *reserva operativa de reactividad (OZR)*: 15 barras reguladoras como mínimo dentro de la zona activa. La razón vino a saberse después de la catástrofe: por debajo de esa cantidad, esas barras no disminuían, sino que incrementaban la reactividad cuando todas eran introducidas para apagar el reactor, accionando el botón AZ-5. Ante tamaña peligrosidad del OZR, debían haber sido previstos indicadores permanentes de su valor en el panel de control, señal preventiva y protección automática que impidieran la violación de esa norma por los operarios.

**EL PROBLEMA DE LA «OPACIDAD»:** cuando la defensa en profundidad y sus sistemas redundantes pueden ocultar un peligro latente o inducir una falsa seguridad en los mantenedores y operadores del sistema. Los medios de control y protección del RBMK-1000 eran entendidos y asimilados por los operarios como un recurso infalible que permitía parar el reactor nuclear en cualquier circunstancia, según el principio SCRAM o «apagado rápido». Bastaría que todas las barras absorbentes de neutrones fueran introducidas en la zona activa, al accionar manualmente, sosteniéndolo, el interruptor conocido como AZ-5 (*Avarínnaya Zashita*; Protección contra Avería). Así era entendido y asimilado por los operarios, sin saber que esos mismos medios podían conducir a la desintegración catastrófica del sistema. Junto a la cuestión del OZR, fue el caso de los defectos constructivos de las barras reguladoras con los desplazadores de grafito, cuya total inserción al activar el botón AZ-5 pudieron provocar un aumento subitáneo de la reactividad. Este defecto se ha considerado uno de los factores cruciales que conllevaron a la explosión del RBMK-1000, al añadir más reactividad positiva a la ya provocada por el coeficiente de vapor a una baja potencia del reactor, máxime si su refrigerante ebullició o ya se había vaporizado.



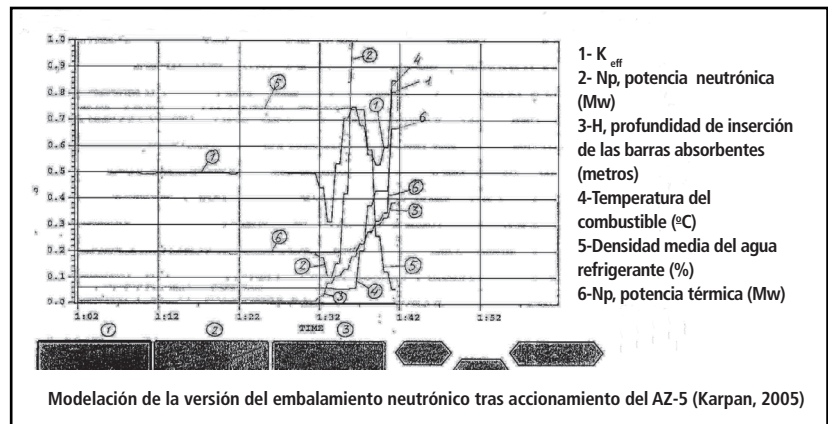
## EL RBMK-1000 Y SUS «PARADOJAS DE LA SEGURIDAD»



¿Comenzó la supercriticalidad incontrolada del RBMK-1000 antes o después de ser accionado el interruptor AZ-5 para apagarlo? A esta interrogante se debe que hasta hoy día pervivan las dos versiones irreconciliables sobre la secuencia del accidente: la «versión termohidráulica» de los proyectistas/constructores, y la «versión neutrónica» de los operarios/explotadores.

La respuesta depende de las modelaciones para tratar de reconstruir el «embalamiento» neutrónico/térmico que conllevó a la explosión del reactor nuclear. Al ocurrir en apenas 10 segundos, los datos registrados por los instrumentos son insuficientes y, tras ser descifrados, ha habido que interpretarlos con métodos matemáticos y empleo de simuladores.

El gráfico que aquí se reproduce responde a la «versión neutrónica», según la cual ese aceleramiento se inició tras activarse el AZ-5, cuando tuvo lugar la inserción de todas las barras reguladoras en el núcleo (Karpan, 2005). En un inicio, sus terminaciones de grafito provocaron un «embalamiento» neutrónico por sobrecriticalidad en la parte inferior de la zona



activa, al que siguió uno mucho más rápido, ya causado por el consiguiente aumento del coeficiente positivo de vapor.

Otras modelaciones afirman lo contrario: a pesar del defecto de las barras reguladoras, la reactividad añadida por su inserción no era suficiente para «embalar» el RBMK-1000 hasta la explosión (Abramov *et al*, 2006). Cuando se accionó el AZ-5, ya había ocurrido la interrupción del enfriamiento de la zona activa debido a la ebullición del refrigerante hasta vaporizarse («versión termohidráulica») con el consabido aumento del coeficiente positivo de vapor (huecos) de la reactividad.

La existencia de ambas versiones irreconciliables testimonia cómo el factor de la «sorpresa tecnológica» influye de manera determinante en la atribución de responsabilidades que sigue a cada accidente severo.

(el llamado principio SCRAM o «apagado rápido»). Su autodefensa se basa en que los operadores del RBMK-1000 nunca habían sido alertados de que esos propios medios podían acelerarlo —en vez de apagarlo—, si no era mantenida una cantidad de barras reguladoras (15 según la norma) dentro de la zona activa como reserva operativa de reactividad (OZR): «Después del accidente de Chernobyl fue descubierta una verdadera salvajada, un absurdo: para una pequeña reserva resulta que la protección contra avería no apaga, sino acelera el reactor. Mientras menor sea la reserva operativa, más peligrosamente explosivo resulta el RBMK-1000?!» (Dyatlov, 2003: 17). Según su testimonio, tras haber accionado el AZ-5, «a las 01 horas 23 minutos 47 segundos, ocurrió una explosión que estremeció todo el edificio y, un segundo o dos después, por mi percepción subjetiva, otra explosión aun más potente. Las barras de la protección contra accidente se detuvieron a medio camino. Y nada más» (Dyatlov, 2003: 31). Los testimonios de otros involucrados, así como los reportes de los instrumentos, corroboran esa versión que exime a los operarios de la culpa mayor, aunque no de toda la responsabilidad.

A la hipótesis de las barras reguladoras como la principal causa del accidente se opone resueltamente Dollezhal en su libro *En los orígenes del mundo artificial. Apuntes de un constructor*, refutándola por ser una de las versiones «que consideran como principales culpables a los “neutrones”» (Dollezhal, 1989: 238). Hasta su muerte en 2000, el constructor del RBMK-1000 mantuvo su «versión termohidráulica» sobre la cavitación de las bombas del circuito primario, así como que el embalamiento del reactor tuvo lugar cuando los operarios realizaban su experimento durante el intervalo de 35 segundos entre la desconexión del turbogenerador y el accionamiento del interruptor AZ-5. Quiere decir: el reactor nuclear escapó de control antes de que fuera accionada esa protección.

Como ya hemos visto, esta hipótesis no fue descartada por el INSAG-7 e, incluso, ha sido revitalizada en gran medida por las modelaciones que validan como suceso iniciador la pérdida del delta de temperatura del refrigerante y su ebullición prematura en la entrada a los canales de combustible hasta vaporizarse. La hipótesis más convincente en favor de la tesis de Dollezhal es que, a pesar del defecto de las barras reguladoras, la reactividad añadida por su inserción en la zona activa no era suficiente para embalar el RBMK-1000. Para ello era necesario que hubiera tenido ya muy aumentado el coeficiente positivo de vapor o huecos, lo que debió ocurrir por la pérdida de la refrigeración debido a esas causas termohidráulicas, incluida la cavitación de las bombas de alimentación del circuito primario (Abramov *et al*, 2006).

Como protagonistas en las antípodas de la disputa irreconciliable entre explotadores y constructores, Dyatlov y Dollezhal escribieron sus respectivos testimonios cuando todavía no se había publicado el INSAG-7. Esos libros conservan su valor histórico porque testimonian cómo el factor de la «sorpresa tecnológica» influye de manera determinante en la atribución de responsabilidades que sigue a cada accidente severo. En la medida que fue esclareciéndose lo sucedido con ayuda del análisis en retrospectiva, la coexistencia de las dos versiones contrapuestas hizo emerger a plenitud el conflicto humano: la versión «neutrónica»

responsabiliza del desastre a los proyectistas/constructores del reactor nuclear, mientras que la «versión termohidráulica» inculpa a los operarios/explotadores. Pero lo cierto es que los factores físicos (neutrónico y termohidráulico) no pueden desligarse el uno del otro. De ahí que coexistan varias hipótesis, igualmente válidas pero excluyentes entre sí, sin que pueda ofrecerse una versión concluyente que identifique cuál fue el suceso inicial, el fallo crucial y la secuencia accidental hasta la destrucción definitiva del RBMK-1000. Esto impide definir a Chernobyl como un *normal accident*, comparándolo con TMI-2.

Chernobyl puso de manifiesto cuán profunda es la interrelación entre complejidad, acoplamiento rígido y fiabilidad en la energética nuclear. Más que un accidente fuera de la base de diseño (BDBA), la explosión del RBMK-1000 por supercriticalidad incontrolada fue el resultado de su propio diseño para doble uso (civil y militar). Este cometido determinó que su defensa en profundidad tuviera implícitas las «paradojas de la seguridad» y sus tres problemas concomitantes (ver infografía 7):

1) el problema *trade-off* (o lo uno o lo otro), cuando los proyectistas se plantearon «cazar dos liebres de un tiro»: producir energía eléctrica y «cosechar» plutonio-239, aunque esto implicara aceptar que predominara el *coeficiente positivo de vapor o huecos de la reactividad* en detrimento de la seguridad;

2) el problema del control, porque las normas previstas de operación eran confusas, contradictorias o no esclarecían suficientemente cómo actuar en consonancia con las características físicas adversas del RBMK-1000 en ciertos regímenes de trabajo (sobre todo a baja potencia), incluida la necesidad de parar obligatoriamente el reactor nuclear si no era mantenida la *reserva operativa de reactividad* (OZR): 15 barras reguladoras como mínimo dentro de la zona activa;

3) el problema de la «opacidad», porque los medios de control y protección no cumplían con el principio SCRAM o «apagado rápido», aunque se asumían como un recurso infalible que permitía parar el reactor nuclear en cualquier circunstancia. Así era entendido y asimilado por los operadores, sin saber que esos mismos medios podían conducir a la desintegración catastrófica del sistema. Junto a la cuestión de la OZR, es también el caso de los defectos constructivos de las barras reguladoras con los desplazadores de grafito, cuya total inserción al activar el botón AZ-5 pudo haber causado el desenlace fatal.

Al reputado ingeniero Víctor Sidorenko, máxima autoridad en seguridad nuclear de la URSS, se debe la mejor definición del desastre de Chernobyl: «El hombre lo cometió, mas el reactor lo propició» (Asmolov y Kozlova, 2018: 92). Quiere decir: los operarios desestabilizaron el RBMK-1000 —de esto no hay dudas—, mas nadie sabía que podía explotar debido a su ignorado comportamiento termofísico a baja potencia, además del error constructivo de sus barras de protección. De ahí las modificaciones de diseño básico y mejoras de la seguridad que, con apoyo del OIEA, debieron introducirse aceleradamente después de ocurrido el accidente (Lederman, 1996). Téngase en cuenta que el 50% de las centrales atómicas soviéticas tenían reactores de ese tipo. Esos cambios estuvieron dirigidos en primera instancia a reducir el coeficiente positivo de vapor (o huecos) de la reactividad hasta

donde fuera posible, mediante el enriquecimiento del combustible de 2% a 2,4%. Es muy significativo que el margen de reactividad operacional (OZR) fue aumentado a entre 43 y 48 barras equivalentes, previendo la parada del reactor si es menor de 30 o cuando la potencia térmica disminuye por debajo de 700 MWt. Asimismo se introdujeron cambios importantes en el sistema de control y protección, incluyendo el rediseño de las barras reguladoras, su cantidad y velocidad de inserción. Pero el gran problema del RBMK-1000 continúa siendo la vulnerabilidad intrínseca de su defensa en profundidad por la ausencia de contención o encapsulamiento, aunque hay expertos nucleares que continúan defendiendo este prototipo, llegando a proponer que debe mantenerse en explotación e, incluso, potenciarlo<sup>10</sup>.

#### 2.4.4/ *La doble explosión: su naturaleza indefinida*

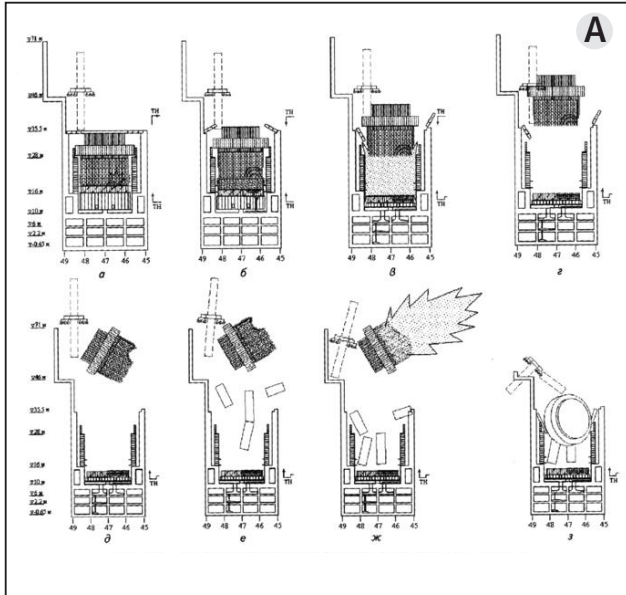
Hasta el día de hoy no existe una respuesta plausible sobre el carácter de las dos explosiones que supuestamente tuvieron lugar en Chernobyl, ya que no encajan dentro de una clasificación ordinaria por la naturaleza de la energía almacenada (química o nuclear) y por su mecanismo de liberación subitánea (térmica o en cadena) (ver infografía 8). Una explosión de naturaleza química libera la energía térmica de los enlaces interatómicos y, mientras más alta sea la temperatura, mayor será su mecanismo de liberación. Una explosión de naturaleza nuclear libera la energía contenida en el núcleo atómico debido a la multiplicación de los actos elementales entre sí. Es el caso singular de la fisión incontrolada de los nucleidos de uranio-235 bajo la avalancha neutrónica.

La mayoría de los expertos se inclinan a que la explosión más potente y destructiva del RBMK-1000 fue producida por acumulación del vapor —o sea, de naturaleza química—, quedando descartado que fuera causada por desprendimiento de hidrógeno, pues se hubiera necesitado una enorme acumulación de estos gases en muy poco tiempo (Abramov *et al*, 2006). No hay dudas de que el mecanismo de liberación fue térmico debido a que el sistema de refrigeración no logró extraer el calor desprendido, creció abruptamente la temperatura y, como resultado, aumentó la concentración volumétrica del vapor hasta que el reactor explotó por el aumento de la presión en su interior. Pero bien pudo ser que esa misma «vaporización» provocara el incremento del coeficiente positivo de reactividad por huecos y, como consecuencia, ocurriera primeramente la fisión incontrolada del uranio-235 bajo el impacto neutrónico. Si se asume que el exceso de energía provino inicialmente de ese embalamiento neutrónico, entonces la explosión química del vapor pudo ser antecedida por un estallido de naturaleza nuclear. O sea, pudo existir una retroalimentación positiva

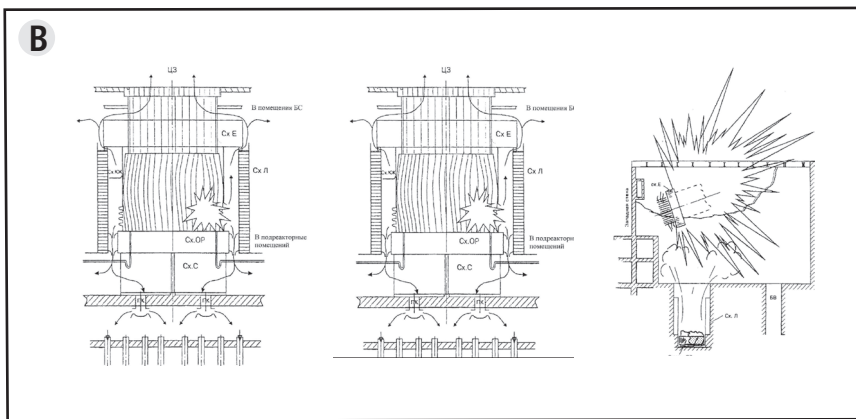
---

<sup>10</sup>A partir de que fueron introducidas modificaciones del diseño básico y mejoras de la seguridad en los RBMK-1000, sus supuestas ventajas fueron retomadas por el Instituto de Investigaciones Científicas y Constructivas de la Técnica Energética (NIKIET por sus siglas en ruso) que lleva el nombre de N. A. Dollezhal, constructor principal de ese reactor agua-grafito. En esa dirección fue significativa la conferencia internacional «Reactores de canales. Problemas y soluciones», celebrada en 2004 en Moscú. La reivindicación de ese prototipo trajo aparejada el reforzamiento de la «versión termohidráulica» con nuevos modelos matemáticos y simulaciones para demostrar que el accidente de Chernobyl se debió íntegramente a las violaciones de los operadores durante el experimento. Estos estudios concluyeron: «El reactor fue colocado en una condición no reglamentada y no acorde con el programa de las pruebas, poniéndose de manifiesto los aspectos débiles de su construcción (alto coeficiente positivo de vapor de la reactividad, e insuficiente efectividad del sistema de protección en situaciones no reglamentadas). Después de la avería todas esas deficiencias fueron eliminadas» (Abramov *et al*, 2006).

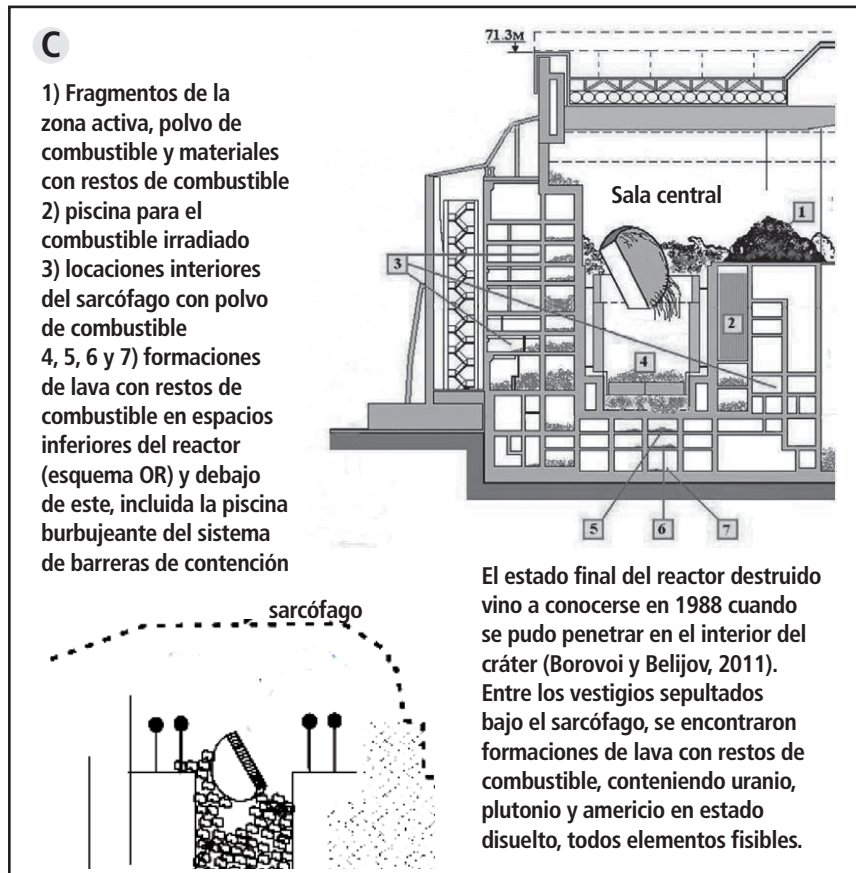




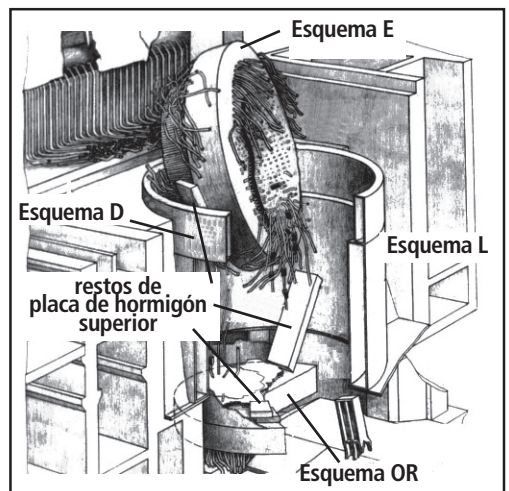
**H**asta el día de hoy no existe una respuesta convincente sobre el carácter de la doble explosión que supuestamente tuvo lugar en Chernobyl. A partir del estado final del RBMK-1000 en ruinas, se ha tratado de explicar cómo pudo ocurrir ese proceso destructivo. Hay consenso en que una primera explosión se produjo en la parte inferior de la zona activa (tercer cuadrante, sureste). La «versión termohidráulica» (imagen A) insiste en la ebullición y vaporización del agua refrigerante como causante de la ruptura de los canales tecnológicos, a partir de la cual aumentó la presión de la mezcla de vapor y gases hasta provocar una explosión química (Abramov *et al*, 2006). La «versión neutrónica» (imagen B) sostiene que tuvo un carácter seminuclear debido a la sobre criticidad local producida por el efecto de los desplazadores de grafito de las barras reguladoras. (Karpan, 2005).



¿Cómo se produjo la segunda explosión, si realmente la hubo, y la destrucción definitiva de la zona activa? Hay un reconocimiento de que esta segunda fase está apenas estudiada y que posiblemente nunca pueda explicarse a ciencia cierta. Este carácter incognoscible de la *irreversibilidad*, cuando el sistema tecnológico se destruye en apenas unos segundos, contribuye al reconocimiento de Chernobyl como catástrofe tecnológica que supera el concepto de accidente superior a la base de diseño (BDBA).



En las imágenes C y D se muestra cómo quedó el reactor nuclear después de su destrucción. La construcción acelerada de un sarcófago sobre el cráter evitó que continuaran escapando más radionucleidos. Existen divergencias sobre qué cantidad de material altamente radiactivo fue arrojada al exterior y cuánta quedó sepultada bajo esa estructura improvisada.



Infografía 8: Versiones de la doble explosión del RBMK-1000. Fuente: elaboración propia.

entre los dos mecanismos de liberación: en cadena y térmico (Sharaevski *et al*, 2016), o una llamada «explosión térmica de origen nuclear», de la que hay casos reportados en reactores de investigación (Kravchuk, 2010; McLaughlin *et al*, 2006).

A partir del estado final del reactor en ruinas, se ha tratado de entender cómo pudo ocurrir ese proceso destructivo en correspondencia con las dos versiones sobre el inicio de la sobrecriticidad incontrolada: si comenzó antes o después de accionar el AZ-5. Ambas versiones coinciden en que la primera explosión se produjo en la parte inferior de la zona activa (tercer cuadrante, sureste). La «versión neutrónica» sostiene que tuvo un carácter seminuclear debido a la sobrecriticidad producida por el efecto de los desplazadores de grafito de las barras reguladoras (Karpan, 2005; Kravchuk, 2010). Por su parte, la «versión termohidráulica» insiste en la pérdida de refrigeración como causante de la ruptura de los canales tecnológicos, a partir de la cual aumentó la temperatura y presión de la mezcla de vapor y gases hasta provocar una explosión química (Abramov *et al*, 2006).

¿Cómo se produjo la segunda explosión, si realmente la hubo, y la destrucción definitiva de la zona activa? Prima el reconocimiento de que esta segunda fase del desastre apenas ha sido estudiada y que posiblemente nunca pueda explicarse. Este carácter incognoscible de la *irreversibilidad* (Nazarov, 2006), cuando el sistema tecnológico se destruye en fracciones de segundos, obliga a entender Chernobyl como catástrofe que supera el concepto de accidente superior a la base de diseño (BDBA). Tampoco cabe dentro del concepto de «accidente normal», al no existir una versión definitiva sobre su suceso inicial, el fallo crucial y la cadena causal. En todo caso podría tacharse de un *accidente postnormal*, que así podría definirse por las razones expuestas sobre su función primigenia de doble uso (militar y civil) (Calcines, 2021).

La gran explosión del RBMK-1000 —primera y única de esa magnitud hasta el momento en la historia de la energética nuclear— tuvo dos efectos perjudiciales que la asemejan a una bomba atómica: la radiación penetrante y la contaminación radiactiva, aunque careció de la onda de choque y de la radiación luminosa. A diferencia de ese artefacto bélico, cuyos fragmentos radiactivos no se producen hasta que ocurre el estallido, en el caso de Chernobyl fueron lanzados a la atmósfera los productos de la fisión atómica acumulados en el combustible del reactor durante todo el tiempo de campaña. Como resultado, aunque esa explosión fue inferior en potencia destructiva a la de Hiroshima (en cinco órdenes), su contaminación radiactiva con nucleidos de larga vida fue mayor en dos órdenes; o sea, más de cien veces (Sharaevski *et al*, 2016).

Si la máxima avería por proyecto del RBMK-1000 hubiera previsto ese escenario, aun así difícilmente podría establecerse un criterio de defensa en profundidad con barreras físicas capaces de contener la energía acumulada y la radiactividad resultantes. Luego de esa experiencia nefasta, los dos grandes artífices de la bomba H, Andrei Sajarov y Eduard Teller, coincidieron en que los reactores debían construirse bajo tierra como la única solución para garantizar el futuro de la energética nuclear, de la cual ambos —aun así— seguían declarándose partidarios (Sajarov, 1988; Teller y Shoolery, 2001).

#### 2.4.5/ *El testimonio inconcluso del académico Legásov*

Después de la experiencia de Kyshtim en 1957 (ver subacápite 2.1), las autoridades soviéticas diseñaron planes de respuesta para una contingencia nuclear o emergencia radiológica, incluido el ataque militar de una potencia extranjera (Ilin, 1994). El desastre de Chernobyl significó un desafío equiparable a la derrota después de una confrontación bélica, pero con el agravante de que el enemigo era ingénito al propio sistema autoritario y su atmósfera de absoluto secretismo. Aun así, gracias a su enorme capacidad movilizativa, el Estado soviético logró implementar las ingentes labores de *likvidatsiya* (liquidación) para revertir en lo posible las consecuencias primarias del desastre radiológico. Pero este esfuerzo descomunal tuvo un altísimo costo para la comunidad tecnocientífica nuclear, abocada a una crisis moral y política sin precedentes que afectó la vida de sus miembros, partiéndola en dos mitades: antes y después de Chernobyl. Las memorias inconclusas dictadas en cinta magnetofónica por el académico Valeri Aleksévich Legásov son un testimonio vívido de aquella batalla de los expertos nucleares contra sí mismos en su doble condición de culpables y salvadores; de protagonistas tanto de la tragedia como de la epopeya.

Con las miras puestas en concebir un libro, hasta el día antes de acabar con su vida, Legásov había previsto entregar sus memorias dictadas al redactor de la sección científica del diario *Pravda*, el conocido periodista e historiador de la ciencia Vladimir Gubarev, autor de la pieza teatral *Sarcófago* (1987). Este logró recuperar las cintas magnetofónicas cuando ya habían sido decomisadas por las autoridades después de la muerte del académico, y se atrevió a publicar una versión abreviada en dicho periódico (20 de mayo de 1988). Posteriormente, la transcripción de esas cintas fue dada a la luz en forma íntegra (salvo con algunos borrones inaudibles) por la viuda de Legásov en 1996 y 2010. Ambas ediciones impresas tuvieron cortas tiradas que se repartieron entre especialistas de la rama atómica y algunos familiares allegados (Soloviov *et al*, 2020). Puede consultarse su texto original en ruso en internet, aunque existen algunas versiones apócrifas.

El espectacular éxito de la miniserie *Chernobyl*, coproducción de la norteamericana HBO y la británica Sky<sup>11</sup>, ha redimensionado la figura de Legásov a niveles inesperados, pero tergiversando completamente el contenido de sus memorias, además de que jamás participó en el juicio a los responsables del accidente. Este dio inicio el 11 de julio de 1987 y su versión taquigráfica aparece publicada en el libro *Chernobyl. La venganza del átomo pacífico*, ya que su autor Nikolai Karpan tuvo acceso a las audiencias como oyente. Eso sí, Legásov siempre consideró que aquellas personas eran culpables y merecían un severo castigo por la desatinada ejecución del experimento, aunque termina reconociendo en sus memorias que la verdadera culpabilidad recae en los diseñadores del RMBK-1000. Por tanto, el académico corrigió radicalmente su primer veredicto sobre las causas tecnológicas del accidente, que había defendido como vocero oficial de la delegación soviética en la reunión del OIEA en Viena, cuando atribuyó toda la culpa a los operarios. Es importante

---

<sup>11</sup>La miniserie *Chernobyl* se estrenó en los Estados Unidos, el 6 de mayo de 2019, y en el Reino Unido el 7 de mayo de 2019. Ganó varios premios de la crítica en la 71ª edición de los Premios Primetime Emmy.

señalar que, cuando Legásov se quitó la vida, todavía seguía vigente el informe INSAG-1, ya que el INSAG-7 no salió a la luz hasta 1992 (subacápite 2.4.2).

Tampoco parece que Legásov sufriera persecución por el KGB, siendo de otra índole el drama que lo llevó al suicidio, el 27 de abril de 1988, un día después de haberse cumplido el segundo aniversario de Chernobyl. Padecía una severa depresión clínica desde que se le diagnosticó una pancreatitis crónica por los efectos de la radiación, además de frecuentes insomnios y otras secuelas relacionadas con el estrés acumulado (Gubarev, 2019). A pesar de sus proezas como miembro de la comisión gubernamental que dirigió los trabajos de liquidación, a Legásov le fue negado el premio de Héroe del Trabajo Socialista que recibieron otros participantes en la consecución del proyecto «Resguardo» (*Ukrytie* en ruso), más conocido como el sarcófago de Chernobyl. Al decir de su esposa, hija y otras personas cercanas, este agravio influyó sobre su estado de salud mental, así como las desavenencias en el seno de la comunidad tecnocientífica nuclear; en especial, la hostilidad de sus colegas del Instituto Kurchátov (Soloviov *et al*, 2020)<sup>12</sup>. Allí fungía como subdirector de investigaciones bajo el mando del eminente académico Anatoli Petróvich Alexándrov, cuya inmensa reputación se hundía en el descrédito por haber sido el director científico del RMBK-1000.

Aunque no lo cuenta en sus memorias, todo hace indicar que Legásov fue recomendado por Alexándrov a las instancias gubernamentales, cuando estas exigieron la inmediata movilización de los científicos más capacitados para valorar cuán severos eran los daños del accidente. Siendo tecnólogo químico de formación, Legásov se había vinculado desde su época de estudiante al Instituto Kurchátov en temas relacionados con el reprocesamiento del combustible atómico, además de haber trabajado como recién graduado en un combinado radioquímico para la obtención de plutonio. Era un gran conocedor de las propiedades de los transuránicos y otros elementos muy explosivos, así como de su trabajo en condiciones anormales: alta temperatura, reacciones con diferentes materiales, poder destructivo... Luego de concluir su tesis doctoral se había dedicado a la síntesis de gases nobles, así como a la obtención de compuestos inorgánicos para aprovecharlos con fines industriales (civil y militar). También se dedicaba al estudio del plasma y el desarrollo de la energética del hidrógeno. De modo que su campo del saber era la físico-química nuclear en el más amplio espectro.

A tenor con la experiencia de Three Mile Island y la catástrofe de Bhopal, Legásov se había interesado en desarrollar una nueva filosofía de la seguridad nuclear, incluyendo el empleo de métodos probabilísticos, aunque reconocía que la física y la técnica de los reactores nucleoenergéticos eran para él «un campo vedado, tanto por mi propia formación profesional, como por el tabú que habían instaurado el propio Anatoli Petróvich Alexándrov y sus subordinados dedicados a ese campo. A ellos no les gustaban mucho las intromisiones

---

<sup>12</sup>En la miniserie televisiva se maneja que Mijail Gorbachev despojó a Legásov del premio gubernamental, aunque el expresidente de la URSS lo ha desmentido. Todo hace indicar que ningún miembro del Instituto Kurchátov fue galardonado luego de que su director, Anatoli P. Alexándrov, aceptó su responsabilidad por los errores en la concepción del RMBK-1000 (Bodrijin, 2018). También se maneja que los *kurchátovzi* decidieron renunciar por sí mismos a todo premio, salvo precisamente el académico Legásov, quien sí lo deseaba (Asmolov, 2019).

de personal ajeno en sus asuntos profesionales» (Legásov, [1988]1996). Esta confesión suya es una clave importante para entender el trasfondo de sus memorias, que incluyen el borrador de un artículo sobre Chernobyl para la revista *Scientific American* y sus respuestas a una entrevista oral que le hace el escritor bielorruso Ales Adamovich. Toda esa información de la cinta magnetofónica puede dividirse tentativamente en dos grandes bloques temáticos, aunque su contenido aparece disperso, repetido y confuso.

El primer bloque temático atañe a sus valoraciones críticas sobre la evolución histórica de la energética nuclear en la URSS, la necesidad de una renovación conceptual en el ámbito de la seguridad y las características negativas del RBMK-1000. Considerándolo un «error filosófico», Legásov considera que su mayor deficiencia es la ausencia total de una barrera de contención o encapsulamiento, tal y como poseen los reactores occidentales PWR: «El mayor crimen que se cometió fue haber sumido a la energía atómica soviética en la filosofía vandálica de autorizar la construcción de reactores sin cápsula (VVER o RBMK). Si hubiera habido cápsula, el RBMK simplemente no hubiera surgido. Como no surgió en ningún otro lugar del planeta este tipo de reactor» (Legásov, [1988]1996). En su opinión, el origen de la «ideología del RBMK-1000» se remonta a mediados de la década de 1960, cuando el gobierno soviético comprendió que se había retrasado en la implementación de la energía atómica, al priorizar el desarrollo termoenergético basado en el carbón. Entonces se decidió adaptar apresuradamente el modelo grafito-agua de reactor industrial —o sea, militar— a la esfera nucleenergética de interés civil, pero no se tuvo en cuenta que las condiciones de explotación serían distintas en cuanto a calificación del personal, control y disciplina<sup>13</sup>.

Al sacarle los pellejos a los *reactorchiki* (especialistas en reactores), reprochándoles por su falta de previsión, Legásov destaca algunas interioridades de la comunidad tecnocientífica nuclear como el divorcio institucional que existía entre el director científico del RBMK-1000 (Anatoli Alexándrov) y su constructor principal (Nikolai Dollezhal). Pero solo considera como culpable del descalabro a este último —sin mencionarlo por su nombre—, mientras que exonera de responsabilidad a Alexándrov, justificando que este aceptó dicho modelo de reactor bajo presión gubernamental. Estas opiniones contradictorias de Legásov debieron granjearle la animadversión de muchos físicos nucleares, tanto proyectistas/constructores como operarios/explotadores, quienes verían con recelo que un químico tratara de validarse políticamente como el adalid de la filosofía de la seguridad nuclear, entrometiéndose en una rama ajena a su conocimiento. No obstante, Legásov parece ser autocrítico en sus memorias, al punto de reconocer que su participación en los sucesos de Chernobyl solamente se justifica porque ya no se trataba de un reactor en sí, sino de sus restos radiactivos: «Soy una figura un tanto confusa. Por un lado conozco los

---

<sup>13</sup>Los primeros reactores nucleares (industriales y civiles) fueron proyectados y explotados por Minsredmash (Ministerio de la Maquinaria Media), como se llamó secretamente al ramo dedicado al proyecto de la bomba atómica. A partir de 1966, el gobierno decidió que los reactores nucleenergéticos pasaran a Minenergo (Ministerio de la Energética), considerando que ya eran lo suficientemente seguros y podían serializarse a mayor escala. Varios científicos fundadores como Alexándrov alertaron que ese traspaso rompería el vínculo entre los operarios/explotadores, por un lado, y los proyectistas/constructores de los reactores nucleares, por el otro. A este problema organizativo se refiere Legásov como la causa principal de Chernobyl, ya que a partir de aquella decisión ministerial se perdió el enfoque riguroso e integral de la cuestión atómica.

problemas de la seguridad desde un punto de vista filosófico: cómo deben plantearse y solucionarse. Conozco el ciclo de combustible nuclear y su manifestación exterior. Pero he sido solamente un testigo de la epopeya del reactor» (Legásov, [1988]1996).

El segundo bloque temático de sus memorias es el testimonio cronológico sobre su actuación como miembro de la primera comisión gubernamental que, desde el 26 de abril en la noche, se instaló en la ciudad de Prípiat para organizar y dirigir las acciones de emergencia y rehabilitación post-accidente. Aunque su labor como experto se extendió a múltiples cuestiones, por ser la mayor autoridad científica entre los comisionados, Legásov se dedicó fundamentalmente a la identificación y reducción de los daños; en especial, a la búsqueda de una solución urgente para detener la liberación radiactiva desde el cráter del cuarto bloque derruido. Es lo que veremos finalmente con el ánimo de justipreciar a esta «figura confusa», cuya dramática historia se ha convertido en uno de los símbolos de la tragedia de Chernobyl. Pero es necesario aclarar que se trata de un tema muy polémico debido a su tratamiento sesgado, sobre todo después de la miniserie de HBO y Sky.

Desde su llegada a La Zona, como se llamó al área de exclusión de 30 kilómetros alrededor del epicentro del desastre, Legásov desempeñó un papel protagónico, sobrevolando varias veces el cráter del reactor derruido a bordo de helicóptero. Según narra en sus memorias, entre destellos intermitentes de luz violeta, los bloques recalentados del grafito ardían por encima de su temperatura de ignición (1500 °C), despidiendo blancas columnas de humo repletas de aerosoles gaseosos radiactivos. De acuerdo con sus cálculos, antes de la explosión había 2400 toneladas de grafito en la zona activa, además del combustible atómico (UO<sub>2</sub>). Una de las grandes incógnitas era qué cantidad de todo ese material había sido expulsado del reactor por la explosión y cuánto había quedado dentro, formando parte de sus restos. Pero antes había que comprobar urgentemente si todavía tenía lugar la reacción de fisión nuclear en cadena con liberación de neutrones. Acercándose en un transporte blindado al cuarto bloque, Legásov verificó personalmente que los dosímetros existentes no servían para medir la radiación neutrónica, ya que sus sensores solo registraban la fuerte radiación gamma. Entonces propuso un método indirecto de medición radioquímica basado en la relación de los radioisótopos yodo-134/yodo-131. Esta fue su primera proeza como liquidador.

Una vez comprobado que el reactor derruido se encontraba en estado subcrítico —o sea, que la reacción en cadena decaía por sí misma—, el próximo desafío consistió en detener las emisiones radiactivas desde el cráter humeante. Había solo dos opciones extremas: dejar que el grafito ardiera completamente (a la velocidad de una tonelada por hora, serían 2400 horas; o sea, 100 días de peligrosas emisiones continuas), o tratar de apagar cuanto antes ese foco gigantesco de contaminación radiactiva. Tras optar por esta última opción, Legásov propuso una solución inédita: verter desde helicópteros una mezcla de boro, plomo, dolomita, arena y arcilla para detener la combustión de los bloques de grafito, manteniendo el adecuado balance de temperaturas dentro del cráter. Para esto debía lograrse que la energía desprendida por la desintegración radiactiva de la masa uránica fuera consumiéndose por aquella mezcla vertida durante sus cambios de fases. Si la temperatura subía, habría que detener la operación.

A esa lógica obedeció la elección de las sustancias y/o componentes de la mezcla. Por ser un gran absorbente de neutrones, el boro evitaría cualquier despunte de la reacción de fisión nuclear en cadena. La arena ( $\text{SiO}_2$ ) funcionaría como un absorbente de energía térmica, evitando que el uranio se fundiera. El plomo estaba destinado a contener la radiación gamma, además de facilitar la absorción de calor debido a su baja temperatura de fisión. La dolomita ( $\text{Mg-OH}$ ) serviría como una fuente de dióxido de carbono que ahogaría el fuego. En síntesis: la arena, el plomo y la dolomita harían que primaran las reacciones endotérmicas (consumidoras de calor). Por último, la arcilla posibilitaría el filtrado de las partículas radiactivas, de manera que estas quedaran atrapadas en esa capa absorbente y se dificultara su salida al exterior.

Durante varios días, con ayuda de helicópteros, fueron lanzadas más de cinco mil toneladas de esos materiales hasta que el cráter quedó definitivamente sellado. En su testimonio Legásov enfatiza que el verdadero sentido de la mezcla, además de apagar el grafito, era evitar que la temperatura en el interior del reactor derruido subiera hasta  $2500\text{ }^\circ\text{C}$  y se produjera la fusión de las tabletas de  $\text{UO}_2$ , cuyo contenido era mucho más radiactivo por contener el uranio-235 y los productos de la fisión, plutonio-239 incluido. De haber sucedido esto —explica el académico— «no hubiera sido el 3% de la actividad liberada, sino el 100% (...) El área de los territorios, su grado de contaminación, su intensidad, hubieran aumentado 30 veces en relación con lo que sucedió. En casi 33 veces. De hecho, incluso más, ya que los isótopos sucios serían mucho más pesados que el cesio» (Legásov, [1988]1996).

Aunque fueran arrojadas decenas de toneladas de boro sobre el cráter, esto no significaba que se hubiera eliminado completamente la amenaza de criticidades locales en la masa uránica, así como de que subiera su temperatura y el combustible ardiente descendiera hasta entrar en contacto con los depósitos acuíferos situados debajo del reactor nuclear, provocando una nueva explosión. Al evaporarse súbitamente el agua en esos reservorios, ese proceso liberaría una gran cantidad de radiactividad a la atmósfera. Felizmente, pudo comprobarse que dichos depósitos estaban vacíos y quedó descartada esa posibilidad. Sin embargo, aun así la situación siguió siendo sombría cuando Evgueni Velijov, otro reconocido científico del Instituto Kurchátov, manejó que esa lava uránica podría penetrar en la tierra hasta llegar al manto freático y provocar también una enorme explosión que contaminaría radiactivamente la reserva acuífera de Ucrania. «Todo hace indicar que Velijov, luego de haber visto demasiado la película *El Síndrome de China*, trajo consigo esa preocupación», afirma Legásov con cierta sorna en sus memorias. Aunque ese escenario pareciera casi improbable, se tomó la decisión de cavar un túnel subterráneo por debajo de la zona activa para construir una losa térmica que impidiera tal desenlace. En cualquier caso, esta solución ayudaría en caso de que la estructura del reactor colapsara u otra adversidad imprevista. Para esa tarea se movilizó un contingente de mineros de las cuencas carboníferas, quienes cumplieron esa tarea titánica en pocos días.

Paralelamente se fue acometiendo la desactivación de los territorios contaminados, entre otras faenas sin tregua que involucraron a centenares de miles de hombres. Su clímax tuvo lugar cuando, a partir del 20 de mayo, en apenas siete meses fue erigido el sarcófago de Chernobyl, una estructura ingenieril sin precedentes, hecha de cemento y acero con ventilación, enfriamiento

y sistemas para controlar los restos del reactor derruido. Hoy ya se conoce la disposición heterogénea de esa masa radiactiva compuesta por restos del combustible nuclear, productos de fisión, concreto fundido y trozos derretidos de las barras de control, entre otros elementos de la zona activa que reaccionaron entre sí durante la explosión del RBMK-1000. Destacan las formaciones uránicas que penden como estalactitas en las zonas inferiores del antiguo reactor. Están compuestas por la triada  $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$ , ya que se formaron cuando los elementos de combustible (pastillas de uranio y sus envolturas de circonio) se derritieron e interactuaron con el silicio del cemento, arena y metal de las estructuras. Habiendo incorporado también otros elementos químicos, esa lava altamente radiactiva —conocida como «corio»— descendió hasta terminar solidificándose en distintos tipos de cerámica. Es el caso del «Pie del Elefante», una formación de varios metros de diámetro, cuya forma se asemeja a las extremidades de ese animal (Borovoi y Velijov, 2012).

Aunque fue previsto teóricamente para durar entre 20 y 40 años, el sarcófago se deterioró con el paso del tiempo y se desataron nuevos peligros. Si bien no se reportó ningún caso de criticidad nuclear, nunca estuvo excluido que esas acumulaciones uránicas pudieran activarse neutrónicamente bajo la influencia de factores como el calor y la humedad. Al entrar en contacto con el agua, esos restos cerámicos sufrieron transformaciones que pusieron en riesgo de derrumbe la construcción original, de ahí las sucesivas propuestas para recubrirla con otras estructuras más modernas (Borovoi y Velijov, 2015). A fines de 2019 fue terminado por el consorcio francés Novarka el nuevo sarcófago de Chernobyl. Conocido como El Arca, esta estructura móvil se sobrepone al sarcófago antiguo para facilitar que sea demolido. Está previsto que esa nueva instalación contenga los restos del cuarto bloque durante los próximos cien años (Novarka, 2018).

Hasta hoy día persisten fuertes discrepancias científicas sobre cuánta masa radiactiva escapó del RBMK-1000 y cuánta quedó bajo el sarcófago. Luego de accederse al interior del cráter en 1988, el estudio pormenorizado de esos restos ha demostrado que los procesos destructivos fueron muy diferentes a los imaginados. En primer lugar, resulta discutible que la cantidad de combustible arrojada del reactor haya sido tan solo el 3-4%, unos 50 000 Terabequerelios (TBq) de actividad emitida, si bien esta cifra ha quedado refrendada oficialmente por el OIEA. Partiendo de que había 190,2 toneladas de  $\text{UO}_2$  en el interior del cuarto bloque antes de que explotara, los especialistas del Instituto Kurchátov se dedicaron a buscar y cuantificar físicamente esos restos debajo del sarcófago (Borovoi y Velijov, 2012). Según expresó Belijov en entrevista con motivo del vigésimo quinto aniversario de la tragedia: «Estudiar cuánto quedó debajo del reactor nos llevó casi 25 años, ya que era un trabajo muy duro; incluso hoy día existen locaciones adonde no se puede ir, pero ya sabemos dónde está y qué sucedió con el combustible» (Yujova, 2011). Sin embargo, difícilmente se obtenga una respuesta concluyente al enigma de cuánta cantidad de combustible nuclear fue arrojada del reactor, como tampoco hay respuesta posible al enigma de la presunta doble explosión del RBMK-1000 (Belozerski, 2006). Y es que ambas cuestiones dependen una de la



otra en un círculo cerrado. Y de ellas se deriva un tercer enigma: ¿Cuánta radiactividad entonces fue arrojada al medio ambiente?

Al tener que confinar grandes cantidades de radionucleidos cuyas propiedades difieren del combustible gastado en los reactores durante su funcionamiento normal, el sarcófago de Chernobyl es un anticipo de cómo la energía nuclear hoy consumida podría complicar la vida de las generaciones venideras, si sus desechos líquidos y sólidos terminan transformándose en conglomerados radiactivos cuya peligrosidad superara las soluciones tecnológicas adoptadas para su control (OECD, 2016b). ¿Qué sucedería si los transuránicos y otros materiales (grafito irradiado, por ejemplo) fueran confinados en yacimientos geológicos profundos, donde quedarán olvidados a merced de las inclemencias de la naturaleza como pueden ser los terremotos o la erosión corrosiva de las aguas subterráneas? Esta preocupación futurista del dilema ubicación/seguridad se refiere en primer lugar a los radionucleidos de larga vida como el plutonio, cuyo dilatado horizonte temporal los hace casi eternos con respecto al ser humano y la biota, al mantenerse activos miles y miles de años.

Esto ha llevado al reconocimiento de las incertidumbres científicas sobre cuál puede ser la solución definitiva para el procesamiento y disposición final de los residuos de alta actividad (High-Level Nuclear Waste, HLNW), provenientes tanto del ciclo de combustible nuclear como del funcionamiento de los reactores y de su desmantelamiento (*decommissioning*). Tratándose de un dilema irresoluble, se plantean dos opciones extremas: el *confinamiento* o el *reprocesamiento*, así como dos formas correspondientes de gestionarlas: *ciclo de combustible abierto* y *ciclo de combustible cerrado*. En el primer caso (confinamiento-ciclo abierto), el combustible nuclear es usado una sola vez y, tras considerarlo desecho radiactivo, es enviado para su almacenamiento o enterramiento. En el segundo caso (reprocesamiento-ciclo cerrado), el combustible gastado es reprocesado con el objetivo de recuperar el uranio-235 que no ha sido quemado, el uranio-238 y los distintos isótopos de plutonio. Una variante es la fabricación del combustible de mezcla de óxidos (Mixed-OXide fuel, MOX), cuando se combinan el dióxido de uranio empobrecido ( $UO_2$ ) y el dióxido de plutonio proveniente de reactores comerciales o de las armas nucleares desmanteladas. Aunque despuntaba como una iniciativa promisoriosa en materia de no proliferación, el desarrollo de esta segunda opción del ciclo cerrado se ha detenido por motivos políticos (Nikitin y Welt, 2016)<sup>14</sup>.

Luego de casi medio siglo de trabajo, desde que arrancó en 1973, fue detenido en 2018 para siempre el bloque más antiguo con un RBMK-1000, perteneciente a la antigua electronuclear de Leningrado. Pero no será hasta 2023 que se le extraerá totalmente el combustible nuclear y, por tanto, hasta ese momento se considera todavía en explotación, aunque no produzca energía (Rosenergoatom, 2018). De esta manera, comienza el programa gradual a gran escala para el desmantelamiento de ese tipo de reactor en Rusia, donde todavía quedan diez

---

<sup>14</sup>Mediante el Acuerdo de Gestión y Disposición de Plutonio (PMDA, por sus siglas en inglés), suscrito en 2000, Rusia y Estados Unidos se habían comprometido a eliminar —cada cual— al menos 34 toneladas métricas de plutonio de uso militar (unas 17 000 ojivas nucleares), reciclando este material en forma irreversible como combustible MOX para fines energéticos. Sin embargo, la parte rusa suspendió dicho acuerdo en 2016, acusando al gobierno estadounidense de violar sus condiciones al proponer otro tipo de reprocesado-almacenamiento que no garantiza la irreversibilidad del plutonio.

ejemplares en funcionamiento. Anteriormente, en 2004 y 2009, fueron detenidos los dos RBMK-1500 en la electrnuclear de Ignalina, en Lituania. Estos bloques energéticos ya clausurados sirvieron de locaciones para la miniserie *Chernobyl* de HBO y Sky, de ahí en gran medida su encomiable puesta en escena.

Como exponente paradigmático de la Guerra Fría, el RBMK-1000 era potencialmente una gran bomba sucia (*dirty bomb*) o RDD (Radiological Dispersion Devices). Proyectado con una doble meta de producción (militar y civil), ese aciago reactor nuclear contenía embebida la condición dilemática del doble uso como dimensión ontológica y, a partir de ella, se manifestaron en su más alta expresión los otros dos grandes dilemas de la energética nuclear: el dilema ubicación/seguridad y el dilema sociorradioecológico. Veinticinco años después, los sucesos de Fukushima Daiichi pusieron de manifiesto que la energética nuclear podría deparar nuevas sorpresas tecnológicas. Entre ellas destaca el enorme peligro de conservar el combustible gastado dentro de las propias centrales electrnucleares en piscinas de enfriamiento que no fueron previstas dentro del concepto de defensa en profundidad.

#### *2.5/ Fukushima Daiichi: primer desastre sociorradioecológico NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disaster)*

El viernes 11 de marzo de 2011, la Agencia de Seguridad Nuclear e Industrial (Nuclear and Industrial Safety Agency, NISA) de Japón declaró el estado de emergencia en la CEN de Fukushima Daiichi después de que se viera afectada por la combinación de un terremoto de magnitud 8,9-9,0 en la escala de Richter, próximo a la costa del Pacífico en la región de Tohoku, y el tsunami que produjo a continuación: una serie de grandes olas entre 15 y 24 metros de altura. Este movimiento sísmico causó más de 15 000 muertes y cerca de 2 500 desaparecidos (Kawase *et al*, 2012)<sup>15</sup>. Reconocido como *3.11 disaster* en la literatura japonesa especializada (Ikeda, 2013), al considerarlo como el primer desastre sociorradioecológico NaTech (*Natural Hazard Triggering Technological Disaster*), damos por sentado que Fukushima Daiichi significó otro nuevo estadio en la comprensión del carácter único del riesgo nuclear y radiológico. Cuando ya se anunciaba un renacimiento de la energética nuclear a lo largo del siglo XXI como respuesta al calentamiento global, el dilema ubicación y seguridad se manifestó en toda su plenitud como una simbiosis de contingencias natural y tecnogénica que puso nuevamente en crisis el concepto de defensa en profundidad, aunque de una manera diferente a Chernobyl.

¿Cómo pudo Japón construir centrales nucleares en zonas sísmicas y con riesgo de tsunami sin tener adecuadamente en cuenta estos factores? ¿Por qué los proyectistas, explotadores y supervisores de la esfera energética nuclear japonesa no pudieron prever un accidente severo de esa índole, a pesar de contar con una larga historicidad sísmica? ¿O se trató de un fenómeno natural de tal magnitud que, aunque hubiera sido previsto, superó cualquier capacidad humana para afrontarlo? Al tener como suceso iniciador el gran terremoto y tsunami

<sup>15</sup>El terremoto y tsunami de Japón de 2011 fue denominado oficialmente por la Agencia Meteorológica de Japón como terremoto de la costa del Pacífico en la región de Tōhoku de 2011 (Tōhoku Chihō Taihei-yō-oki Jishin) o Gran terremoto de Japón oriental (Higashi-Nihon Dai-shinsai).

consigo, la impredecibilidad de la catástrofe de Fukushima fue sostenida en un principio por los representantes de la energética nuclear, no solo en Japón, sino a nivel internacional (Acton y Hibbs, 2011). Pero fue otro el dictamen de la comisión independiente del Parlamento japonés que investigó los hechos. Según su informe oficial, «aunque fue originado por un cataclismo, el accidente no puede considerarse como un desastre natural, sino causado por el hombre y podía y debía haberse previsto y evitado» (Japan, 2012: 9).

Cuatro años después, con el título *El accidente de Fukushima Daiichi*, el reporte oficial firmado por el director general del OIEA, Yukiya Amano, proporciona la descripción de sus causas, evolución y consecuencias a partir de datos e información obtenidos hasta marzo de 2015. Este documento reconoce la responsabilidad humana del accidente, a pesar de que el suceso iniciador haya sido un desastre natural de extremadamente baja probabilidad y altas consecuencias (*extremely low-probability/high-consequence disaster*). A diferencia del INSAG-1 e INSAG-7, que se refieren solamente a las causas tecnológicas de Chernobyl, este informe sobre Fukushima Daiichi abarca también las consecuencias radiológicas. Desglosados bajo un acápite con el título: «Condiciones de seguridad nuclear», seis factores son abordados para caracterizar este accidente severo desde el punto de vista intratécnico: 1) Vulnerabilidad de la central a sucesos externos; 2) Aplicación del concepto de defensa en profundidad; 3) Evaluación de la incapacidad de cumplir las funciones de seguridad fundamentales; 4) Evaluación de los accidentes que sobrepasan la base de diseño y gestión de los accidentes; 5) Evaluación de la eficacia reguladora, y 6) Evaluación de los factores humanos y organizativos (IAEA, 2015a).

Aunque quedan muchas cuestiones por esclarecer sobre ese triple desastre (terremoto-tsunami-crisis nuclear)<sup>16</sup>, calificamos a Fukushima Daiichi como epítome del dilema ubicación y seguridad, ya que puso de manifiesto en su más alto grado la compleja problemática de cómo aplicar los resultados de los métodos de predicción y pronóstico de las amenazas naturales al proceso evaluativo del diseño, emplazamiento, construcción y funcionamiento seguro de las centrales nucleares. Nuestro objetivo es fundamentar que Fukushima Daiichi obliga a concientizar la categoría de *vulnerabilidad* como una condición intrínseca de la energética nuclear desde sus orígenes. Aquí aprovechamos para anticipar nuestro propio sistema conceptual que desdobra la noción de *riesgo* en las facetas de *peligro* y *vulnerabilidad*, contraponiéndolas al esquema *riesgo-seguridad* de los expertos técnicos<sup>17</sup>.

Explosionada por la Tokyo Electric Power Company (TEPCO), la CEN de Fukushima Daiichi estaba provista de seis reactores de agua en ebullición BWR Mark I que, diseñados por la General Electric, comenzaron a operar entre 1971 y 1979. Los tres primeros estaban

<sup>16</sup>Entre las cuestiones no esclarecidas por los informes sobre el accidente de Fukushima Daiichi (TEPCO, 2013; IAEA, 2015a) se encuentran las posibles consecuencias radiológicas de que se hubieran fusionado elementos con combustible MOX, cuyos niveles de plutonio son más altos que el combustible convencional. Tampoco se informa sobre cuál es el estado final de los núcleos de los reactores y del combustible almacenado en las piscinas de cada unidad y en la piscina común de la planta. Los plazos dados en 2011 para el desmantelamiento de las unidades 1-4 fueron reconsiderados por TEPCO a fines de 2017, teniendo en cuenta los riesgos de esa operación sin precedentes (TEPCO, 2017).

<sup>17</sup>Este despeje conceptual nos permitirá proponer, como resultado final de esta tesis doctoral, un nuevo marco analítico para la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico desde la perspectiva de los estudios CTS (ver subacápite 5.2.5).

funcionando a plena potencia cuando ocurrió el terremoto, mientras que los otros tres se encontraban parados para la recarga de combustible y el mantenimiento. La unidad 4 tenía el reactor vacío y todo su combustible estaba en la piscina de enfriamiento. Las unidades 5 y 6 mantenían todo el combustible dentro de la vasija del reactor. Los reactores en servicio de las unidades 1, 2 y 3 pararon automáticamente cuando los sensores de la central detectaron el temblor de la tierra. Enseguida se activaron los sistemas de protección y de refrigeración de emergencia para evitar que el combustible se sobrecalentara por el calor del decaimiento radiactivo. Pero el terremoto había dañado los sistemas de distribución de electricidad, tanto dentro como fuera del emplazamiento, incluida la subestación y el tendido eléctrico que suministraban corriente alterna a la central.

Ante la pérdida total del suministro eléctrico exterior o *blackout*, se pusieron en marcha automáticamente los dispositivos de reserva (generadores diésel) para restablecer la corriente alterna en las seis unidades. No fue el caso de las piscinas de combustible gastado de cada unidad y la piscina común de la planta, cuyos sistemas de refrigeración y reposición de agua dependían únicamente del suministro eléctrico exterior, sin tener otra fuente alternativa de energía. Por esta gravísima deficiencia de diseño, miles de elementos de combustible estuvieron en peligro de sobrecalentarse y dañarse, sobre todo en la piscina de la unidad 4, ya que tenía dentro todo el combustible extraído de ese reactor parado para mantenimiento, a los que se suman los cerca de 6 000 elementos almacenados en la piscina común de la planta, situada en un edificio independiente. Esta es una de las mayores sorpresas tecnológicas que deparó este desastre *NaTech*: la indefensión de las piscinas de almacenamiento de combustible como una de las vulnerabilidades intrínsecas del sistema de defensa en profundidad.

En principio, las seis unidades de la central nuclear de Fukushima Daiichi reaccionaron como estaba previsto tras ocurrir el sismo. Esto permitió que se cumpliera, al menos, la primera función de seguridad fundamental: el control de la reactividad en los reactores, incluidos los que se encontraban en funcionamiento (unidades 1, 2 y 3). Sin embargo, no sucedió así con las otras dos funciones: la evacuación del calor y el confinamiento del material radiactivo. A continuación del intenso movimiento de la tierra, el terremoto desplazó una colosal cantidad de agua en sucesión de olas que, cuando llegaron a la costa, produjeron un efecto devastador en una extensa zona. A la CEN de Fukushima Daiichi arribaron unos 40 minutos después del sismo. El emplazamiento quedó protegido de la primera ola, con una altura de subida de entre 4 y 5 metros, por la barrera de diques marítimos diseñados para proteger la costa contra un tsunami con altura máxima de 6,1 metros. Unos diez minutos después, una segunda ola, de una subida entre 11,5 y 15,5 metros, superó esos diques e inundó las instalaciones.

Todas las estructuras y equipos situados a nivel del mar quedaron sumergidos bajo el agua, así como los edificios principales construidos en terrenos más elevados, conteniendo los reactores, las turbinas y demás equipos cruciales como los paneles de control. Lo peor fue que los generadores diésel de emergencia quedaron inservibles por estar mal ubicados desde que se concibió la planta nuclear, excepto el de la unidad 6, situado en una zona más alta. Por ese motivo, las unidades 1 a 5 perdieron toda la alimentación de corriente alterna,

por lo que ya no funcionarían si se hubiera restablecido el suministro de electricidad. Aun así, estaba previsto que los sistema de refrigeración del núcleo podían resistir hasta ocho horas con ayuda de las baterías de corriente continua, pero estas también quedaron bajo el agua en las unidades 1, 2 y 4 (ver infografía 9).

Como resultado de la inundación provocada por el tsunami, quedaron colapsados simultáneamente los tres primeros niveles de la defensa en profundidad, al producirse el fallo de causa común de sus equipos y sistemas: 1) el sistema destinado a asegurar un funcionamiento normal fiable; 2) el sistema destinado a restablecer las condiciones de seguridad en la central después de un suceso anormal, y 3) los sistemas de seguridad destinados a hacer frente a las condiciones de accidente por diseño. De inmediato se puso a prueba el cuarto nivel de la defensa en profundidad: la gestión de un accidente ya severo con posibilidad de fusión del núcleo, que involucró a las seis unidades al unísono, incluidas las piscinas de combustible gastado. En el caso de los reactores de las unidades 1, 2 y 3, sus sistemas de enfriamiento de emergencia se habían quedado sin suministro eléctrico, por lo que no se logró la evacuación del calor y se produjo la fusión de sus elementos de combustible. Aunque fueron improvisadas líneas de inyección con agua dulce desde el depósito de protección contra incendios, no pudo garantizarse a tiempo la inyección de ese refrigerante en las vasijas a presión de dichos reactores debido a los retrasos en su despresurización. Al agotarse esa fuente de agua dulce, se trató de enfriar a los reactores con agua de mar, lo que debió acelerar la oxidación del circonio y el desprendimiento del hidrógeno.

Aunque la atmósfera protectora de nitrógeno evitó la combustión y estallido del hidrógeno en el interior de las vasijas a presión de todos esos reactores, los daños sufridos por sus núcleos y caparazón metálico dieron lugar a que, a través de las grietas, escaparan cantidades de esos gases, vapor y material radiactivo hacia los recintos de contención primaria. Estos también habían quedado sin protección por el corte de la alimentación de corriente alterna y de corriente continua. La pérdida total de energía eléctrica había inutilizado su sistema de venteo y, aunque los operarios lograron abrir las válvulas para aliviar dichos confinamientos radiactivos en las unidades 1 y 3, estos acabaron fracturándose debido al aumento de la presión en su interior por encima de los niveles permitidos. En la unidad 2 ni siquiera se logró el venteo y, por supuesto, su contención primaria terminó rompiéndose, con gran liberación de elementos radiactivos.

Sucedió como si hubieran tenido lugar al unísono tres Three Mile Island, pero mucho más complicados porque todas las barreras físicas resultaron dañadas. La mezcla explosiva de hidrógeno, vapor y elementos radiactivos se propagó a los edificios de cada reactor y tuvieron lugar tres explosiones: en la unidad 1 (el 12 de marzo, a las 15: 36 horas), en la unidad 3 (14 de marzo, 11: 01 horas) y en la unidad 4 (15 de marzo, 06: 14 horas). En un primer momento se pensó que esta tercera y última explosión había sido producida por el hidrógeno desprendido en la piscina del combustible gastado perteneciente a la unidad 4, debido al sobrecalentamiento y fusión de los elementos allí almacenados por la pérdida de la cubierta de agua. No obstante, tras comprobarse visualmente que el nivel del refrigerante

El viernes 11 de marzo de 2011, la CEN de Fukushima Daiichi sucumbió a una ola (11,5-15,5 metros de altura) provocada por el tsunami que siguió al terremoto de Tōhoku Chihō Taiheiyo-oki, con una magnitud 8,9-9,0 en la escala de Richter. Por primera vez en la historia de la energética nuclear ocurrió un BDBA de esas características, cuando el suceso iniciador resulta un desastre natural de extremadamente baja probabilidad y altas consecuencias (*extremely low-probability / high-consequence disaster*) que provoca la pérdida total del suministro eléctrico exterior o *blackout*. Por eso, en un inicio, se manejó la «impredecibilidad» de ese accidente severo.

Sin embargo, cuatro años después, el informe *El accidente de Fukushima Daiichi* reconoce la responsabilidad humana, ya que «en particular, los análisis de seguridad no determinaron la vulnerabilidad de la central a las inundaciones» (OIEA, 2015a: 6). Al quedar sumergidos bajo el agua todos los generadores emergentes de energía eléctrica, la inundación produjo un fallo de causa común (*common-cause-failure*), saliendo a relucir esta deficiencia potencial de los sistemas tecnológicos complejos que ya se había puesto de manifiesto en Three Mile Island. Solo que en Fukushima no fueron superadas únicamente las bases de diseño de una unidad, sino de toda la planta nuclear en pleno: seis reactores al unísono, más las piscinas de combustible gastado.

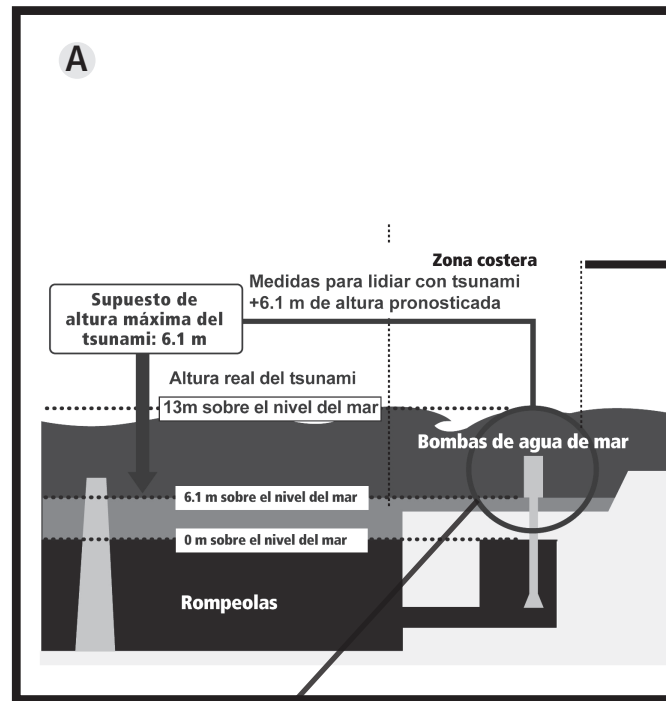
Debido a la pérdida total de refrigeración, los núcleos de los reactores en servicio 1, 2 y 3 se fusionaron y, aunque la atmósfera prevista de nitrógeno dentro de sus vasijas a presión evitó la combustión y estallido del hidrógeno, el daño sufrido dio lugar al escape de grandes cantidades de estos gases, vapor y material radiactivo hacia los recintos de contención primaria. Al aumentar la presión en su interior y calentarse debido a las dificultades con su venteo, estos confinamientos radiactivos se fracturaron y se produjo la propagación de esa mezcla explosiva a los edificios de cada reactor. Tuvieron lugar tres explosiones en las unidades 1, 3 y 4, respectivamente, los días 12, 14 y 15 de marzo. Gran cantidad de radionucleidos fue liberada al medio ambiente, incluidas emisiones directas al océano.

En su condición de primer desastre sociorradiológico *NaTech* (*Natural Hazard Triggering Technological Disaster*), Fukushima Daiichi puede valorarse como epítome del dilema ubicación y seguridad con arreglo a la interrelación entre dos factores: 1) las incertidumbres con respecto a la fiabilidad de los métodos científicos de predicción de terremotos y tsunamis, y 2) las insuficiencias tecnológicas heredadas (vulnerabilidad) de la defensa en profundidad para afrontar la pérdida de todo suministro eléctrico o *blackout*.

Cuando ya se anunciaba un renacimiento de la energética nuclear a lo largo del siglo XXI para enfrentar el cambio climático, este BDBA significó otro nuevo estadio en la comprensión del carácter único del riesgo nuclear y radiológico. A partir de este primer desastre *NaTech*, la cuestión principal radica no ya solamente en concientizar que se ha construido una planta nuclear en una zona altamente sísmica, sino que debe prepararse para afrontar los terremotos, teniendo en cuenta que no puede predecirse exactamente su inminencia ni cuán rápido evolucionarán.

La imprevisibilidad de tales fenómenos naturales acrecienta el carácter único del riesgo nuclear y radiológico. De ahí los cambios más recientes en la filosofía de la seguridad nuclear, incluyendo el especial énfasis en la importancia de reformular el cuarto nivel de la defensa en profundidad (mitigación del accidente severo), apresurando el venteo del hidrógeno si es preciso para evitar la rotura de la contención radiactiva (IAEA, 2015a).

## FUKUSHIMA DAIICHI:



### EL FACTOR DE LA INCERTIDUMBRE EN LAS PREDICCIONES DE TERREMOTOS Y TSUNAMIS:

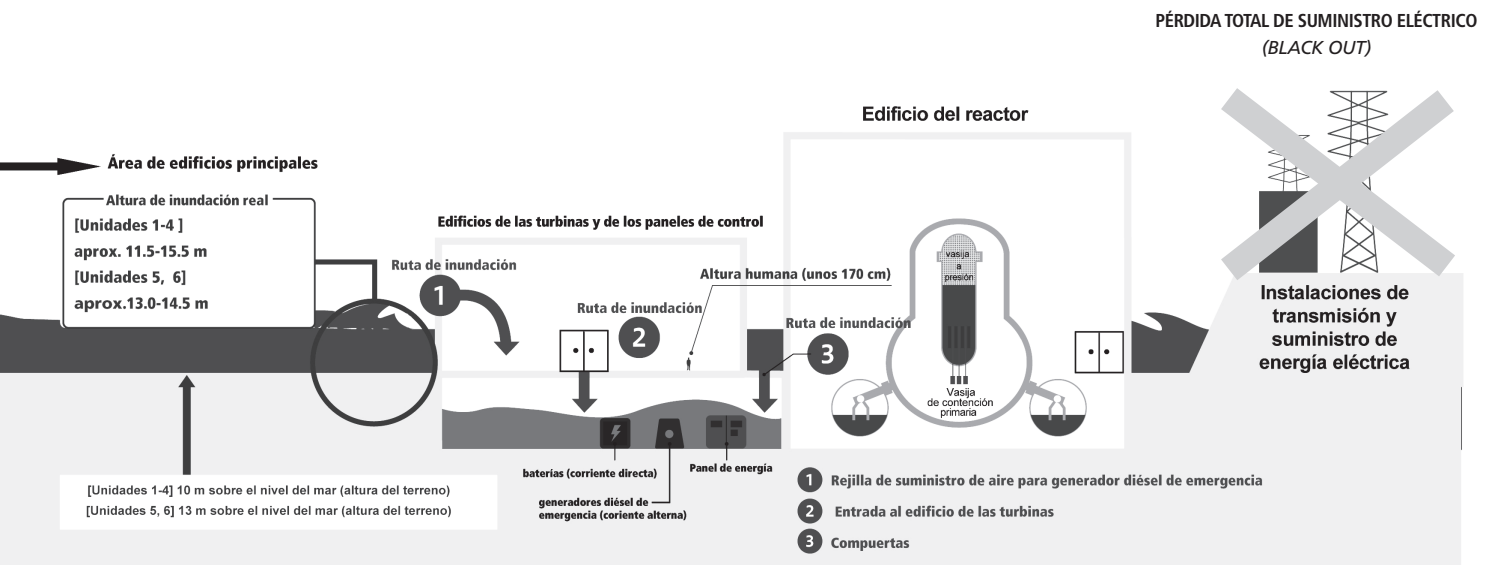
Las unidades de Fukushima Daiichi recibieron sus permisos de construcción entre 1966 y 1972. Al no existir entonces un criterio de evaluación contra tsunamis, la altura máxima prevista fue 3,1 metros sobre el nivel del mar, basándose en el tsunami provocado por el terremoto de Chile en 1960. Su oleaje había llegado con esa altura hasta el Puerto de Onahama, en la prefectura de Fukushima, de ahí ese tope.

No fue hasta 2002 que se estableció el primer método evaluativo de tsunamis para las plantas nucleares por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles. Sobre esa base, en su calidad de propietaria privada de la CEN de Fukushima Daiichi, la empresa TEPCO se planteó una revisión de los niveles de inundación y adoptó medidas contra grandes olas de hasta 5, 7 metros sobre el nivel del mar, elevando los diques marítimos y los motores de las bombas de circulación para la refrigeración de los condensadores con agua de mar. Una nueva evaluación corrigió esta altura en 2009, aumentándola hasta 6,1 m.

Asimismo, esa entidad explotadora realizó varios cálculos de prueba, utilizando diversos modelos de predicción (probabilistas), que arrojaron olas con alturas mayores. Sin embargo, todo hace indicar que tanto TEPCO como NISA, la autoridad reguladora japonesa, optaron por las predicciones que favorecieran sus propias expectativas, desechando aquellas que resultarían incómodas a sus intereses.

Es el caso de los estudios iniciados en 2001 sobre el potencial de generación de tsunamis gigantes en la Fosa de Japón, frente a la costa de la prefectura de Fukushima, con ayuda de las técnicas de la paleosismología. Mediante el análisis de sedimentos y otras evidencias geológicas quedó demostrado que desde la antigüedad esos fenómenos naturales se repetían cada 800-1000 años. Por tanto, podía esperarse en cualquier momento un gran sismo seguido por tsunami como el ocurrido en 2011.

# PUNTO CRUCIAL DEL DILEMA UBICACIÓN Y SEGURIDAD

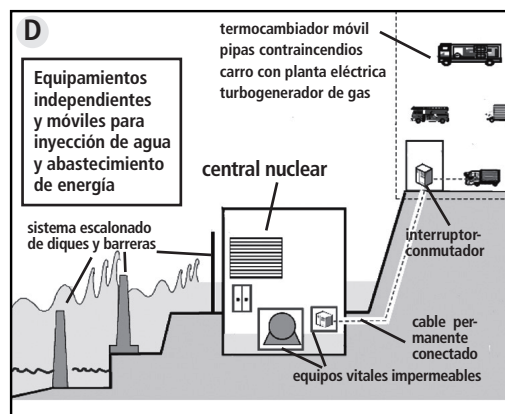
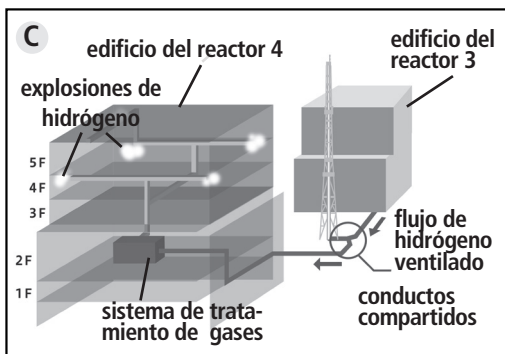
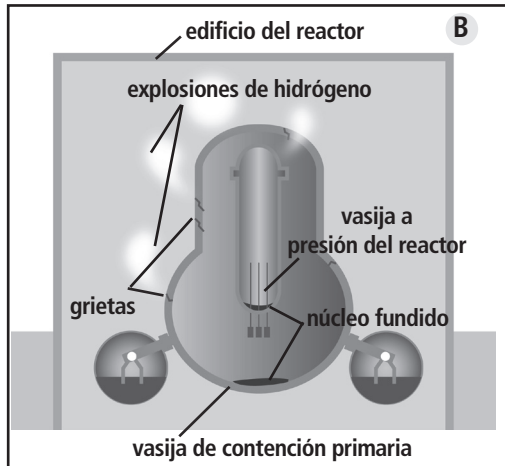


**LA VULNERABILIDAD DE LA DEFENSA EN PROFUNDIDAD:** Si bien los sistemas de la defensa en profundidad eran redundantes en la CEN de Fukushima-Daiichi, no cumplían con la segunda condición indispensable de seguridad: su independencia entre sí. Al estar soterrados y agrupados en un mismo nivel los generadores emergentes de energía eléctrica (alterna y continua), la inundación dejó fuera de servicio a todos esos sistemas al mismo tiempo y la DiD colapsó.

¿Por qué esa vulnerabilidad tecnológica escapó burdamente a las evaluaciones de la seguridad, incluidas las probabilistas, independientemente de cuáles fueran las predicciones y/o pronósticos de terremotos y tsunamis? Aunque el informe oficial del OIEA no lo explica, el hecho es que el diseño original del reactor estadounidense BWR Mark I de General Electric previó que todas esas fuentes eléctricas de emergencia fueran soterradas para protegerlas de huracanes y tornados, los desastres naturales más frecuentes en Estados Unidos.

Cuando este tipo de reactor fue instalado en Fukushima Daiichi, se mantuvo la misma ubicación de esos generadores emergentes en los sótanos de los edificios de la turbina y del reactor, sin tener en cuenta las inundaciones por tsunami como un nuevo criterio de sitio. En lo adelante, las medidas adoptadas por TEPCO se habían limitado a la elevación de los diques marítimos y de las bombas de circulación para el enfriamiento de los condensadores con agua de mar.

Sin embargo, para evitar el desastre hubiera bastado que más fuentes eléctricas de emergencia (generadores diésel y baterías) hubieran sido instaladas a niveles superiores, inaccesibles a cualquier inundación por grande e imprevisible que fuera (imagen D). Esto también atañe a las piscinas de combustible gastado de cada unidad y la piscina común de la planta, cuyos sistemas de refrigeración y reposición de agua dependían únicamente del suministro eléctrico exterior, sin tener otra fuente alternativa de energía. La revisión de estas vulnerabilidades de la DiD fue una de las primeras medidas adoptadas en las CEN, luego de las pruebas estrés realizadas a nivel internacional, de modo que las fuentes eléctricas fueran redundantes, independientes y diversificadas.



De los seis reactores de agua en ebullición BWR Mark I en Fukushima Daiichi, las unidades 1, 2 y 3 estaban en funcionamiento cuando se produjo el terremoto y todas quedaron dañadas sin excepción, al fundirse sus núcleos por la pérdida de enfriamiento. Esto dio lugar al escape de hidrógeno, vapor y productos radiactivos hacia las vasijas de contención primaria (imagen B). Desprovistas también de enfriamiento y sin posibilidad apenas de ventearlas, esas segundas vasijas terminaron quebrándose por exceso de presión y temperatura. La mezcla explosiva pasó entonces al edificio de cada reactor y allí, al ponerse en contacto con el oxígeno, ocurrieron las tres explosiones en las unidades 1, 3 y 4. En este último caso, por recibir el hidrógeno a través de un conducto compartido con la unidad 3 (imagen C). Las vulnerabilidades de Fukushima Daiichi a los tsunamis hubieran podido ser atenuadas con equipamientos independientes y móviles para inyección de agua y abastecimiento de energía como son los carros con planta eléctrica, turbogeneradores de gas y pipas contra incendios que garantizaran el sistema de refrigeración de los reactores nucleares en situaciones extremas, además de impermeabilizar los equipos vitales de la planta. Asimismo, podía haberse concebido un sistema escalonado de diques (imagen D).

se había mantenido tapando las barras de combustible, se concluyó que el hidrógeno había migrado de la unidad 3 a la 4 a través de un sistema de ventilación común (ver infografía 9).

Como resultado de las explosiones y demás daños colaterales, una cantidad considerable de radionucleidos fueron expulsados a la atmósfera. También hubo emisiones directamente al mar. Los habitantes de 20 km a la redonda y de otras zonas designadas fueron evacuados, mientras que quienes se encontraban en un radio de entre 20 y 30 km recibieron instrucción de permanecer en espacios interiores, y, más tarde, el consejo de evacuar la zona voluntariamente. Sin embargo, el plan de emergencia fue aplicado de una manera confusa y contraproducente, por lo que fue objeto de duras críticas y ha conllevado a una revisión radical por el OIEA de sus normativas de emergencia, provocando una profunda crisis, aunque silenciosa, del sistema internacional de protección radiológica (ver capítulo 3).

No fue hasta el 4 de abril que las autoridades reguladoras japonesas asignaron el nivel 7 de la Escala Internacional de Sucesos Nucleares (INES), esperando para reconocerlo públicamente el 12 de abril (Tanaka y Yamazaki, 2012). Por casi un mes, desde el 18 de marzo hasta esa última fecha, se mantuvo asignado un nivel 5, aun cuando ya se habían producido las fusiones de los núcleos de los reactores 1, 2 y 3, así como las explosiones de hidrógeno en las unidades 1, 3 y 4 (los días 12, 14 y 15 de marzo, respectivamente). Esta demora se hizo más contraproducente porque por primera vez en la historia —a diferencia de Three Mile Island y Chernobyl— un accidente nuclear había sido visualizado y seguido a nivel global en tiempo real gracias a internet. Relacionándolo con la disfuncionalidad comunicativa de la INES, este factor mediático otorga a Fukushima Daiichi una singularidad añadida como accidente superior a la base de diseño que deviene catastrófico (ver subacápite 5.1.1).

#### 2.5.1/ *Incertidumbre, predicción y vulnerabilidad tecnológica*

Los expertos nucleares, empezando por la Comisión de Energía Atómica de Japón, intentaron justificar que ese desastre *NaTech* había sido un «cisne negro»; o sea: un hecho impensable hasta que sucede. Por este motivo —aducían— es que un evento de ese tipo nunca había sido tenido en cuenta durante el diseño de la instalación nuclear durante sus más de treinta años de explotación. A este dictamen justificativo enseguida reaccionaron no solamente algunos expertos técnicos y sismólogos, sino también los científicos sociales (Acton y Hibbs, 2011; Möller y Wikman-Svahn, 2011), llegándolo a considerar una falacia (Shrader-Frechette, 2011). Es cierto que, por primera vez en la historia de la energética nuclear, se había producido un BDBA de esas características, pues no solamente habían sido superadas las bases de diseño de una unidad en particular, sino de toda la planta nuclear en pleno. Asimismo, por primera vez el suceso iniciador había sido un peligro externo en forma de desastre natural (tsunami). La inundación —sin embargo— provocó un fallo de causa común (*common-cause-failure*), saliendo a relucir nuevamente esa deficiencia potencial de los sistemas tecnológicos complejos. A modo de «observaciones y lecciones aprendidas», el informe del OIEA reconoce que la supuesta impredecibilidad de Fukushima Daiichi es técnicamente insostenible por las siguientes razones:



Los análisis de seguridad realizados durante el proceso de concesión de la licencia para la central nuclear de Fukushima Daiichi y durante su funcionamiento no abordaron plenamente la posibilidad de que se produjera una secuencia compleja de sucesos que pudiera conducir a un daño severo del núcleo del reactor. En particular, los análisis de seguridad no determinaron la vulnerabilidad de la central a las inundaciones, ni los puntos débiles de los procedimientos operativos y las directrices para la gestión de accidentes. Las evaluaciones probabilistas de la seguridad no incluyeron la posibilidad de una inundación interna, y los supuestos relativos a la actuación humana para la gestión de los accidentes eran optimistas. Además, los requisitos impuestos por el órgano regulador para que las entidades explotadoras tuvieran en cuenta la posibilidad de que se produjeran accidentes severos eran limitados (IAEA, 2015a: 6).

Esta aceptación de la responsabilidad humana como causa del primer desastre sociorradioecológico *NaTech* incita a plantearse el debate sobre la impredecibilidad —o no— de Fukushima Daiichi como punto crucial del dilema ubicación y seguridad de la energética nuclear con arreglo a la interrelación entre dos factores: 1) las incertidumbres con respecto a la fiabilidad de los métodos científicos de predicción de terremotos y tsunamis, y 2) las insuficiencias tecnológicas heredadas (vulnerabilidad intrínseca) de la defensa en profundidad para afrontar la pérdida de todo suministro eléctrico o *blackout*. Analicemos esta cuestión porque ayuda a entrever el por qué de los cambios más recientes en la filosofía de la seguridad nuclear, incluido el especial énfasis en la importancia de reformular el cuarto nivel de la defensa en profundidad (mitigación del accidente severo), aceptando el venteo del hidrógeno si es preciso para evitar la rotura de la contención radiactiva. Y si esto no funcionara, activar planes de emergencia en calidad de quinto nivel, implicando directamente a la sociedad en la gestión del riesgo nuclear y radiológico.

En primer lugar, analicemos el factor de la incertidumbre de las predicciones de terremotos y tsunamis. Las unidades de esa planta nuclear japonesa con tecnología estadounidense recibieron sus permisos de construcción entre 1966 y 1972. En aquel entonces el criterio de evaluación contra tsunamis se basaba solamente en los registros históricos conocidos, sin que existiera una guía metodológica para las instalaciones nucleares. La altura máxima prevista fue 3,1 metros sobre el nivel del mar, basándose en el tsunami provocado por el terremoto de Chile en 1960, el más grande registrado en la historia por la sismología instrumental, con una magnitud de 9,5 (M9,5). Su oleaje había llegado con esa altura hasta el Puerto de Onahama, en la prefectura de Fukushima, de ahí que se adoptara ese tope.

No fue hasta 2002 que se estableció el primer método evaluativo de tsunamis para las plantas nucleares por la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles. A partir de entonces, TEPCO se planteó una revisión de los niveles de inundación y adoptó medidas contra grandes olas de hasta 5,7 metros sobre el nivel del mar, elevando los diques marítimos y los motores de las bombas de circulación para la refrigeración de los condensadores con agua de mar. Una nueva evaluación corrigió esa elevación en 2009, elevando esos diques y bombas por encima de 6,1 m, suponiéndola la altura máxima del tsunami (ver infografía 9).

Asimismo, la entidad explotadora realizó varios cálculos de prueba, utilizando diferentes modelos de predicción, incluido el modelo de fuentes de ondas. Esos cálculos probabilistas arrojaron que podía tener lugar un sismo de magnitud 8,3 que generara un tsunami con olas de hasta 15,7 m de altura. Sin embargo, la validez de ese método evaluativo, basado en «supuestos hipotéticos», quedó en entredicho y, por eso, no se tuvo en cuenta con fines prácticos por los expertos nucleares (TEPCO, 2011).

El informe del OIEA menciona dichas evaluaciones hechas por TEPCO, precisando que «las directrices reglamentarias en el Japón sobre los métodos para hacer frente a los efectos de los sucesos asociados con los terremotos, como los tsunamis, eran genéricas y breves y no proporcionaban criterios específicos u orientación detallada» (IAEA, 2015a: 4). Sin embargo, no deja esclarecido hasta qué punto la infravaloración de la magnitud e intensidad de los terremotos y los tsunamis por esa compañía privada y por NISA, la agencia reguladora nuclear japonesa, obedecía a una desconfianza de los expertos nucleares hacia los métodos de predicción y/o pronóstico de los sismólogos, no solamente en el país asiático, sino a nivel mundial. Es sintomático que dicho informe del OIEA no haga referencia a los requisitos publicados por ese propio organismo para la evaluación del emplazamiento de instalaciones nucleares (IAEA, 2010b) y los dedicados al peligro sísmico (IAEA, 2010c). Después de la catástrofe, esos requisitos fueron revisados en 2016 para añadir otros criterios más actualizados, reconociendo las incertidumbres al evaluar los tipos de peligro naturales para el diseño base de las instalaciones nucleares, así como las incertidumbres (epistémica y aleatoria) en los modelos predictivos de los terremotos (IAEA, 2016a; IAEA, 2016b).

Todo hace indicar que Fukushima Daiichi puso en evidencia el desfasaje entre los estándares heredados de seguridad nuclear y los más recientes métodos de evaluación sísmica basados en los nuevos conocimientos sobre los fenómenos naturales, gracias a las imágenes de satélite, radar Doppler y las bien establecidas teorías geológicas de tectónica de placas (USNRC y Miller, 2011). Resulta obvio que TEPCO y NISA optaron por los métodos predictivos que favorecieran sus propias expectativas, desechando aquellos que fueran incómodos a sus intereses. Para los sismólogos críticos, esta actitud es un ejemplo clásico de «disonancia cognitiva»: una vez que se encerraron en una mentalidad, por los motivos que fueran, los expertos nucleares fueron incapaces de atender a las nuevas evidencias sobre la posibilidad de un gran terremoto y tsunami asociado (Nöggerath *et al*, 2011; Geller, 2013).

Un ejemplo de los nuevos métodos predictivos es el caso de los estudios iniciados en 2001 sobre el potencial de generación de tsunamis en la Fosa de Japón, frente a la costa de la prefectura de Fukushima, remontándose a la antigüedad con ayuda de las técnicas de la paleosismología (Minoura *et al*, 2001; Satake *et al*, 2007; Sawai *et al*, 2012). Mediante el análisis de sedimentos y otras evidencias geológicas quedó demostrado que el terremoto Jogan, ocurrido en el año 869, había traído consigo un gran tsunami que inundó la entonces llanura de Sendai, en la región de Tohoku. Asimismo, desde mucho siglos atrás, otros tsunamis gigantes habían inundado esa misma zona costera entre

los años 910 y 670 a.n.e., y entre 140 y 150 de nuestra era. Estas pruebas geológicas apuntaban a que la recurrencia de tales fenómenos naturales era de 800 a 1100 años y, por tanto, podía repetirse un sismo de semejantes características en cualquier momento, tal y como finalmente ocurrió en 2011 con el terremoto de Tōhoku Chihō Taiheiyō-oki Jishin. Aunque TEPCO y NISA conocían esas predicciones de la paleosismología, las ignoraron totalmente al no corresponder con los resultados de las demás evaluaciones realizadas con otros métodos, incluidos los probabilistas (TEPCO, 2011). Si bien el OIEA había reconocido esa «subdisciplina de las Ciencias de la Tierra», basada en métodos geomorfológicos y estratigráficos (IAEA, 2010b), no es hasta cumplirse sus vaticinios que este organismo recomendó explícitamente la aplicación de la paleosismología para evaluar el emplazamiento de las futuras centrales nucleares, así como el riesgo que corren las ya ubicadas en los llamados «paisajes sísmicos» (IAEA, 2015d).

A partir del desastre *NaTech* de Fukushima, el dilema ubicación/seguridad de la energética nuclear adquiere un nuevo significado bajo el espectro de la amenaza sísmica y de tsunamis, reconociendo que si bien hay avances significativos en la predicción y/o pronóstico de esos fenómenos naturales, no existe consenso científico sobre la fiabilidad de los diferentes modelos o enfoques empleados: probabilistas, deterministas, neodeterministas y otros (Marzocchi y Zechar, 2011; Klügel, 2011). La cuestión principal radica no ya solamente en concientizar que se ha construido una planta nuclear en una zona altamente sísmica, sino de prepararse para afrontar los terremotos y tsunamis, teniendo en cuenta que no puede predecirse exactamente su inminencia ni cuán rápidamente evolucionarán (Jordan, 2014). Por tanto, el dilema ubicación y seguridad implica que deben considerarse las incertidumbres en la predicción de tales fenómenos naturales como uno de los factores que hace muy difícil conciliar la aceptabilidad del riesgo nuclear y radiológico.

Esto último se manifiesta en el disenso entre expertos nucleares y sismólogos para la toma de decisiones, cuando se maneja la atribución de responsabilidades. ¿Qué hacer si la predicción de terremoto con riesgo de tsunami apunta a que serán superadas las capacidades de resistencia de una electronuclear: los diques, por ejemplo? Este ha sido el problema de esa opción energética en Japón, que estuvo prácticamente colapsada desde Fukushima Daiichi, pues no puede excluirse otro terremoto M9 dentro de los próximos años en el área de Tohoku, tal y como ocurrió el 11 de marzo de 2011, aunque su probabilidad sea mínima (Mualchin, 2014)<sup>18</sup>. Sin embargo, a fines de 2019, los principales directivos de TEPCO fueron absueltos de los cargos por negligencia sobre la base de que no había un consenso sobre el riesgo de tsunami entre los propios sismólogos y, en vista de ello, la central de Fukushima Daiichi operaba legalmente con la autorización del regulador; o sea, de NISA.

Si desde un punto de vista penal pudiera arribarse a ese tipo de conclusión, los organismos nucleares japoneses nunca podrían ser exonerados de toda la responsabilidad

---

<sup>18</sup>A punto de cumplirse el décimo aniversario del sismo de magnitud 9,1 (escala Richter) que afectó a Fukushima Daiichi en 2011, se produjo un terremoto de 7,3 grados en el mismo lugar, frente a la costa oeste de Tōhoku, el 13 de febrero de 2021.

por lo ocurrido en Fukushima Daiichi debido a las insuficiencias tecnológicas de la defensa en profundidad para afrontar la pérdida del suministro eléctrico (*blackout*). Aunque los sistemas de la DiD eran redundantes, no cumplían con la segunda condición indispensable de seguridad: su independencia entre sí con respecto a cualquier acontecimiento. Al estar soterrados y agrupados por debajo del nivel del mar, los generadores emergentes de energía eléctrica (alterna y continua) quedaron fuera de servicio al mismo tiempo por causa de la inundación y la DiD colapsó. ¿Por qué esa vulnerabilidad tecnológica escapó burdamente a las evaluaciones de la seguridad, incluidas las probabilistas, independientemente de cuáles fueran las predicciones y/o pronósticos de terremotos y tsunamis? A esta interrogante no responde el informe del OIEA, limitándose a reconocer que:

La aplicación del concepto de la defensa en profundidad debe reexaminarse periódicamente a lo largo de la vida útil de una central nuclear para asegurarse de que se comprende cualquier cambio en la vulnerabilidad con respecto a los sucesos externos y que se efectúan e implementan los cambios que corresponda al diseño. Es necesario que los exámenes periódicos de la seguridad incluyan los peligros externos extremos, porque esos peligros puede provocar fallos de causa común capaces de comprometer simultáneamente varios niveles de la defensa en profundidad (IAEA, 2015a: 29).

El informe del OIEA no explica que el diseño original del reactor estadounidense BWR Mark I de General Electric previó que esas fuentes eléctricas de emergencia fueran soterradas para protegerlas de huracanes y tornados, los desastres naturales más frecuentes en Estados Unidos (Kinoshita, 2011). Cuando este tipo de reactor fue instalado en Fukushima Daiichi, a 10 metros sobre el nivel del mar, se mantuvo la misma ubicación de esas fuentes de energía en los sótanos de los edificios de la turbina y del reactor, sin tener en cuenta las inundaciones por tsunami. Quiere decir: la defensa con respecto a los sucesos externos sí había sido prevista por proyecto, solo que con arreglo a otros criterios de sitio, diferentes a los de una zona sísmica. Para tratar de evitar el desastre tendrían que haberse instalado fuentes eléctricas de emergencia (generadores diésel y baterías) a niveles superiores, tratando de que fuesen inaccesibles a una gran inundación. Esta fue una de las primeras medidas adoptadas luego de las pruebas estrés realizadas a todas las CEN en el mundo, de modo que las fuentes eléctricas de la DiD fueran redundantes, independientes y diversificadas (Hermsmeyer *et al*, 2015).

Teniendo en cuenta el precedente de Three Mile Island, la repetición del fallo de causa común es la quintaesencia de la responsabilidad desde el punto de vista ingenieril en Fukushima Daiichi. Asimismo, en ambos casos se puso nuevamente de manifiesto que un accidente nuclear puede superar las bases de diseño a partir de un suceso o causa inicial que no puede ser contenido o aislado porque el sistema tecnológico ha sido diseñado «rígidamente acoplado» (Perrow, 1984). El 3-11 *disaster* arrojó que esa rigidez es extensiva a la defensa en profundidad (DiD), al punto de hacerla totalmente vulnerable a una contingencia de origen natural, independiente de la voluntad humana. Por otra parte, como ya hemos

visto, Chernobyl había revelado que ese acoplamiento rígido puede estar condicionado por el dilema de doble uso (civil y militar), provocando una vulnerabilidad tecnológica más profunda de índole termofísica: el coeficiente positivo de vapor o huecos para la reactividad, además de un frágil concepto de la DiD, en especial de sus medios de control y protección, unido a la ausencia de contención radiactiva o encapsulamiento.

Aunque haya ocurrido un cambio en la filosofía práctica de la seguridad nuclear, todavía persiste una reticencia velada a reconocer que el «talón de Aquiles» de la energética basada en la fisión atómica es precisamente la vulnerabilidad intrínseca de la DiD. Los ingenieros nucleares mantienen su creencia en la noción de «robustez» (*robustness*), según la cual es posible hacer frente a toda fuerza destructiva (Amir y Juraku, 2014). Sin embargo, Chernobyl y Fukushima Daiichi evolucionaron como procesos irreversibles hasta la destrucción de la contención radiactiva debido a la fusión del núcleo y el consiguiente desprendimiento de calor, seguida de una o varias explosiones como resultado de las reacciones químicas concomitantes. Mientras que en Three Mile Island se logró contener ese poder destructivo y subitáneo, las sorpresas tecnológicas de Chernobyl y Fukushima Daiichi abren una seria interrogante sobre cuál serían las consecuencias de una explosión netamente nuclear, aun cuando los expertos aseguran que esto resulta prácticamente imposible.

Si desde el punto de vista intratécnico, el análisis de las causas tecnológicas de Chernobyl ayuda a revelar el vínculo ontológico entre el dilema de doble uso y el dilema de ubicación y seguridad, materializado en la explosividad del reactor nuclear RBMK-1000; en el caso de Fukushima Daiichi se corrobora que el dilema ubicación/seguridad comprende el vínculo ontológico entre vulnerabilidad tecnológica e impredecibilidad de los desastres naturales, materializado en la fragilidad de la defensa en profundidad ante esas contingencias extremas, poco probables, pero no imposibles. Al analizar diacrónicamente estos dos últimos accidentes superiores a la base de diseño (BDBA), además de Three Mile Island, sustentamos desde la praxis historiográfica nuestra hipótesis sobre una interdependencia teórico-práctica entre la nociones de *riesgo*, *peligro* y *vulnerabilidad* que no ha sido suficientemente concientizada por los ingenieros nucleares.

Así, cuando se evalúa técnicamente el riesgo nuclear y radiológico, identificándolo solamente como peligro o amenaza que puede ser controlado, se produce otra «paradoja de la seguridad»: el olvido de las vulnerabilidades propias, incluyendo la vulnerabilidad de la naturaleza humana. A tener en cuenta esta dimensión antropológica ha obligado el dilema de las radiaciones ionizantes (dilema sociorradioecológico). Para entender por qué Chernobyl y Fukushima Daiichi son catástrofes, y no meramente accidentes superiores a la base de diseño, es preciso abordar este tercer dilema morfogénico, considerándolo como el mayor motivo de desavenimiento entre los propios científicos y expertos, tanto nucleares como de otras ramas del conocimiento.

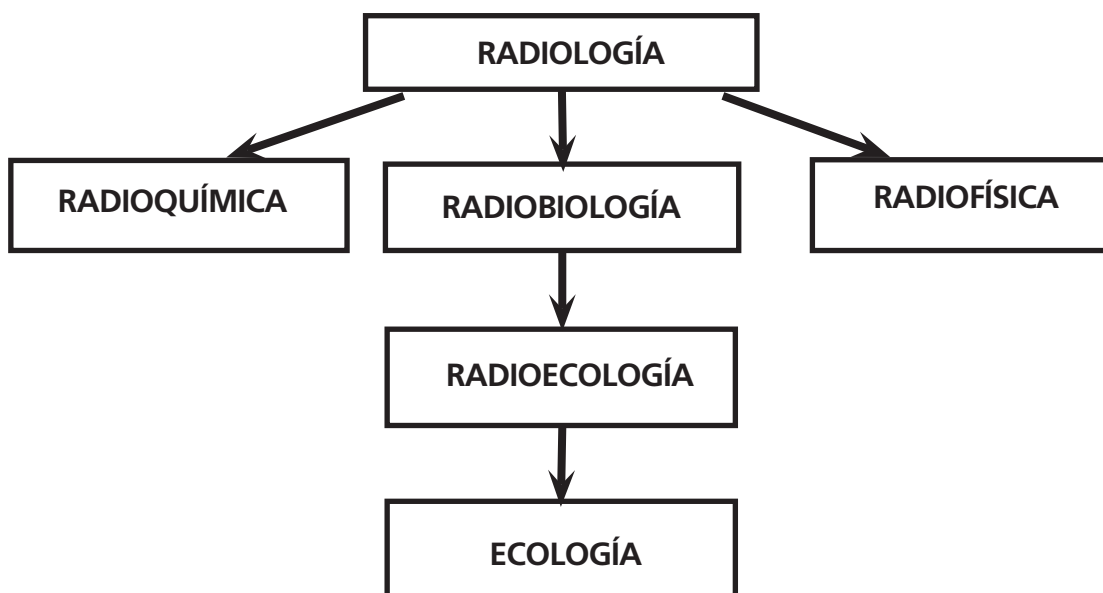
CAPÍTULO 3.

EL DILEMA DE LAS RADIACIONES IONIZANTES  
(DILEMA SOCIORADIOECOLÓGICO): «TAN BAJO COMO SEA  
RAZONABLEMENTE ALCANZABLE»

Los accidentes nucleares históricos de Chernobyl y Fukushima Daiichi son catástrofes sociorradioecológicas desde el momento en que sus efectos potenciales sobre el hombre no se limitan al daño biológico inmediato, sino que han provocado enormes consecuencias psicológicas, sociales, demográficas y económicas. Si bien la catástrofe química de Bhopal, India, provocó unas 3 000 muertes y decenas de miles de afectados, estos fueron identificados con rapidez y todo hace indicar que la mayoría sufrieron afecciones agudas y no crónicas, debido a la exposición al gas tóxico isocianato de metilo (Dhara y Dhara, 2002). Y lo mismo sucede con los desastres naturales: si hubiera ocurrido solamente el terremoto de Tōhoku Chihō Taiheiyō-oki, aunque causara el mismo nivel de devastación y muerte, sus consecuencias no hubieran comprometido el futuro energético de Japón ni el destino de los damnificados, como sí lo provocó el accidente nuclear asociado al gran tsunami que acompañó ese fenómeno sísmico. La recuperación después de un desastre atómico es mucho más lenta porque depende del grado y modo de la contaminación por isótopos radiactivos, cuyos efectos perjudiciales pueden prolongarse por un tiempo indeterminado. Esta es una de las principales características que hacen complejo y único el riesgo nuclear y radiológico al compararlo con otros riesgos tecnológicos (Oughton y Howard, 2012).

Entendemos por «dilema de las radiaciones ionizantes» el reconocimiento de las incertidumbres científicas, tanto teóricas como empíricas, al tratar de evaluar cuáles son los efectos perjudiciales sobre el ser humano y la biota debidos a la exposición crónica a radionucleidos artificiales provenientes de un accidente nuclear u otra emergencia radiactiva. Caracterizamos esas incertidumbres como conflicto epistemológico (radiobiología *versus* radioepidemiología), ejemplificando con el cúmulo de evidencias contradictorias y hasta antagónicas sobre las consecuencias de las «bajas dosis de radiaciones ionizantes» (*low-dose ionizing radiation*) en las zonas contaminadas por la catástrofe de Chernobyl. Debido a la imposibilidad de restablecer los niveles de la radiación de fondo o natural que existían antes de ocurrir esa tragedia, las normas para la supervivencia o retorno de los ciudadanos a la mayoría de los territorios contaminados han dependido siempre de los juicios de valor: económicos, sociales, culturales, morales y políticos. Teniendo en cuenta esa experiencia histórica, así como los sucesos de Fukushima Daiichi, sostenemos que ninguna concepción de la protección radiológica resulta medianamente satisfactoria para una gestión y/o gobernanza del riesgo nuclear y radiológico en situaciones de accidente, cuando se produce una liberación irreversible de radionucleidos artificiales al ecosistema.

Por añadidura, hemos visto que después de Fukushima Daiichi se ha producido un cambio en la filosofía práctica de la seguridad nuclear para incluir la posibilidad del venteo de la contención radiactiva ante lo que hemos llamado la «incertidumbre del hidrógeno» y



**Figura 8: La radiología como campo interdisciplinario. Fuente: Gudkov *et al*, 2015.**

el desarrollo de los planes de emergencia como quinto nivel de la defensa en profundidad (DiD). Si estos escenarios con liberación radiactiva al medio ambiente resultan admisibles por los expertos nucleares en calidad de decisores, entonces se impone una examinación crítica del sistema de protección radiológica desde el lado de los posibles afectados. Entre otros aspectos cruciales, quedaría por dilucidar cómo se dosificarían esos vientos radiactivos en tales situaciones de emergencia, teniendo en cuenta que, en febrero de 2015, fue adoptada la Declaración de Viena sobre Seguridad Nuclear, a la que ya nos hemos referido. La cuestión clave de este documento es su exigencia a aquellos Estados miembros que emprenden programas nucleares para que tengan una estrategia de protección pública antes de la puesta en marcha de sus primeras CEN. Con este propósito, dicha declaración establece el siguiente principio para cumplir con los objetivos de la Convención de Seguridad Nuclear (CSN), reconociendo la posibilidad de que puedan ocurrir accidentes con liberación radiactiva:

El diseño, la selección del emplazamiento y la construcción de las centrales nucleares nuevas serán consecuentes con el objetivo de prevenir accidentes durante la puesta en servicio y la explotación y, si se produjese un accidente, de mitigar las emisiones de radionucleidos que puedan causar contaminación a largo plazo fuera del emplazamiento, así como de evitar emisiones radiactivas tempranas o emisiones radiactivas suficientemente grandes como para requerir acciones y medidas protectoras a largo plazo (IAEA, 2015b: 29).

¿Qué es «contaminación a largo plazo»? ¿Qué son «emisiones radiactivas tempranas»? ¿Qué son «emisiones suficientemente grandes que requieran medidas protectoras a largo plazo»? La asimilación de estos criterios contenidos en la Declaración de Viena para incorporarlos a las normas de seguridad del OIEA exigió que se creara en 2015 un nuevo comité sobre normas de preparación y respuesta para casos de emergencia (EPReSC, por sus siglas en

inglés), además de los cuatro comités ya existentes, dedicados a las normas de seguridad nuclear (NUSSC), seguridad radiológica (RASSC), seguridad de los desechos radiactivos (WASSC) y transporte seguro de materiales radiactivos (TRANSSC), respectivamente.

Esta normativa internacional plantea ingentes desafíos a los radioproteccionistas sobre los métodos y conceptos que deben adoptarse para la protección del público en caso de accidente nuclear. Esto atañe en primer lugar a la aplicabilidad de la normativa que estipula la Comisión Internacional para la Protección Radiológica (International Commission on Radiological Protection, ICRP)<sup>19</sup>. Su filosofía práctica se basa en el paradigma del Modelo Lineal Sin Umbral (en inglés LNTM, de Linear No-Threshold Model), aplicándose mediante el siguiente *principio de optimización*: «La probabilidad de una exposición, el número de personas expuestas y la magnitud de sus dosis individuales deberían ser mantenidas tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales» (ICRP, 2007: 13).

Conocido por el acrónimo ALARA (de *As Low As Reasonably Achievable*), este criterio resulta muy difícil de cumplir en las situaciones de accidente nuclear con liberación radiactiva, como demuestran las experiencias reales de Chernobyl y Fukushima Daiichi. Al depender de la evolución de los propios acontecimientos, la dimensión de lo «razonablemente alcanzable» se enfrenta a múltiples interrogantes: ¿Cuáles son los riesgos para la salud en dependencia del tipo de contaminación radiactiva? ¿Qué niveles de radiación justifican la evacuación de la población u otras medidas de intervención? ¿Cuánto más sensibles a la radiación son los niños y mujeres embarazadas? ¿A cuáles principios éticos debe atenerse la protección radiológica?... Estas cuestiones adquieren un profundo carácter dilemático, ya que ni siquiera hay una respuesta concluyente a la pregunta básica: *¿Cómo los seres humanos somos afectados por las diferentes dosis de radiaciones ionizantes (naturales y artificiales), y de qué manera podemos protegernos de sus potenciales daños?*

Si bien esta problemática suele abordarse desde una visión antropocéntrica por la protección radiológica, debe tenerse en cuenta que constituye el objeto de estudio de la radiobiología: «la ciencia que estudia los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los sistemas vivos a todos los niveles de su organización» (Gudkov *et al*, 2015). Junto a otras dos ciencias: la radiofísica y la radioquímica, ellas tres conforman el campo interdisciplinario que se conoce como radiología. A su vez, desde mediados de los años 50 del siglo XX despunta la radioecología, reconocida indistintamente como una ciencia independiente o, en su lugar, como una rama específica de la radiología debida a la confluencia entre la radiobiología y la ecología (ver figura 8). Así se viene consolidando el enfoque radioecológico que se dedica a investigar cómo se produce la concentración y migración de los elementos radiactivos en los componentes de la comunidad biótica (biocenosis), siguiendo la cadena «suelo

---

<sup>19</sup>Las recomendaciones del ICRP tributan a la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), la Organización Internacional del Trabajo (ILO) y la agencia de energía nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), además de servir como fundamento a las disposiciones emitidas por las autoridades nacionales. La organización hermana del ICRP es la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU). La ICRP y la ICRU interactúan con el Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR).



(agua)-plantas-animales-hombre». Resulta cada vez más notoria la necesidad de integrar epistemológicamente ambas perspectivas: antropocéntrica y ecocéntrica (Aleksajin, 2006). Esto con vistas a fundamentar las normas de protección radiológica que estipulan cuáles son las dosis permisibles de radiaciones ionizantes no solamente para el ser humano, sino para la biota, así como las consecuencias que tendría la liberación de radionucleidos artificiales por encima del fondo natural para el ecosistema en su conjunto. A continuación adelantamos algunas nociones básicas de radiología y las principales cuestiones problemáticas que abordará nuestro análisis con tal de evidenciar el vínculo insoslayable entre la filosofía práctica de la protección radiológica y el derrotero accidentado de la energética nuclear.

### *Radiaciones ionizantes, radiactividad y contaminación radiactiva*

Como ya se ha explicado con anterioridad, los descubrimientos de los rayos X en 1895 por Wilhelm Röntgen, de las radiaciones uránicas en 1896 por Henri Becquerel y del radio en 1898 por el matrimonio Curie fueron seguidos por las revelaciones de que estas radiaciones poseían capacidad de ionización. Quiere decir: todas tienen energía suficiente para arrancar un electrón de una molécula o de un átomo, dejándolos con una carga positiva; o sea, convirtiéndolos en *iones*. Por eso se denominan *radiaciones ionizantes*, en contraste con las no ionizantes como la luz visible y los rayos ultravioletas e infrarrojos, que carecen de suficiente energía para romper los enlaces atómicos. La *radiactividad* es el fenómeno físico por el cual los núcleos atómicos de los elementos químicos inestables (isótopos radiactivos), al liberar su exceso de energía como radiaciones ionizantes, se transforman o decaen espontáneamente hasta convertirse en elementos estables.

Todos los seres vivos estamos expuestos a la *radiactividad natural*, cuya fuente es —en primer lugar— la desintegración o decaimiento de los radionucleidos presentes en la propia corteza terrestre, tales como el uranio, el torio, el radio, el radón, el polonio... y los isótopos radiactivos del calcio, carbono y tritio, entre otros. También son fuentes de radiactividad natural el Sol y estrellas de la galaxia donde ocurren procesos nucleares y termonucleares. La *radiactividad inducida* o *artificial* se produce cuando un material estable se torna radiactivo por exposición a fuentes de radiación como la fisión nuclear en cadena o la activación neutrónica. Es el caso de los productos que se almacenan o reprocessan como residuos de las centrales atómicas. Un ejemplo es el plutonio-239, cuya presencia en la naturaleza sería casi nula, de no ser por los casos excepcionales de accidentes severos (Roza, 2009).

En 1902 Rutherford y Frederick Soddy determinaron que el ritmo con que cada radionucleido se desintegra disminuye exponencialmente con el tiempo (Weinert, 2009). Esa velocidad o ritmo exponencial se conoce como *actividad radiactiva* (A) y se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$A(t) = |dN/dt| = \lambda \times N(t);$$

$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

Siendo  $N_0$  el número inicial de átomos presentes de determinado radionucleido, la constante  $\lambda$  (lamda) representa la probabilidad de que este elemento se desintegre, quedando  $N(t)$

átomos al cabo del tiempo  $t$ . La actividad se mide en Becquerelios (Bq), que significa una tasa de desintegración por segundo, aunque es frecuente expresarla en números múltiples porque 1 Bq es una unidad ínfima. Anteriormente, esa magnitud se medía en curios (Ci), que designa 37 000 millones de desintegraciones por segundo ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ ), por ser lo que ocurre con un gramo de radio-226, primer radioisótopo en ser estudiado a cabalidad.

La actividad se utiliza para expresar la intensidad de cualquier fuente radiactiva a nivel de superficie (área) o por unidad de masa o de volumen. Sirve para evaluar el grado de *contaminación radiactiva* en el aire, suelo y materiales, incluidos los órganos y tejidos humanos. Si bien varía con el peso atómico de cada radioisótopo, la actividad depende fundamentalmente del período de *semidesintegración* o *semivida*. Este es el intervalo de tiempo necesario para que la cantidad inicial de ese radioisótopo se reduzca a la mitad y se calcula como:

$$T_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0,693/\lambda$$

Este tiempo puede variar desde una fracción de segundo a millones de años. Si una muestra contiene varios radionucleidos, su actividad total será la suma de las actividades respectivas de todos hasta que, al cabo de cierto tiempo, quedará solo el radioisótopo con mayor período de semidesintegración o semivida. Por ejemplo: el uranio-238 se demora 4,56 mil millones de años en semidesintegrarse; el plutonio-239 tarda 24 100 años, y el radio-226 unos 1 620 años. Otros radionucleidos como el yodo-131 y el cesio-137 tienen una semivida de unos ocho días y 30 años, respectivamente. Estos dos radioisótopos son los primeros en causar perjuicios durante un accidente nuclear, por ser elementos volátiles que ingresan de inmediato en la atmósfera, formando partículas en suspensión altamente radiactivas (aerosoles) que contaminan los alimentos, el agua y demás productos vitales. No hay dudas de que las células tiroideas pueden morir o ser alteradas bajo los efectos de la desintegración beta del yodo-131 y del cesio-137. De hecho, aunque tardó en ser reconocida oficialmente, la incidencia del carcinoma de tiroides infantil por absorción de esos radionucleidos es una consecuencia inobjetable de la tragedia de Chernobyl (World Health Organization, 2006)<sup>20</sup>. Otro elemento significativo en los escenarios contaminados por accidente nuclear es el estroncio-90. Con un periodo de semivida de 28,78 años, este radioisótopo sustituye al calcio en los huesos, prolongando la exposición interna a la radiación hasta producir cáncer óseo primario (Mangano y Sherman, 2011).

En términos de relevancia para la protección radiológica conviene más tener en cuenta el tiempo de desintegración total, que es unas 10 veces el  $T_{1/2}$ . Así, mientras el yodo-131 demora apenas unos dos meses y medio en desaparecer completamente, el estroncio-90 tarda unos 280 años y el cesio-137 unos 300 años. A estos se suman el plutonio-238, plutonio-239, plutonio-240 y plutonio-241, entre otros elementos de larga vida. Ellos se encuentran presentes en los 30 kilómetros a la redonda de la electronuclear de Chernobyl,

---

<sup>20</sup>El incremento de la hiperplasia tiroidea fue detectada tempranamente por médicos cubanos como la principal afectación en los niños de Chernobyl (Güell *at al*, 2004). Esta afección endocrina debe tratarse a tiempo, porque puede devenir cancerígena. Desde 1990 hasta 2011 funcionó exitosamente el programa cubano de atención médica integral, masivo y gratuito, a infantes que habitaban áreas afectadas por el accidente. Más de 20 000 niños de Ucrania, Bielorrusia y Rusia viajaron a Cuba para tratarse de esa y otras afecciones relacionadas con el impacto radiológico (Medina y García, 2016).

en las llamadas zonas de «exclusión» y de «total reasentamiento». Si bien la concentración de cesio-137 ha decaído sustancialmente a lo largo de los años desde que ocurrió el desastre, no sucede lo mismo con el estroncio-90. Por demás, la desintegración espontánea del plutonio-241 en americio-141 representa una amenaza creciente, dada la gran movilidad de este radioisótopo altamente tóxico en el medio ambiente (Yablokov *et al*, 2016). Estas circunstancias impiden que se pueda vivir normalmente en dichas zonas, aunque *grosso modo* hayan disminuido los niveles generales de radiactividad.

Uno de los grandes problemas de la protección radiológica en las zonas contaminadas radiactivamente es que los radionucleidos artificiales se encuentran en el entorno, pero también pueden ser ingeridos o respirados. Por tanto, el grado de exposición a las radiaciones ionizantes tiene un carácter combinado, dependiendo de cuáles sean las dosis recibidas por radiación externa o por radiación interna. Debido a las condiciones meteorológicas, las liberaciones radiactivas de Chernobyl se depositaron en vastos territorios de manera irregular con focalización en manchas (Izrael, 2016). Coexistían zonas muy contaminadas con otras zonas menos contaminadas, tanto a una escala de decenas como de centenares y hasta miles de metros. Por este motivo, la promediación de la actividad radiactiva para grandes áreas trajo consigo que se subestimaran las dosis recibidas a nivel individual y colectivo, sobre todo durante los primeros meses después del accidente. De ahí que sea muy difícil determinar cuál fue el verdadero grado de exposición (externa e interna) de los damnificados y, por ende, cuáles podrían ser los efectos radiobiológicos en dichas poblaciones (Yablokov *et al*, 2016).

#### *Clasificación convencional de los efectos radiobiológicos*

Los efectos radiobiológicos se clasifican con fines heurísticos en *efectos deterministas* (renombrados como *reacciones tisulares nocivas*) y *efectos estocásticos* (ver infografía 10). Por *reacciones tisulares nocivas* son reconocidos aquellos efectos radiobiológicos que aparecen cuando la dosis absorbida supera un «valor umbral» (por encima de 0,5-1 Gray)<sup>21</sup>, según sea la radiopatología. Su gravedad aumenta con el incremento de la dosis debido al deterioro de la capacidad de recuperación del tejido, entre otros factores. En un inicio fueron llamados «efectos no estocásticos» (ICRP, 1977), y después «efectos deterministas» al considerarlos «causalmente determinados por sucesos previos», específicamente por la muerte de una gran cantidad de células por necrosis o apoptosis (ICRP, 1991). Su gravedad también depende de cuáles órganos sean afectados por su mayor radiosensibilidad y decisiva influencia en el funcionamiento del organismo. Es el caso de la médula ósea roja, cuyas células madres son las responsables de la producción continua de células sanguíneas (hematopoyesis).

---

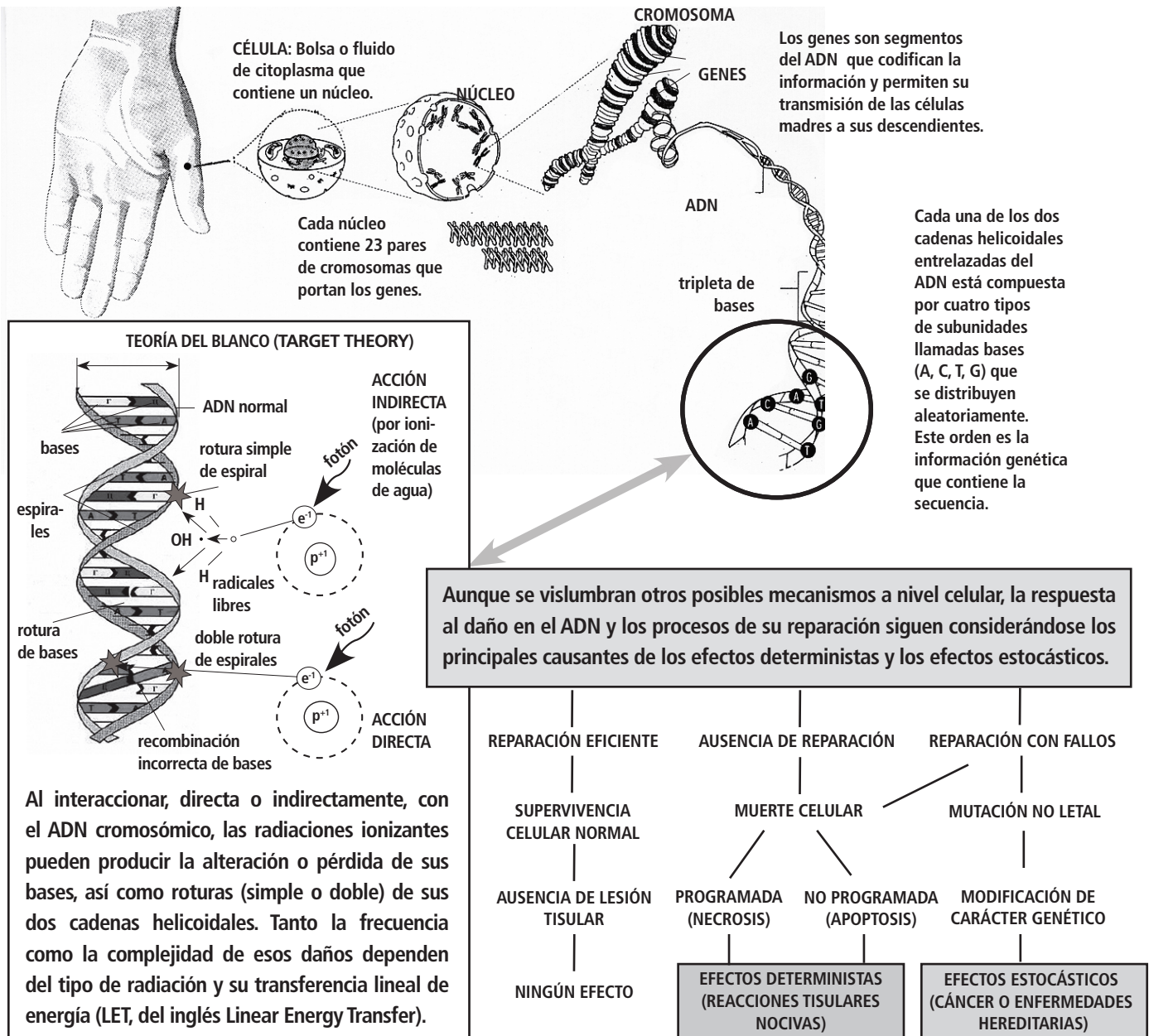
<sup>21</sup> La «dosis absorbida» por la materia se mide en Gray (Gy), que corresponde a una unidad de energía absorbida (julios, J) por una unidad de masa (kilogramo, kg). Teniendo ya en cuenta el efecto biológico según el tipo de radiación, se define la «dosis equivalente» en Sievert (Sv), que es el Gy multiplicado por un factor de calidad que va desde 1 a 20 (1 para la radiación beta o gamma, y 20 para la radiación alfa). También en Sv se expresa la «dosis efectiva», que pondera la «dosis equivalente» teniendo en cuenta la radiosensibilidad de los tejidos u órganos. Estas unidades del sistema métrico decimal (SI) tenían al *rad* y al *rem* como sus análogas en el antiguo sistema convencional de unidades (CS): 1 Gy = 100 rad y 1 Sv = 100 rem. Por razones históricas, ambos sistemas de unidades conviven hasta hoy día en la literatura especializada (ver tabla 1 e infografía 12).

Los efectos radiobiológicos en los seres vivos pueden ser somáticos o genéticos, así como tempranos o tardíos en dependencia de cuánto tiempo tardan en manifestarse, clasificándose a la postre con fines heurísticos en *efectos deterministas* (renombrados como *reacciones tisulares nocivas*) y *efectos estocásticos* (ICRP, 2007). Ambos tipos de efectos se deben a la acción directa o indirecta de las radiaciones ionizantes sobre la estructura de las células, cuyas funciones esenciales son afectadas hasta provocarles la muerte física, impedirles que se reproduzcan o alterar su información genética. La radiobiología convencional señala al ADN cromosómico como el principal blanco celular para dichos efectos biológicos (UNSCEAR, 2012).

Por *reacciones tisulares nocivas* son reconocidos aquellos efectos biológicos que aparecen cuando la dosis absorbida supera un «valor umbral» (1 Gy o más), según

sea la radiopatología. Estos daños se atribuyen a la muerte de las células, si bien se maneja de que pueden intervenir diferentes mecanismos de respuesta biológica que provocan otros tipos de cambios genómicos y/o celulares.

Por *efectos estocásticos* se entienden aquellos daños de naturaleza probabilista, cuya frecuencia de aparición aumenta proporcionalmente a la dosis de radiación, aunque sin la existencia de un umbral; o sea, pueden ocurrir a moderadas y bajas dosis, sin que su gravedad dependa de cuál sea la magnitud de dichas dosis. Ocurren cuando las mutaciones de las células madres derivan en la aparición de cáncer o de males hereditarios. Aunque los daños al ADN estén acompañados de mecanismos reparadores eficientes, dicha reparación no está exenta de error. De ahí que si la célula madre es somática, su transformación puede ser el inicio de una enfermedad maligna, y si es una célula germinal, de enfermedades hereditarias.



Infografía 10: Clasificación convencional de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Fuente: elaboración propia.

Al interrumpirse esa función indispensable para la vida del hombre y demás mamíferos, el síndrome hematopoyético es uno de los efectos somáticos de la enfermedad de radiación aguda y suele manifestarse al cabo de horas, días o semanas. Fue el caso de los 134 miembros del personal (operarios y bomberos) que resultaron afectados durante los primeros momentos que siguieron a la explosión de Chernobyl. Aunque 14 recibieron trasplantes de médula ósea, no pudieron evitarse 28 víctimas mortales por causa radiológica reconocida<sup>22</sup>. Su deceso ocurrió durante los tres primeros meses posteriores a la tragedia y, según los reportes médicos, 17 no lograron sobrevivir debido a las quemaduras radiactivas de la piel en más del 50 % de la superficie corporal. Este efecto determinista fue resultado de una dosis absorbida entre 2 y 16 Gy, producida por rayos gamma y rayos beta (Barabanov y Ozanov, 1993; Ilin, 1994).

A partir de 2007, esos efectos deterministas se conocen como reacciones tisulares nocivas, ya que pueden ser atenuados con procedimientos ulteriores a la irradiación como el empleo de citoquinas, factores de crecimiento y otros modificadores biológicos (ICRP, 2007). También se tiene en cuenta que esos daños no se deben únicamente a la muerte celular por cambios irreparables en el ADN, sino que varían para cada tejido u órgano en dependencia de cuáles sean sus mecanismos intrínsecos de respuesta biológica, comprobándose que también influyen otros tipos de procesos genómicos y/o celulares. Es el caso notorio de la predisposición genética a la radiosensibilidad de las células epiteliales del cristalino del ojo como posible causante de su opacidad radioinducida, que deviene catarata con pérdida visual al cabo de los años. De ahí la aparición tardía en los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki a las altas dosis de exposición aguda, así como en el personal de descontaminación de Chernobyl, los llamados «liquidadores», quienes estuvieron expuestos a bajas o medianas dosis de radiación crónica (Chumak *et al*, 2007).

Para evitar la opacidad del cristalino, considerándola un efectos determinista, se habían establecido los siguientes umbrales de dosis absorbida: entre 0,5 y 2 Gy para irradiación aguda, y 5 Gy acumulados de irradiación crónica o muy fraccionada. En tanto, para descartar la catarata radiogénica con perjuicio visual (ceguera), esos valores eran 5 Gy (aguda) y no más de 8 Gy (crónica) (ICRP, 2007). No obstante, el umbral de dosis absorbida —tanto en forma aguda como crónica— fue reducido a 0,5 Gy, luego de que una serie de estudios confirmaron la proliferación de cataratas en médicos intervencionistas y personal sanitario que trabajaron con fluoroscopia (rayos X). También fue disminuido drásticamente el límite de dosis equivalente para exposición ocupacional: desde 150 a 20 mSv/año, previendo que ambas dolencias (opacidad del cristalino y catarata con pérdida visual) pudieran ser efectos estocásticos *sui generis*, y no precisamente reacciones tisulares cuya gravedad depende de la magnitud de la dosis (ICRP, 2012a; UNSCEAR, 2012).

Por *efectos estocásticos* (del griego *stokastikos* = perteneciente a la conjetura) se entienden aquellos daños de naturaleza probabilista, cuya frecuencia aumenta en proporción a la dosis de radiación, pero sin la existencia de un umbral; o sea, pueden producirse por exposición a bajas y moderadas dosis, sin que su gravedad dependa de cuál sea la magnitud de dichas dosis/

---

<sup>22</sup>En total fueron 30 muertes, dos de ellas por causas no radiológicas (Karpan, 2005).

tasas de dosis. Por lo general, se manifiestan pasados los años o, incluso, decenios después de la exposición; es decir, suelen ser efectos tardíos. Ocurren cuando las modificaciones de las células madres por daños al ADN, entre otros posibles mecanismos, derivan en la aparición de cáncer o enfermedades hereditarias<sup>23</sup>. El cáncer se produce por el crecimiento y desarrollo anormales de las células somáticas —o sea, de los tejidos y órganos— hasta devenir promoción tumoral, conversión maligna y metástasis. Los efectos heredables se deben a la mutación de las células germinales (esperma y óvulos) en los órganos reproductivos (testículos y ovarios), debido a lo cual la fecundación puede originar un cigoto mutado (UNSCEAR, 2012).

No obstante, esa diferenciación convencional entre reacciones tisulares nocivas y efectos estocásticos se incumple para determinados efectos radioinducidos sobre la salud humana. Reacciones tisulares como la catarata con discapacidad visual —a la que ya nos hemos referido— y algunas enfermedades circulatorias tienen lugar para dosis bajas, pudiendo ser a la postre también estocásticas (ICRP, 2012a). Y, a la inversa, existen enfermedades malignas que no son probabilísticas, sino que aparecen cuando se supera un umbral de dosis, aunque sea relativamente bajo: el cáncer de la piel, por ejemplo. Por último, el cáncer de tiroides exige un enfoque especializado, ya que su incidencia o mortalidad luego de un accidente nuclear depende de la radiosensibilidad de esa glándula a la absorción del yodo y cesio radiactivos, sobre todo por los niños y el feto *in utero* en la mujer embarazada (Cardis y Hatch, 2011).

### 3.1/ *La protección radiológica: evolución histórica de un paradigma en crisis*

Al coexistir disímiles teorías radiobiológicas y contradictorias evidencias epidemiológicas sobre la posibilidad de los efectos estocásticos (somáticos y genéticos), los cuales pueden producirse o no, el peligro de la exposición a bajas dosis/tasas de dosis de radiaciones ionizantes ha estado siempre sujeto a ardua discusión científica (Walker, 2000b). Reconocemos esta controversia como el «enigma de las curvas dosis-respuesta», en el sentido de que coexisten varios modelos antagónicos sobre el riesgo radiológico, sin que pueda identificarse la existencia de una dosis umbral. Por este motivo, desde su aceptación oficial en la década de 1970 hasta la fecha, el Linear No-Threshold Model (LNTM) sirve como paradigma del sistema internacional de protección radiológica. Su esencia radica en que ninguna exposición a las radiaciones ionizantes está libre de riesgo si supera a la radiación natural por un tiempo y en un lugar determinados. La probabilidad de contraer leucemia —por ejemplo— disminuye con el monto de la dosis, pero no hay manera de identificar un límite inferior para el cual esa probabilidad desaparece completamente. Por demás, como ya se ha dicho, la gravedad del efecto estocástico no depende de la magnitud de la dosis recibida por baja que sea. Si llegara a aparecer, la leucemia puede ser tan severa como si hubiera sido provocada por un valor de dosis mayor.

El LNTM se basa en los resultados del Estudio sobre duración de la vida (Life Span Study, LSS), el programa de investigación epidemiológica sobre los efectos tardíos de las

---

<sup>23</sup>La opacidad del cristalino y la catarata con pérdida visual radiogénicas, como ya se ha dicho, podrían ser efectos estocásticos atípicos; o sea, ni cancerígenos ni hereditarios.

radiaciones ionizantes en los supervivientes japoneses de los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki. Los datos empíricos de ese estudio de cohorte sobre la incidencia de cáncer son extrapolados linealmente desde el rango de exposición a las altas dosis que sufrieron esas víctimas (entre 100-200 mGy y 0,5-6 Gy) al intervalo de bajas dosis (de 0 a 100 mSv). Sin embargo, la tragedia de Chernobyl destapó la enorme dificultad de pronosticar y/o identificar los efectos nocivos para niveles muy bajos de radiación ionizante por encima del fondo natural acostumbrado. Si ya desde su creación, el LNTM había suscitado fuertes dudas al respecto, estas se incrementaron cuando la aplicación de dicho modelo con fines predictivos a grandes colectivos humanos provocó enormes malentendidos sobre el impacto radiológico de esa catástrofe en la Unión Soviética. Al cumplirse veinte años de haberse iniciado, salieron a la palestra pública dos informes mutuamente excluyentes sobre sus consecuencias radiológicas.

El informe *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Care Programmes* excluye que ese «accidente muy grave» haya provocado efectos negativos profundos en la salud de la población de las zonas circundantes, salvo unos 6000 casos de cáncer de tiroides en niños y adolescentes, de los cuales una proporción considerable podría atribuirse al consumo de leche contaminada con yodo-131 (World Health Organization, 2006). Este documento fue elaborado por el Foro de Chernobyl, fundado en 2003 bajo el auspicio de la OIEA y con la participación de otras ocho entidades internacionales, junto a representantes de los gobiernos de Bielorrusia, Rusia y Ucrania. Sus conclusiones se basan en los estudios llevados a cabo en 2000 por el Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (UNSCEAR), complementado por más de 350 artículos publicados en revistas de prestigio científico internacional. Aunque esos resultados se avienen básicamente con el LNTM, el citado informe pone en duda la capacidad de los estudios epidemiológicos —sobre todos los efectuados en la antigua Unión Soviética— para detectar los efectos cancerígenos de las radiaciones ionizantes por debajo de cierto umbral de dosis, ya que estos se solaparían con los mismos efectos provocados por otros agentes causales: fumar, por ejemplo. Por tanto, nunca se podría comprobar que el propio LNTM se cumple en la práctica, limitándose su aplicabilidad a fines preventivos para la evaluación del riesgo, como veremos en este capítulo.

A esas conclusiones del Foro de Chernobyl, el Partido Verde Europeo contrapuso *The Other Report on Chernobyl* (Fairlie y Surmer, 2006), alertando que las consecuencias a largo plazo del accidente seguían siendo inciertas y estableciendo predicciones sobre un número de muertes por cáncer en los territorios más afectados que superaban con creces a las oficialmente reconocidas por el OIEA, la OMS, el PNUD, el UNSCEAR y demás entidades participantes en dicho foro. También ese mismo año 2006, con apoyo de Greenpeace Internacional, comienza a publicarse en forma sistemática por el biólogo ruso Alexey Yablokov su serie de trabajos dedicados a corroborar los daños severos de Chernobyl sobre la salud humana y la biota, enfatizando en su rango de catástrofe sociorradioecológica.

Esta serie se inició con *Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment* (Yablokov *et al*, 2009), publicado por la New York Academy of Sciences después de aparecer en ruso. Tanto el *The Other Report...*, como el libro de Yablokov,

fueron actualizados en 2016 con motivo de cumplirse el 30 aniversario de la catástrofe, ratificando las peores predicciones sobre sus consecuencias actuales y futuras. Su oposición al LNTM como extrapolación del LSS se basa en que los sobrevivientes del bombardeo atómico recibieron dosis muy altas de radiación en un plazo corto de tiempo, lo que resulta muy diferente a la exposición crónica a bajas dosis que sufrieron los damnificados por las secuelas de Chernobyl. De ahí que exista un mayor riesgo cancerígeno que el previsto por el LNTM. Esta postura fue argumentada por el Comité Europeo sobre Riesgos de Radiación (European Committee on Radiation Risk, ECRR), proponiendo cambios en el sistema internacional de protección radiológica (Busby y Bertell, 2003).

Pero la mayor oposición al LNTM proviene de los partidarios del «principio de hormesis», según el cual las exposiciones a bajas dosis de radiación resultan beneficiosas para la salud. Los científicos que defienden esa postura suponen que, al ser la radiactividad natural de fondo una tasa que ha afectado a los seres vivos desde su aparición en la Tierra (con una media mundial de 2,4 mSv/año), los propios organismos han desarrollado mecanismos para aprovecharse de tales radiaciones; por ejemplo: para deshacerse de bacterias o virus extraños. Entre sus partidarios fervientes estaba Zbigniew Jaworowski, quien fuera presidente del Consejo Científico del Laboratorio Central de Protección Radiológica en Varsovia y presidente del UNSCEAR. Este científico polaco, conocido mundialmente por negar el calentamiento global, era un acérrimo detractor del LNTM y llegó a expresar que las consecuencias radiológicas de Chernobyl eran una falacia: «El accidente demostró que usar el supuesto LNTM como base para las medidas de protección y las limitaciones de dosis de radiación era contraproducente y provocaba sufrimientos y pobreza de millones de habitantes de áreas contaminadas» (Jaworowsky, 2010: 148).

A partir de Chernobyl se consolidan otros tres modelos no solamente diferentes al LNTM, sino antagónicos con respecto a los efectos estocásticos de las bajas dosis/tasas de dosis: el modelo que minimiza la probabilidad de esos daños; el que contrariamente alerta sobre su alta peligrosidad, y el que defiende los efectos beneficiosos de la radiactividad por hormesis (ver figura 9). A estos se suma una cuarta posición que preconiza la existencia de un «umbral de dosis seguro», aunque difícilmente detectable, por debajo del cual no habría ningún tipo de efecto, ni perjudicial ni beneficioso. Cada una de esas posturas varía en dependencia del énfasis que se otorgue a los datos epidemiológicos (un enfoque «de arriba hacia abajo») o a los mecanismos biológicos (un enfoque «de abajo hacia arriba»). Mientras el primer enfoque se dificulta debido a las limitaciones epistemológicas y metodológicas de la radioepidemiología para inferir la causalidad —o sea, la relación entre causa y efecto—, el segundo enfoque se complica porque los procesos involucrados en la inducción del cáncer radioinducido son muy complejos y dependen de múltiples factores biológicos (Brant, 2012).

### 3.1.1/ *El enigma de las curvas dosis-respuesta: radiobiología versus radioepidemiología*

La gran paradoja de la radiobiología es el enorme desbalance que hay entre la insignificante cantidad de energía absorbida por la exposición a las radiaciones ionizantes y el



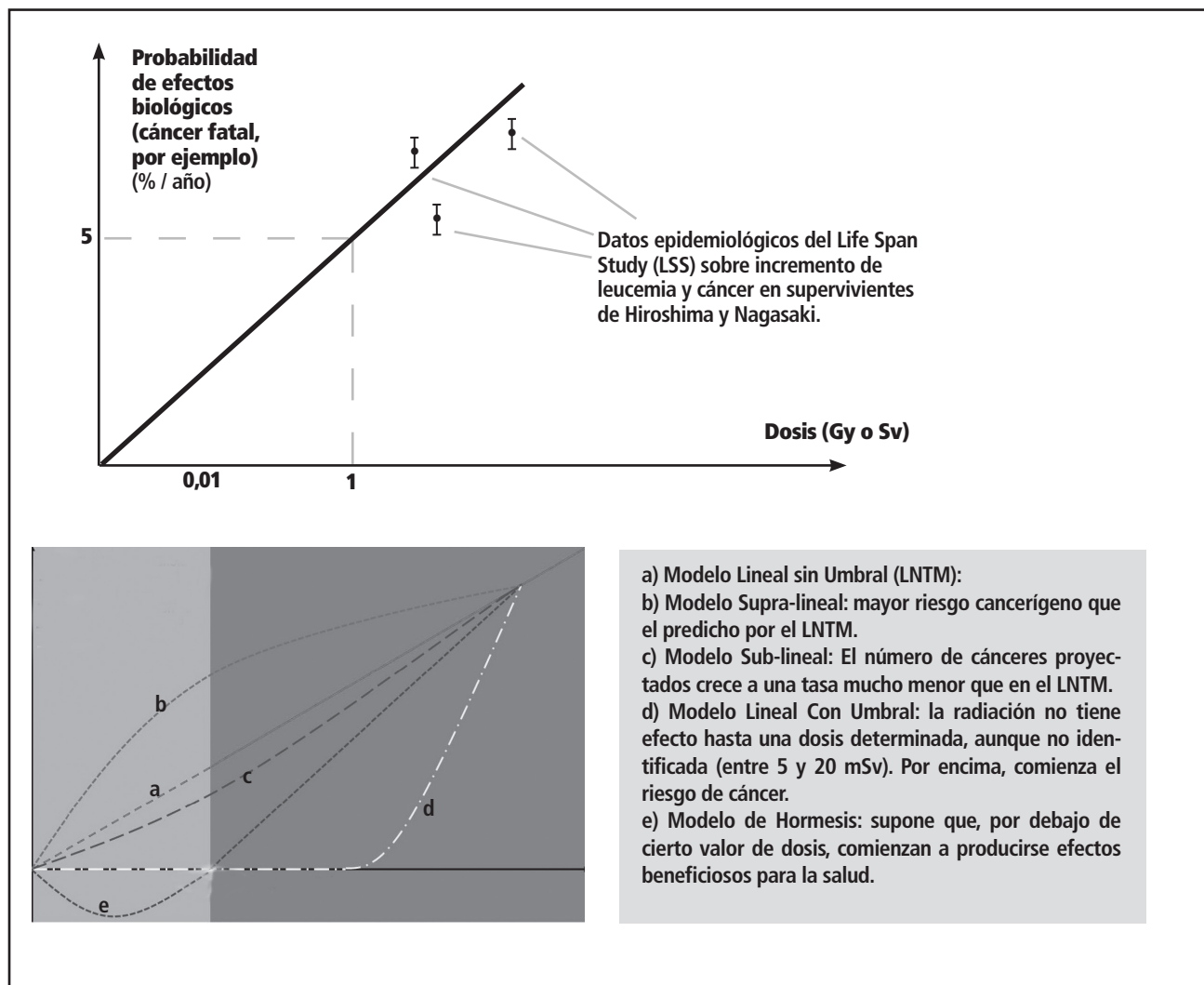


Figura 9: El enigma de las curvas dosis-respuesta. Fuentes: Belyakov, 2008; Seong *et al*, 2016.

alto grado de reacción del tejido biológico, incluyendo la posibilidad de un resultado fatal si se traspasa cierto umbral. Para el ser humano este umbral de dosis mortal es 6 Gy, aun cuando esta cantidad de irradiación aumenta la temperatura corporal en apenas 0,004 °C (Obodovsky, 2019). Aunque los primeros intentos de responder a esa paradoja se remontan a la década de 1920, no es hasta 1946 que aparece la teoría del blanco (*target theory*) del físico estadounidense Douglas Lea, seguida casi al unísono por la teoría del impacto (*hit theory*), del dúo formado por el biólogo ruso Nikolai Timofeev-Ressovsky y el biofísico alemán Karl Günter Zimmer (Lea, 1946; Timofeeff-Ressovsky y Zimmer, 1947).

Ambas teorías son muy semejantes y fueron desarrolladas antes del descubrimiento de la estructura del ADN en 1953, por lo que debieron ser reajustadas. A grandes rasgos, sus planteamientos coinciden en que tanto las reacciones tisulares nocivas como los efectos estocásticos (carcinogénico y mutagénico) de las radiaciones ionizantes se producen mediante mecanismos de acción directa o indirecta sobre el ADN que constituye los genes contenidos en los cromosomas del núcleo de la célula (ver infografía 10). Para que haya probabilidad de daño basta un solo impacto radiactivo, aunque sea una ínfima cantidad de energía inducida por un electrón proveniente de una fuente de rayos X (causa directa), o a través de

un radical libre de oxígeno por radiólisis del agua (causa indirecta). No existe ninguna dosis segura y, de ahí, la presunción de linealidad sin umbral (Belyakov, 2008).

Conforme se produjeron avances en radiobiología, apareció la teoría de los efectos no dirigidos (*non-targeted effects*), así llamada porque se basa en mecanismos que no están relacionados de manera directa con el ADN como diana, además de ser particularmente significativos a bajas dosis/tasas de dosis. Mientras que el *mecanismo de respuesta adaptativa y/o estimulación de la reparación celular* apunta a la disminución de los efectos dañinos de las radiaciones ionizantes; en sentido opuesto se han vislumbrado otros mecanismos que podrían aumentar la probabilidad de cáncer en sucesivas generaciones. Uno de ellos es el *fenómeno de inestabilidad genómica*, cuando las células descendientes de una célula irradiada pueden inesperadamente ser muy susceptibles a mutaciones generales (Busby y Bertell, 2003). Este fenómeno puede ocurrirle también a células que no han sido irradiadas, pero son vecinas de las que sí lo han sido, en lo que se ha denominado «efecto espectador o de vecindad» (*bystander effect*). Paradójicamente, experimentos *in vitro* e *in vivo* han revelado que este efecto espectador también puede propiciar la activación de mecanismos protectores a nivel celular y tisular contra el cáncer, dando lugar incluso al principio de hormesis (Marcu, 2009).

A los *non-targeted effects* se apela indistintamente para fundamentar la legitimidad de los cuatro modelos dosis-respuesta que cuestionan la validez del LNTM: supralineal, sublineal, lineal con umbral y hormético (ver figura 9). A favor de la hipótesis sobre un mayor riesgo cancerígeno que el predicho por el LNTM se manifiesta el modelo supralineal, el cual suele explicarse mediante el fenómeno de inestabilidad genómica y el *bystander effect*. Pero, contradictoriamente, este efecto de vecindad se emplea también para validar los modelos sublineal y lineal con umbral —o sea, aquellos que señalan una menor o ninguna probabilidad de daño a partir de un umbral de dosis—, e incluso para explicar los efectos beneficiosos (modelo hormético). Estos tres últimos modelos se basan también en los mecanismos de respuesta adaptativa y/o estimulación de la reparación celular, así como en la activación de la apoptosis que elimina las células dañadas, entre otros efectos no dirigidos. De modo que el propio auge cognitivo de la radiobiología ha creado el enigma de las curvas dosis-respuesta, pletórico de incógnitas y paradojas. Ante tal profusión de hipótesis confusas, contradictorias y hasta antagónicas sobre la radiocarcinogénesis, no cabe dudas de que todavía se está muy lejos de tener una comprensión cabal de los mecanismos radiobiológicos que complementaría los estudios epidemiológicos sobre los efectos perjudiciales de las bajas dosis/tasas de dosis de radiaciones ionizantes sobre la salud humana (Seong *et al*, 2016).

Una manera de resolver este enigma sería propiciar el estudio de un grupo de personas que se encuentre expuesto en un laboratorio a bajas dosis/tasas de dosis, comparado con un grupo exactamente similar que no esté expuesto. Obviamente, este experimento no puede ser llevado a cabo, entre otros motivos por consideraciones éticas. Y aunque se haya realizado ese tipo de estudios con animales (ratones, por ejemplo), sus datos no se recomiendan para la estimación del riesgo de cáncer en seres humanos, ya que existe una gran diferencia de radiosensibilidad entre las distintas especies, además de que los resultados de tales experimentos

han sido confusos y excluyentes entre sí. Es por eso que, considerándolo un «experimento natural», el Life Span Study (LSS) se mantiene como basamento epidemiológico del LNTM, si bien la aplicabilidad de este modelo pragmático para la protección radiológica resulta cada vez más cuestionada por el estado actual de la biología de la radiocarcinogénesis.

*¿Cuál sería la base científica para proteger al público durante una contaminación radiactiva, teniendo en cuenta que coexisten varios puntos de vista antagónicos sobre los efectos estocásticos de las bajas dosis de radiación ionizante (menores de 100 mSv) por encima del fondo natural?* Considerándola la quintaesencia del dilema sociorradioecológico, esta interrogante ha obligado a que los propios radioproteccionistas reconozcan que existen límites epistemológicos —tanto de la radiobiología como de la radioepidemiología— para resolver el enigma de las curvas dosis-respuesta: «La solución del problema solo puede ser reguladora. Debemos reconocer que la ciencia no nos permite determinar si hay efectos negativos o positivos o ningún efecto después de la exposición a dosis bajas. Lo que sabemos es que, si existieren tales efectos, son tan pequeños que quedan fuera de los límites de nuestras ciencias» (González, 2018: 194).

Como analizaremos en su momento, esta declaración se adscribe a la problemática «transcientífica» que enunciara —por primera vez— el ingeniero Alvin Weinberg para lidiar con las incertidumbres irreductibles en la regulación de la energética nuclear (Adler y Weinberg, 1978). Su punto de vista es que el dilema de la exposición a bajas dosis requiere una solución legislativa y reglamentaria bajo el precepto *De minimis*, entendido como la necesidad de eximir de control aquellas situaciones de riesgos cuya probabilidad de ocurrencia se basa en conjeturas científicas que no han podido comprobarse. Dicha expresión latina proviene del lenguaje de la jurisprudencia: *de minimis non curat lex* (la ley no se ocupa de minucias) y *de minimis non curat praetor* (lo pequeño no importa al pretor o juez), extrapolándose al ámbito de la regulación nuclear para crear un puente entre la ciencia y la política durante la toma de decisiones en la incertidumbre (ver subacápite 4.1.2).

La gran dificultad radica en cómo determinar cuáles niveles de exposición podrían ser consideradas *de minimis*, atendiendo a las dosis recibidas, ya que los adultos y niños tienen diferentes radiosensibilidades, por citar uno de los argumentos éticos más sólidos en contra de dicha propuesta (Shrader-Frechette y Persson, 2001; Shrader-Frechette, 2013). De ahí que siga vigente oficialmente la hipótesis lineal sin umbral basada en el LNTM, según la cual no existe dosis segura por encima de cero y —por tanto— todo nivel de exposición debiera optimizarse mediante el cálculo de coste y beneficio para mantenerlo «tan bajo como sea razonablemente alcanzable»; o sea, el criterio ALARA. Es así que la evaluación del riesgo radiológico siempre contiene un sesgo económico, político, social y cultural, aun cuando se base en criterios científicos supuestamente consensuados internacionalmente.

### 3.1.2/ *La dosis permisibles: ética versus commensurabilidad*

El severo cuestionamiento del LNTM por una parte de la comunidad científica se ha extendido a la reprobación del criterio ALARA, arguyéndose que este principio de

optimización debe ser removido de las normativas de protección radiológica para evitar su negativa influencia en la aceptabilidad social de la energía nuclear. Abanderada por los promotores de la hormesis, bajo el liderazgo del toxicólogo estadounidense Edward Calabrese, editor jefe de la revista *Dose response*, esta tendencia revisionista ha ganado una mayor credibilidad política desde 2015, cuando esa petición suya fue sometida a consideración por la United State Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC) y la National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP). Por primera vez una propuesta de este tipo fue tomada en serio a tan alto nivel, aunque finalmente un amplio estudio concluyó que el LNTM debía seguir utilizándose con fines de protección radiológica, ya que «ninguna relación dosis-respuesta alternativa parece más pragmática o prudente» (NCRP, 2018: 180).

Consideramos que el éxito parcial de esa diatriba revisionista contra el LNTM revela las grandes preocupaciones de la industria nuclear por la pésima aplicación de las normativas de protección radiológica durante los sucesos de Fukushima Daiichi. Entonces salieron a relucir los procederes erróneos, malinterpretaciones e insuficiencias de los propios expertos al tratar de implementar por primera vez el criterio ALARA en un escenario postaccidental de gran envergadura (González *et al*, 2013; OECD, 2016a). Como resultado, quedaron en entredicho los lineamientos que la ICRP recomienda en su Publicación 103 para aplicar los principios de justificación, optimización y limitación a la situación de exposición de emergencia nuclear, así como a la situación de exposición existente; o sea, cuando ya se tiene que vivir en zonas contaminadas con radionucleidos artificiales tras haber ocurrido un accidente (ICRP, 2007).

Al igual que sucedió en Chernobyl, grandes poblaciones fueron obligadas a evacuarse, reasentarse o cambiar sus hábitos de vida en los territorios contaminados por las emisiones radiactivas de Fukushima Daiichi. Estas medidas se tomaron para cumplir supuestamente con el llamado «principio de precaución» (Neidell *et al*, 2019). Aunque se evitaron las víctimas por causa radiobiológica, las autoridades japonesas han reconocido que ocurrieron más de 2 000 decesos prematuros debido a las evacuaciones de emergencia (Hayakawa, 2016). A esto se suma las enormes dificultades para lograr el regreso de los damnificados a sus lugares de origen, dado que hay una gran desconfianza pública hacia la información relacionada con las dosis admisibles, sobre todo por el temor a daños futuros en la población infantil (Feldhoff, 2018). Esto ha llevado a una severa impugnación de los estándares transnacionales de protección radiológica, considerándolos demasiado vulnerables —tanto científica como políticamente— para hacer frente a los desastres nucleares (Kanetake, 2017).

A investigar las consecuencias sociales y políticas de Fukushima Daiichi se dedica el proyecto franco-japonés SHINRAI («confianza» en japonés), el cual propone un nuevo enfoque de los estudios CTS para examinar la producción de conocimiento sobre los riesgos radiológicos y su traducción en recomendaciones, políticas y decisiones gubernamentales (Fassert, 2017; Fassert y Hasegaka, 2019)<sup>24</sup>. Uno de sus temas de análisis es cómo el desacuerdo entre los propios expertos sobre las dosis permisibles se convirtió en un alto riesgo en sí mismo, al

---

<sup>24</sup>El proyecto SHINRAI comenzó en 2012 y es desarrollado por el Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire du France, en conjunto con el Tokio Institute of Technology.

acrecentar la brecha entre los discursos de «racionalidad» y «mensurabilidad», adoptados por las autoridades decisoras, y la postura ética/responsable de los habitantes afectados con respecto a las políticas de evacuación y retorno. Es así que el sentimiento «proteger a mis hijos» fue identificado como principio general que ha guiado las decisiones sobre evacuar/ regresar a un área contaminada: «Para estos padres, no se trataba de un riesgo relativo, sino de un peligro categórico: no calculable, no comparable [o sea, inconmensurable]. Varias madres entrevistadas durante el trabajo de campo, que abandonaron o no regresaron a los territorios evacuados, consideraron que esta era la única solución que imaginaron para proteger a sus hijos» (Fassert y Hasegaka, 2019: 145).

Tipificando ese conflicto como «comensurabilidad de los riesgos *versus* cuidado paterno “absoluto”», el proyecto SHINRAI hasta pone en entredicho el sentido precautorio que fundamenta la aplicación del criterio ALARA como principio de optimización, considerando que su postulado «tan bajo como sea razonablemente alcanzable» resulta éticamente insostenible para el caso de embarazadas y niños. A partir de este enfoque deontológico es descalificado rotundamente el utilitarismo de ponerle precio a la salud humana mediante el análisis coste/beneficio del riesgo radiológico sobre la base de razonamientos probabilísticos: *¿Cómo conmensurar monetariamente el riesgo de enfermar (el llamado «detrimento» de la salud) en grandes poblaciones de territorios contaminados por accidente nuclear severo, cuando existen incertidumbres irreductibles en la evaluación del riesgo radiológico (cáncer y enfermedades hereditarias)?*<sup>25</sup>

Al dar por sentado que nunca podrá descartarse totalmente la aparición de efectos estocásticos a mediano y largo plazos, incluso en generaciones aún no nacidas, el sistema internacional de protección radiológica trata de agenciárselas con los escenarios postaccidentales, pero se aboca indefectiblemente a esa problemática de la conmensurabilidad cuando intenta aplicar el criterio ALARA. Y es que, salvo el cáncer de tiroides, esos daños tardarían años en manifestarse, por lo que se solaparían con las tasas naturales de cáncer debido a las variaciones individuales en la nutrición, el estilo de vida, la susceptibilidad genética y otros posibles factores causales. En ausencia de datos empíricos confiables sobre la relación dosis-respuesta, se produce una gran incertidumbre entre tomar la decisión en sí: trasladarse temporalmente, reasentarse para siempre, o exponerse al eventual inicio de consecuencias negativas como resultado de la exposición crónica a bajas dosis de radiaciones ionizantes. Para suplir esa falta de conmensurabilidad, se trata entonces de apelar a valores subjetivos: morales, políticos, económicos... como es la proposición de incentivos de compensación monetaria a quienes se mantengan o regresen a las zonas contaminadas.

Este conflicto irreductible «ética *versus* conmensurabilidad» sería el clímax de los cambios conceptuales en la filosofía práctica de la protección radiológica desde una normativa centrada en la correlación dosis-efectos deterministas hacia una normativa que ha debido asumir la correlación dosis-efectos estocásticos (Clarke y Valentin, 2009).

---

<sup>25</sup>La filosofía práctica de la protección radiológica defiende que el principio de optimización (ALARA) cumple con la ética utilitarista acorde con el aforismo «hacer el mayor bien para el mayor número de personas» (González, 2010).

Este capítulo ofrece a continuación un panorama histórico de dichas normativas, para lo cual es preciso remontarse a los orígenes de la radiología y, en especial, de la llamada «Física sanitaria» (*Health Physics*) como la ciencia aplicada que comenzó a combinar los saberes de la radiofísica y la radiobiología durante el proyecto Manhattan. Para ello se establece una división en tres etapas con arreglo a los cambios en la noción de dosis admisible: etapa de la «dosis de tolerancia» (desde 1928 a 1954); etapa de la «máxima dosis permisible» (desde 1954 hasta 1977), y la etapa del Sistema de Limitación de Dosis (desde 1977 hasta la actualidad). Consideramos que esta tercera etapa debe, a su vez, dividirse en antes y después de la catástrofe de Chernobyl, atendiendo a cuán importantes fueron los juicios de valor (subjetivos) en la evaluación de sus consecuencias radiológicas, tal y como viene ocurriendo frente a los nuevos desafíos planteados por Fukushima Daiichi.

En general puede afirmarse que la progresiva reducción de los valores numéricos de la dosis admisible ha obedecido al reconocimiento gradual de las grandes incertidumbres científicas («incertidumbres dosimétricas», entre otras) al tratar de evaluar el riesgo radiológico por exposición a bajas dosis/tasas de dosis. Por la gran importancia de las magnitudes radiológicas y sus unidades de medida, aunque sea un tema sumamente árido, seremos bastante exhaustivos para tratar de esclarecerlas hasta llegar a las *magnitudes limitadoras* y *magnitudes operacionales* actualmente en uso, según las recomendaciones dadas por la ICRP en la Publicación 103 (ICRP, 2007), cuyos antecedentes son la Publicación 26 (1977) y la Publicación 60 (ICRP, 1991).

Precisamente una de las grandes complejidades de la protección radiológica consiste en que, a lo largo de su evolución, se han empleado diferentes magnitudes (radiométricas, dosimétricas, limitadoras y operacionales), así como distintas unidades de medida, cuya armonización ya es de por sí motivo de discusión científica. En especial, han surgido dificultades cada vez que se definió una nueva magnitud radiológica o fue transformada, además de los engorros añadidos por el paso de las unidades de medida desde el Sistema Convencional (SC) al Sistema Internacional (SI) en 1977. Al aplicarlas en diferentes contextos para evaluar el riesgo, no pocas veces existen discrepancias y hasta confusión entre los propios radioproteccionistas (Mattsson y Hoesche, 2013). De ahí que esta problemática dosimétrica resulte ineludible al abordar la evolución de la protección radiológica con arreglo a los cambios conceptuales en la definición de dosis admisible.

Nuestro recuento historiográfico se propone evidenciar que existen profundas razones por las cuales el Sistema de Limitación de Dosis y su principio de optimización (ALARA) seguirán vigentes como filosofía práctica de la protección radiológica con arreglo al modelo lineal sin umbral (LNTM). Si bien este modelo se originó como un constructo probabilístico basado en la estadística epidemiológica del cáncer radioinducido en los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki, sostenemos que su verdadera finalidad ha sido acompañar como constructo sociopolítico a la proliferación de la energía nuclear (militar y civil). Con este cometido es que los juicios de valor siempre han estado implícitos durante el proceso de inferencia probabilística del riesgo de efectos estocásticos. Esto se hace ostensible cuando

se analiza en plan diacrónico la evolución de los diferentes criterios de dosis admisible y la reducción sostenida de sus valores límites por la ICRP a lo largo de la historia.

Luego del enorme impacto social de Chernobyl y Fukushima Daiichi, resulta más notorio que la función del LNTM ha radicado siempre en tratar de propiciar la connivencia entre la experticia científica y los grupos políticos para la toma de decisiones. Y aunque el criterio ALARA no fue previsto para situaciones postaccidentales o catastróficas —de ahí su rotundo fracaso al ser aplicado en estos casos—, su pretensión de servir al «principio de precaución» puede ser enarbolada como argumento político en condiciones de incertidumbre radical. No sucede así con los demás modelos concurrentes de las curvas dosis-respuesta como el hormético y supralineal, cuya implementación provocaría inevitablemente una colisión entre las posiciones extremas a favor y en contra de la energética nuclear.

### 3.2/ Etapa de la «dosis de tolerancia» (desde 1928 hasta 1954)

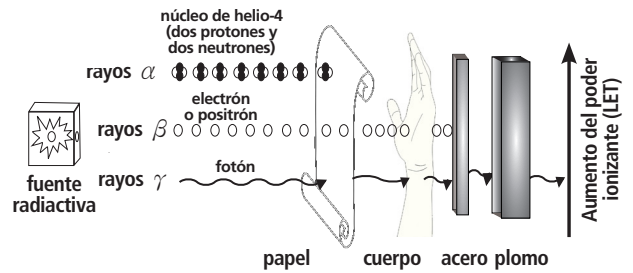
Durante el primer tercio del siglo XX, la percepción dominante de los radionucleidos fue su carácter inocuo, ya que primaba el empleo exitoso de los rayos X y emisiones del radio con fines terapéuticos, sobre todo para eliminar células tumorales. Aun así, las tempranas evidencias sobre sus también efectos perjudiciales en médicos y científicos obligaron a que estos mismos se interesaran por los peligros asociados a su utilización (Lindell, 1999; Schlich, 2015). Dado que las radiaciones ionizantes no son perceptibles por los cinco sentidos (vista, gusto, tacto, olfato, oído), debieron desarrollarse magnitudes radiométricas y dosimétricas que permitieran cuantificar el grado de exposición a las mismas para delimitar las dosis a partir de las cuales eran ostensibles clínicamente sus efectos negativos sobre los órganos y tejidos humanos (ver infografía 11).

Las primeras orientaciones de protección radiológica se circunscribieron a definir los casos típicos de uso inadecuado de las fuentes radiactivas por el personal médico, pues no existía un consenso en torno a cómo debían ser las magnitudes radiológicas y, por tanto, no podían establecerse límites de dosis. Sin embargo, el empleo masivo de las radiografías durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918) disparó la incidencia de tumores cancerígenos entre los propios operadores de los tubos de rayos X, sobre todo en dedos y manos, así como los casos de anemia aplásica, la enfermedad que mataría a Marie Curie (1867-1934). A medida que los pioneros de la radiología sufrían afecciones o morían prematuramente, los científicos comprendieron esa inevitable dualidad: los nuevos descubrimientos que podían contribuir a salvar la vida humana también podían destruirla. A ello se añadió el uso indiscriminado del radio en sectores industriales para la decoración de esferas y manecillas de relojes con pinturas luminiscentes. Al mojar los pinceles con sus labios y lengua, las trabajadoras de una fábrica en Orange, Nueva Jersey, desarrollaron cáncer, malformaciones y necrosis, particularmente en la mandíbula. Llevado a los tribunales, ese caso de las «chicas del radio» (*Radium Girls*) alertó sobre la peligrosidad de las sustancias radiactivas (Lindell, 1999).

Desde mediados de la década de 1920, se acrecientan los esfuerzos para desarrollar métodos de medición, establecer límites de exposición y proponer normas de protección

**D**ado que las radiaciones ionizantes no son perceptibles por los sentidos, debieron crearse instrumentos y métodos que permitieran cuantificarlas para evitar sus daños. La inferencia de la «dosis admisible» exigió establecer una correlación entre la actividad radiactiva y las magnitudes dosimétricas de exposición y de absorción hasta poder evaluar el efecto biológico producido por cada tipo de radiación. Desarrolladas durante el Proyecto Manhattan por la «Física sanitaria» (Health Physics), las bases del actual sistema de protección radiológica quedaron establecidas al entronizarse el enfoque energético de la «dosis absorbida» como magnitud física mensurable, a la que se aplicó el factor de eficacia biológica relativa (RBE, del inglés Relative Biological Effectiveness). Aquí se exponen algunas de las primeras nociones básicas que ilustran la cuantificación energética de las radiaciones ionizantes.

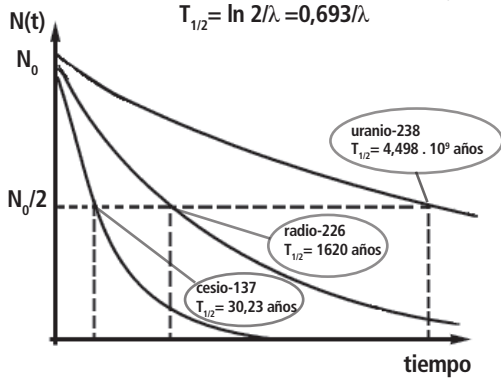
### NATURALEZA Y PENETRACIÓN DE LAS RADIACIONES IONIZANTES



La penetración de las radiaciones ionizantes depende de su transferencia lineal de energía (LET). Al tener un mayor poder ionizante (alta LET), los rayos  $\alpha$  invierten rápidamente su gran energía, por lo que apenas penetran en la materia (unos 5 cm en el aire) y pueden ser detenidos por una hoja de papel. Por ser de baja LET, los rayos  $\beta$  y  $\gamma$  son más penetrantes y se requiere barreras de acero, plomo y concreto para atenuarlos. Pero de ser inhalados o digeridos, los emisores de rayos  $\alpha$  causan mayor efecto biológico.

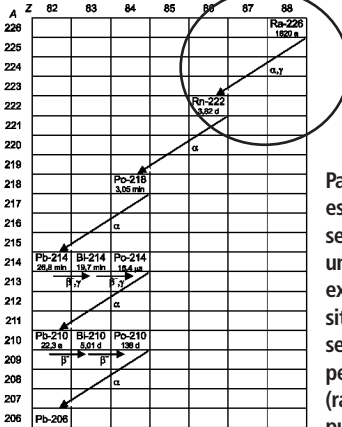
### LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Actividad  $A(t) = |dN/dt| = \lambda \times N(t)$ ;  $N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}$   
 $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$



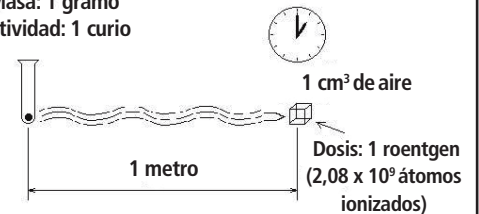
La actividad (A) es el número de desintegraciones de un radiosótomo por unidad de tiempo y suele expresarse en términos de semivida ( $T_{1/2}$ ): el tiempo necesario para que su cantidad inicial se reduzca a la mitad.

### Cadena de desintegración radiactiva del radio-226 ( $T_{1/2} = 1620$ años)



Radio 226  
Masa: 1 gramo  
Actividad: 1 curio

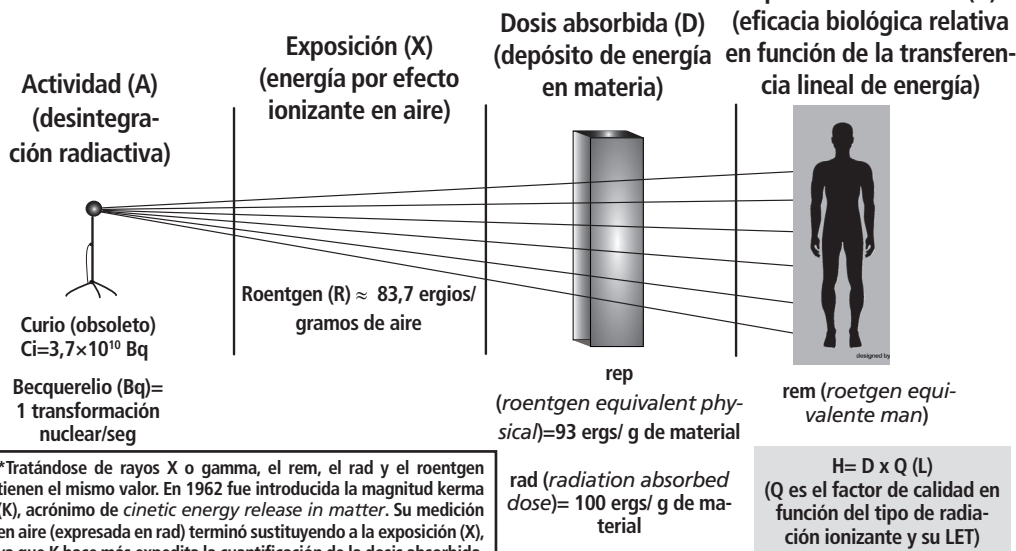
Tiempo de exposición: 1 hora



### ACTIVIDAD Y DOSIS DE EXPOSICIÓN

Partiendo de que la actividad de un gramo de radio-226 es igual a 1 curio ( $37 \times 10^9$  desintegraciones nucleares por segundo), fue introducido el roentgen (R) como primera unidad para medir la dosis recibida durante una hora de exposición a una fuente radiactiva de ese tipo y peso, situada a un metro de distancia. Más tarde esa magnitud se llamó «dosis de exposición» o «exposición», ya que solo permite cuantificar cuánta radiación electromagnética (rayos X o gamma) incide sobre el cuerpo humano en un punto, midiendo la ionización provocada en 1 cm<sup>3</sup> de aire colindante (1 R es igual a  $2,08 \times 10^9$  átomos ionizados).

### CUANTIFICACIÓN ENERGÉTICA DE LAS RADIACIONES IONIZANTES (Magnitudes y unidades adoptadas por la ICRP entre 1953 y 1962)\*



\*Tratándose de rayos X o gamma, el rem, el rad y el roentgen tienen el mismo valor. En 1962 fue introducida la magnitud kerma (K), acrónimo de *kinetic energy release in matter*. Su medición en aire (expresada en rad) terminó sustituyendo a la exposición (X), ya que K hace más expedita la cuantificación de la dosis absorbida.

La «dosis absorbida» es la magnitud dosimétrica que, mensurable físicamente, vincula la actividad, la exposición y la absorción de energía por la materia (animada o inerte.) Sin embargo, una misma dosis absorbida provoca diferentes daños en dependencia de cuál sea el tipo de radiación y su capacidad ionizante al atravesar el tejido vivo. Constatada empíricamente, esta propiedad fue denominada Eficacia Biológica Relativa (RBE, en inglés), expresándola mediante el factor de calidad (Q) como función de la Transferencia Lineal de Energía (L o LET).



para el trabajo con rayos X y otros preparados radiactivos. Durante el Primer Congreso Internacional de Radiología, celebrado en Londres, Reino Unido, en 1925, se crea el International X-Ray Unit Committee (IXRUC). Tres años más tarde, en 1928, durante el Segundo Congreso Internacional de Radiología, celebrado en Estocolmo, Suecia, es creado el International X-Ray and Radium Protection Committee (IXRPC)<sup>26</sup>. A falta de un sistema conveniado de magnitudes y unidades de medida, los radiólogos trabajaban basándose en la experiencia clínica, teniendo a la reacción cutánea como única guía para limitar la exposición. Como referente se usaba la «dosis umbral eritematosa» (DUE) por ser la dosis recibida de rayos X para la cual aparecía un enrojecimiento de la piel. Sobre esa base fue instaurada la «dosis de tolerancia» (*tolerance dose*), máxima cantidad de radiación que pudiera soportarse sin desarrollar un eritema como síntoma clínico. El valor recomendado fue 0,01 DUE por mes (0,1 DUE/ año) como nivel relativamente «seguro» para el personal médico expuesto a radiaciones externas, teniendo en cuenta no solo los daños tisulares, sino las posibles afectaciones de órganos internos y los cambios en la sangre (Clarke y Valentin, 2009).

Adoptado el roentgen (R) en 1928 como primera unidad de medida radiológica por el IXRUC, no fue hasta 1934 que la dosis de tolerancia fue expresada por el IXRPC como 0, 2 R al día. En principio se había definido que 1 R era la dosis recibida durante una hora a una distancia de un metro con respecto a una fuente de radio-226 con una masa de un gramo, cuya actividad es un curio. Esta unidad de medida fue enmendada en 1937, asumiéndose el roentgen como la capacidad que tiene un haz de rayos X o de rayos gamma para generar determinada carga eléctrica en un centímetro cúbico de aire. Así, midiendo la ionización en un punto del espacio, puede inferirse aproximadamente cuánta radiación incide sobre el cuerpo humano. Esta magnitud sería luego llamada «dosis de exposición» o «exposición», cuando comenzó a mensurarse no solo cuánta radiación incide sobre la materia, sino cuánta de su energía impartida es absorbida por unidad de masa en el órgano o tejido. Este enfoque energético de «dosis absorbida», vigente hasta hoy día, surgió como resultado de los conocimientos aplicados durante el Proyecto Manhattan (Walker, 2000b).

La complicada tarea de construir la bomba atómica y tener miles de personas trabajando en estrecha proximidad con altos niveles de radiactividad y nuevos radioisótopos artificiales como el plutonio exigió una revolución en todos los aspectos de la protección radiológica. Con ese objetivo fue creada la Health Division por Arthur Compton, director del Metallurgical Laboratory (Met Lab) en la Universidad de Chicago. A cargo del radiólogo Robert S. Stone, esa división agrupó a científicos como el físico británico Herbert M. Parke y el biólogo estadounidense Raymond E. Zirkle, quienes tuvieron a su cargo desarrollar un grupo de medidas que sentaron las bases de la llamada «Física sanitaria» (Health Physics).

Además de ser responsables del diseño de una nueva generación de instrumentos y métodos radiométricos, ellos tuvieron que superar el obstáculo principal que habían enfrentado los radiólogos en las décadas anteriores: cómo establecer una forma de relacionar la exposición

---

<sup>26</sup>En 1950 el IXRPC y el IXRUC fueron red denominados como International Commission on Radiological Protection (ICRP) e International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), respectivamente.

a las radiaciones ionizantes de una fuente externa, medidas por su ionización del aire en roentgen, con el efecto biológico que provocarían al atravesar el cuerpo humano, siendo este un medio no uniforme, con variedad de estructuras biológicamente significativas (Hacker, 1987). Por demás, el roentgen sirve solamente para cuantificar la exposición a las radiaciones electromagnéticas o fotones (rayos X y rayos gamma), mientras que los trabajadores del proyecto Manhattan estaban también expuestos a radiaciones ionizantes corpusculares: partículas alfa, partículas beta, neutrones..., cuya peligrosidad estaba por comprobar.

A fin de protegerlos de los efectos acumulativos de todos esos tipos de radiación se necesitaba un nuevo método para cuantificar las dosis permisibles y un sistema de magnitudes y unidades que tuviera en cuenta esa exposición múltiple. Parker solucionó este problema introduciendo el «roentgen equivalente físico» (rep) para medir la energía impartida por unidad de masa a otros materiales distintos del aire, concretamente al tejido vivo (Cantril y Parker, 1945). Paralelamente, experimentando con organismos, fue determinado el factor de «eficacia biológica relativa» (RBE, del inglés Relative Biological Effectiveness). Este no solo depende de cuánta sea la energía impartida, sino también de la densidad de ionización con que cada tipo de partícula transfiere dicha energía a lo largo de su trayectoria en el tejido vivo. Esta propiedad fue acuñada por Zirkle como «transferencia lineal de energía» (LET, de Linear Energy Transfer), tras comprobar que los neutrones producían mayores efectos biológicos que los rayos X (Zirkle, 1940). Al producto de la dosis absorbida por el RBE se le llamó «dosis RBE en rem» (más tarde, en 1962, redefinida como «equivalente de dosis»), cuya unidad de medida fue denominada rem (*roentgens equivalent man*); en ruso: *ber*, de *biologuicheski ekivalent rentguena* (equivalente biológico del roentgen). Así, 1 rem o ber corresponde a una irradiación por cualquier tipo y cantidad de radiación ionizante, si esta produce el mismo efecto biológico que una dosis de 1 R por rayos X o rayos gamma.

Los métodos desarrollados por físicos y biólogos durante el proyecto Manhattan son el fundamento del actual protección radiológica, basado en la noción energética de «dosis absorbida» como su magnitud física fundamental, medible en la práctica, además de tener en cuenta las propiedades de los distintos tipos de radiaciones ionizantes. También entonces se prestó atención a la «radiosensibilidad» (*radiosensitivity*), reconociéndola como «la vulnerabilidad relativa a la radiación de los tejidos vivos en su natural ambiente fisiológico» (Cantril y Parker, 1945: 8). Este último aspecto exigía profundizar en el campo de la radiobiología para explicar los mecanismos a nivel celular (cromosoma y ADN) que subyacen a los efectos somáticos y mutagénicos de las radiaciones ionizantes. Aunque estos estudios habían sido emprendidos en plantas y animales, tomaron un nuevo cariz al orientarse hacia la provocación deliberada de efectos perjudiciales en los seres humanos. Si bien la literatura científica evita el tema, hay constancia de que las investigaciones del proyecto Manhattan no solo se dedicaron a la protección radiológica, sino también a emitir pronósticos sobre la magnitud del daño que causaría un bombardeo atómico, experimentando con personas. La más infame de esas pruebas secretas fue la inyección de plutonio en el organismo humano para estudiar la velocidad a la que ese radioisótopo era excretado (Malloy, 2012).

Luego de la Segunda Guerra Mundial, esos mismos científicos de la Health Division siguieron trabajando en la atmósfera de secretos y control que caracterizó a la Guerra Fría. Esto influyó de manera decisiva en que las normas de protección radiológica dependieran de las decisiones políticas para hacerse públicas (Busby y Bertell, 2003). En 1946, a la par que la Comisión de Energía Atómica (AEC), fue creado en Estados Unidos el Consejo Nacional de Protección Radiológica y Mediciones (National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP). Hay constancia de que el NCRP debió conciliar con el AEC para fijar unas dosis admisibles que no bloquearan la investigación y desarrollo de las aplicaciones de la energía nuclear, tanto civiles como militares (Caufield, 1990).

Bajo esa influencia, las magnitudes de dosis y unidades de medida desarrolladas durante el proyecto Manhattan fueron implementadas por la Comisión Internacional para la Protección Radiológica (International Commission on Radiological Protection, ICRP) y su institución hermana: la Comisión Internacional de Unidades Radiológicas y Mediciones (International Commission on Radiation Units and Measurement, ICRU), que eran el IXRPC y el IXRUC hasta que fueron red denominadas en 1950. La ICRP se convirtió en el referente internacional de la protección radiológica, mientras que la ICRU responde por la radiometría y la dosimetría. Los conceptos de «dosis absorbida» (medida en rad, en lugar de rep) y de «dosis RBE en rem» fueron adoptados de manera oficial por la ICRU en 1953 y 1956, respectivamente<sup>27</sup>.

La idea de la *tolerance dose* continuó y, en 1951, fue propuesto por la ICRP un límite de 0,3 R a la semana que se mantuvo hasta 1954 (ICRP, 2007). Desde sus inicios como «dosis umbral eritematosa», esta dosis admisible se había basado en los dos criterios siguientes:

- 1) existía un umbral seguro, y solo por encima de este se producían efectos somáticos;
- 2) si no se había alcanzado ese umbral, la recuperación de los efectos de la radiación era posible y no habría efectos a largo plazo.

### 3.3/ Etapa de la «máxima dosis permisible» (desde 1954 hasta 1977)

Durante la década de los años 50, la dosis de tolerancia fue cayendo en descrédito debido a la evidencia de un exceso de enfermedades malignas entre los propios radiólogos norteamericanos, así como por la confirmación de un aumento de los casos de leucemia entre los sobrevivientes japoneses de los bombardeos atómicos de Hiroshima y Nagasaki (ICRP, 2007). Aunque escaparon a la muerte, estas personas estuvieron expuestos a altas dosis de irradiación externa (rayos gamma y neutrones) en dependencia de cuán distantes estaban del epicentro de las explosiones y de cuáles medios de protección los amparaban, como haber estado dentro de una edificación sólida. El gobierno japonés había efectuado un censo nacional en 1950 que incluía una encuesta complementaria para identificar a esos damnificados, muchos de los cuales se mantenían ocultos por temor a ser estigmatizados. Por esa vía fueron identificados alrededor de 280 000 sobrevivientes en todo Japón, la mayoría todavía residiendo en aquellas dos ciudades (Douple *et al*, 2011). A partir de entonces

<sup>27</sup>Tratándose de rayos X o gamma, el rem, el rad y el roentgen tienen un mismo valor.

comenzó a llamárseles *hibakusha*, que quiere decir literalmente en japonés «persona afectada por las bombas atómicas», aunque su significado como categoría médica, legal y social ha ido variando a lo largo de los años (Naono, 2019).

Aun cuando inmediatamente después de los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki se había creado una comisión conjunta de médicos japoneses y estadounidenses para evaluar sus consecuencias radiológicas, no fue hasta que el presidente Harry Truman emitió una directiva que esos estudios cobraron impulso como una tarea asignada a la National Academy of Science de los Estados Unidos y a la Comisión para las Víctimas de la Bomba Atómica (Atomic Bomb Casualty Commission, ABCC). Esta última fue creada en Japón en 1947 y, a partir de 1975, devino la actual Fundación para la Investigación sobre los Efectos de la Radiación (Radiation Effects Research Foundation, RERF), al afianzarse la cooperación entre los investigadores de ambos países en el desarrollo del Life Span Study (LSS).

Este estudio de cohorte se puso en marcha en 1955, luego de que una comisión especial —conocida como el Comité Francis— evaluó las distintas investigaciones llevadas a cabo por la ABCC y, para ordenarlas, recomendó desarrollar un programa de estudios que fuese único y centralizado, segmentando a los sobrevivientes por el estimado de dosis recibida y los efectos observados sobre su salud desde 1950; o sea, a partir de cinco años después de los bombardeos atómicos (Ozasa *et al*, 2018). Para ese momento, ya existía una mayor disposición gubernamental de proporcionar asistencia médica y legal a los *hibakusha*. A ello había contribuido decisivamente la tragedia del buque atunero japonés *Lucky Dragon* en 1954, cuando sus tripulantes enfermaron del síndrome de irradiación aguda debido a la lluvia radiactiva que siguió a la detonación del dispositivo termonuclear *Castle Bravo* en el Atolón Bikini (Naono, 2019).

Junto al rechazo mundial a las pruebas nucleares y la concienciación de sus efectos negativos, paralelamente comenzaban a desarrollarse los programas para el uso civil de la energía atómica, incluso en el propio Japón, que contaba con amplio respaldo estadounidense para llevar adelante esos planes. Ambas facetas de la proliferación nuclear (militar y civil) obligaron a plantearse seriamente el tema de la protección radiológica para calmar la ansiedad pública sobre el peligro que representaría el aumento de la radiación artificialmente inducida a escala planetaria. A raíz de celebrarse en 1955 la Primera Conferencia Internacional Átomos para la Paz en Ginebra, fue creado el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR). Su primer informe data de 1958 y estableció las bases científicas sobre las que se negoció el Tratado de Prohibición de los Ensayos Nucleares en la Atmósfera, el Espacio Exterior y bajo el Agua, firmado en 1963, al año siguiente de ocurrir la Crisis de los Misiles en Cuba (ver subacápite 1. 3).

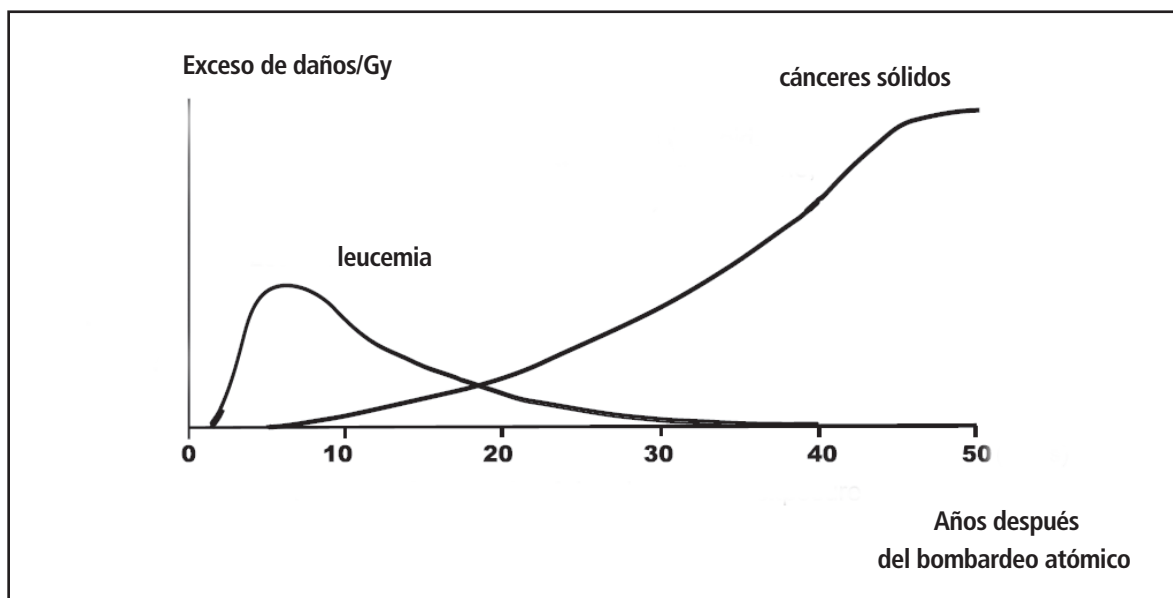
### 3.3.1/ *El Life Span Study: su fundamento epidemiológico*

Aunque las cifras han variado con el paso de los años, se afirma que el *Life Span Study* (LSS) reclutó inicialmente una muestra de 109 000 sujetos que comprendía a individuos irradiados y

testigos no expuestos. Más tarde se sumaron 2 800 niños irradiados *in utero* y 54 000 infantes que nacieron de padres expuestos y no expuestos, respectivamente (Kato y Shigematsu, 1984). Informes más recientes afirman que, desde entonces, se ha conseguido el seguimiento epidemiológico continuo de la mortalidad e incidencia de cáncer y otras enfermedades a una muestra de aproximadamente 120 000 sobrevivientes y sujetos de control, incluido un subconjunto definido que recibe vigilancia adicional de morbilidad basada en exámenes de salud bienales. Asimismo se ha mantenido la cohorte en útero (sujetos irradiados y de control) y la cohorte de hijos de padres expuestos y no expuestos (Douple *et al*, 2011). Por el origen de esa muestra y su fundamento epidemiológico, el LSS es considerado un estudio de cohorte de carácter único en la historia (Osaza *et al*, 2018).

¿De qué manera estimar la dosis recibida por cada sobreviviente?, fue el problema principal que debió plantearse el LSS. Esto implicaba reconocer las incertidumbres al determinar la ubicación y el blindaje de esas personas en el momento de ocurrir las explosiones de Hiroshima y Nagasaki, así como saber la cantidad y calidad de las radiaciones emitidas por aquellas dos armas nucleares (relación neutrones/rayos gamma). A partir de la información que las propias víctimas suministraron cuando fueron encuestadas, se decidió estimar en retrospectiva la dosis de radiación aguda que cada una pudo recibir. Para ello se desarrollaron sistemas físicos de dosimetría (DS) con carácter provisional en 1957 y 1965; de ahí su clasificación como T57D y T65D («T» indica *tentative*, y el guarismo, el año de introducción de cada sistema). Estos fueron sustituidos por otros dos sistemas más sofisticados en 1986 y 2002, conocidos como DS86 y DS02, respectivamente. Cada uno de esos cambios de método dosimétrico influyó en el procesamiento de los índices de mortalidad e incidencia de cáncer en la cohorte de sobrevivientes, al tener que remodelarse la relación dosis-respuesta en correspondencia con las nuevas estimaciones de dosis atribuida (RERF, 2016). Como veremos más adelante, resultó muy significativa la rectificación del DS86, ya que predeterminó la abrupta reducción de los límites de dosis admisible por la ICRP en su Publicación 60, justamente cuando se discutían los efectos radiológicos de Chernobyl (ver subacápite 3.3.2).

Previstas como armas de exterminio masivo, las bombas *Little Boy* (uranio-235; método de proyectil) y *Fat Man* (plutonio-239; mecanismo de implosión) fueron diseñadas para que sus masas críticas de 64,15 y 6,2 kilogramos, respectivamente, estallaran a unos 600 metros por encima de Hiroshima (6 de agosto) y a unos 503 metros sobre Nagasaki (9 de agosto). De la energía total liberada por la reacción nuclear en cadena, el 50% se expandió como onda de choque, además de generar una intensa ola de calor (35%) y altas dosis de radiación ionizante (15%). En consonancia, sus principales efectos destructivos se debieron a la velocidad supersónica del viento, que alcanzó 280 m/seg en el epicentro de las explosiones, y a la enorme temperatura de la bola de fuego (unos 7 000 °C), lográndose el objetivo militar de arrasarse con la población en unos 3,5-4 kilómetros a la redonda. Aunque las estadísticas son demasiado imprecisas, se estima que de los cerca de 360 000 residentes en Hiroshima perecieron más de 110 000. A las quemaduras y traumas —incluido el aplastamiento por derrumbes de edificios— como causas principales de muerte, se sumó el fallo intestinal y



**Figura 10: Tendencia de los excesos de leucemia y cánceres sólidos en sobrevivientes de las bombas atómicas.**  
**Fuente: Osaza et al, 2018.**

de la médula ósea por el síndrome de radiación aguda. Por similares motivos murieron más de 70 000 de los 210 000 habitantes de Nagasaki. Actualmente, se maneja que fueron unas 200 000 víctimas mortales en total como resultado directo de ambos bombardeos atómicos (Osaza et al, 2018; RERF, 2016)<sup>28</sup>.

Ese enorme efecto destructivo de ambas bombas atómicas era esperado, pero no que hubiese una gran cantidad de sobrevivientes dentro del radio de devastación. En dependencia de la distancia con respecto a los epicentros de las explosiones y cuán desprotegidos se encontraban, los *hibakusha* recibieron diferentes dosis de radiación primaria y de radiación residual. La radiación primaria (o directa) fue emitida en forma de rayos gamma y neutrones por la reacción de fisión nuclear y por los productos radiactivos dentro de la bola de fuego. Estas radiaciones se propagaron hasta el nivel del suelo, afectando a las personas en milésimas de segundos; o sea, fue una exposición tremendamente aguda para quienes se encontraban dentro del epicentro (< 2,5 km). A su vez, sufrieron una radiación residual debido a que los materiales de los edificios se activaron bajo el impacto de los neutrones y demás productos de la fisión. Estos últimos se enfriaron a medida que se elevaban junto a la bola de fuego hasta las altas capas atmosféricas y, tras condensarse, terminaron precipitándose con la lluvia que sobrevino a los bombardeos. Por contener el polvo y hollín de los incendios en la ciudad, se le llamó «lluvia negra» a esas precipitaciones. El uranio y el plutonio que no llegaron a desintegrarse se dispersaron totalmente en la atmósfera (Osaza et al, 2018; RERF, 2016).

La muestra del LSS fue distribuida por sexo, edad en el momento del bombardeo y distancia con respecto a los epicentros de las explosiones: < 2,0 km, < 2,5 km, <10 km y fuera de la ciudad (≥10 km). Según haya sido esa distancia y el blindaje, asignándoles las

<sup>28</sup>Realmente se trata de cifras muy vagas y polémicas, ya que familias enteras perecieron sin dejar a nadie que informara sobre su muerte. Los registros del personal militar en esas ciudades fueron destruidos, además de que existía un número desconocido de trabajadores forzados no identificados (RERF, 2016).

presuntas dosis recibidas con ayuda de los sistemas dosimétricos, esos sobrevivientes han sido estudiados durante unas siete décadas en prospectiva para determinar la evolución de sus tasas de incidencia y de mortalidad por leucemia y cánceres sólidos, así como por otras enfermedades. Sobre la base de comparaciones grupales, estos resultados epidemiológicos se expresan en términos de ciertas magnitudes —como el exceso de riesgo relativo (Excess Relative Risk) por unidad de dosis en Gy— que indican cuánto más riesgo de contraer esas dolencias han tenido los *hibakushas*, comparándolos con los miembros de los grupos de control: aquellos sujetos con características similares, pero no irradiados.

El aumento de leucemia entre dichos sobrevivientes ya era ostensible a los dos años de haber ocurrido los bombardeos atómicos, si bien su seguimiento como cohorte se inició a partir de 1950. El pico máximo de esa dolencia se produjo entre seis y ocho años después de la exposición (1951-1953), y luego declinó gradualmente, pero no hasta cero, ya que han seguido reportándose casos atribuibles a la radiación. Este exceso de riesgo relativo para la leucemia fue mayor entre las personas expuestas cuando eran niños, aunque su pico decayó más rápidamente que para el resto de los supervivientes (Ozasa *et al*, 2018). Por otra parte, el aumento de cánceres sólidos se hizo sentir a los diez años de la tragedia y hasta hoy día continúa siendo elevado. Esto hace indicar que este riesgo tardío se ha mantenido durante toda la vida para los *hibakushas*, a diferencia de la leucemia, que comenzó a decrecer pasados los años (ver figura 10). En general, casi la mitad de los fallecidos por leucemia y cerca del 10% de los decesos por cánceres sólidos son atribuibles a la exposición a la radiación. En 2014 todavía vivía el 29 % de la población del Life Span Study, incluido el 77% de los individuos que habían sido expuestos cuando tenían menos de diez años de edad (RERF, 2016).

Desde el primer momento de haberse comprobado una cierta relación de proporcionalidad entre la magnitud de las altas dosis recibidas y la aparición de la leucemia en los supervivientes de los bombardeos atómicos, la ICRP y el NCRP decidieron extrapolar linealmente esa misma relación dosis-respuesta hasta el dominio de las bajas dosis, cuando estas apenas superan el fondo natural. De esta forma se infirió que toda exposición a la radiación artificial inducida, por mínima que sea la dosis recibida, puede producir efectos aleatorios en un futuro, si bien su severidad no depende de la magnitud de dicha dosis. Aunque desde un inicio fue objeto de grandes reparos, este modelo lineal sin umbral (LNTM) resultó elegido por su simplicidad matemática y carácter conservador. Su asimilación por el NCRP en 1954 hizo que perdiera todo sentido la noción de «dosis de tolerancia», ya que esta se había basado en la existencia de un umbral seguro. En su lugar fue introducido el concepto de «dosis máxima permisible» (Maximum Permissible Dose, MPD), definiéndolo así:

(...) es la dosis de irradiación ionizante que, según los conocimientos actuales, es de esperar que no produzca una lesión corporal apreciable a una persona en algún momento de su vida. Tal y como se emplea aquí, 'lesión corporal apreciable' significa toda lesión o efecto corporal que una persona considere por término medio inaceptable o que las autoridades competentes consideren perjudicial para la salud y el bienestar del individuo (NCRP, 1954).

Esta nueva concepción dejaba en suspenso la cuestión de dirimir qué puede considerarse una lesión «apreciable» o «inaceptable» para una persona, así como hasta qué punto podría saberse que el efecto perjudicial «en algún momento de su vida» es causado por la exposición a la radiactividad, y no por la influencia de otros factores. No obstante, representó el inicio del cambio en la filosofía práctica de la protección radiológica, ya que se asumía la existencia de efectos tardíos a partir de los resultados epidemiológicos del LSS. A estos se uniría la exhumación de los experimentos del genetista y biólogo estadounidense Hermann Muller, cuya influencia fue decisiva para la adopción del LNTM, cuando expresó en conferencia con motivo de recibir el Premio Nobel de Medicina en 1946: «No hay escapatoria a la conclusión de que no existe una dosis umbral» (Muller, 1966; citado en Calabrese, 2012).

### 3.3.2/ Posibilidad de efectos genéticos heredables

Tras haberse comprobado fehacientemente el exceso de leucemia entre los *hibakushas*, incluidos niños, aumentó la preocupación sobre cómo la radiación de las bombas atómicas pudo afectar a las mujeres que estaban embarazadas y a sus fetos en gestación (*in utero*). Aparte del cáncer radioinducido, que se entiende como resultado de un daño celular somático, se acrecentó el temor de que el daño a las células germinales (mutaciones y aberraciones cromosómicas) pudiera ser comunicado a la descendencia que tuvieran los sobrevivientes en un futuro. El riesgo de efectos genéticos heredables se convirtió en motivo de reflexión para médicos, biólogos y genetistas. A fundamentar científicamente esos resquemores contribuyó la renovada atención a los experimentos efectuados en 1927 por Muller, quien había demostrado la posibilidad de efectos mutagénicos debido a las radiaciones ionizantes, irradiando con rayos X a la mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*). Extendidos a otras plantas, insectos y animales, esos estudios corroboraron que la mutagenicidad era genérica e independiente de la especie, por lo que podía afectar también a los seres humanos. A tenor con la teoría del blanco, tales daños genéticos se producirían a cualquier tasa de dosis, incluso por un solo impacto radiactivo. Podría suceder, incluso, que los recién nacidos tuvieran anomalías físicas como consecuencia de la exposición a las radiaciones de sus padres o abuelos.

Basándose en los estudios de Muller y otras investigaciones, el Consejo Británico de Investigaciones Médicas y, luego, el Comité sobre los Efectos Biológicos de la Radiación Ionizante (BEIR por sus siglas en inglés) de la Academia de Ciencias de Estados Unidos alertaron en 1956 sobre los posibles efectos genéticos de las radiaciones en los seres humanos debido a las precipitaciones radiactivas de los ensayos nucleares (Kathren, 2012). Tales dictámenes científicos condujeron a la reducción abrupta por el NCRP de las máximas dosis permisibles para los llamados «órganos críticos» como las gónadas (ovarios y testículos), tanto para los trabajadores expuestos profesionalmente (5 rem/año), así como para la población en general: 0,5 rem/año (Taylor, 1980)<sup>29</sup>. Estos mismos valores fueron asumidos por la ICRP en sus primeras recomendaciones básicas: Publicación 1 (1959) y Publicación 6 (1964).

<sup>29</sup>Como 1 rem = 0,01 Sv = 1 cSv= 10 mSv, esas dosis máximas permisibles serían 50 mSv y 5 mSv al año, respectivamente.



La «dosis RBE en rem» fue reemplazada en 1962 por el *dose equivalent* (equivalente de dosis), manteniendo el rem como unidad de medida<sup>30</sup>. Para ello se introdujo el factor de calidad Q, teniendo en cuenta el Efecto Biológico Relativo (REB) de las distintas radiaciones en función de su capacidad de ionización o transferencia lineal de energía (LET, en inglés). Así, las radiaciones de alta LET (neutrones, partículas alfa, iones pesados) tienen mayor REB que las de baja LET (fotones y partículas beta). También fue introducida la magnitud física kerma (K), acrónimo de *kinetic energy release in matter*, en el sentido de que mide la energía cinética transferida a la materia por las partículas ionizantes cargadas (electrones) que se liberan como resultado de la acción de las partículas ionizantes no cargadas (fotones y neutrones). La «dosis de exposición» en roentgen fue renombrada «exposición» (X), conviviendo con el «kerma en aire» (medido en rad), hasta que este último terminó imponiéndose por hacer más expedita la conversión para cuantificar la dosis absorbida de las radiaciones gamma y neutrónica (Brosed, 2011).

Los datos provenientes de los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki han arrojado que la irradiación aguda a dosis altas y moderadas tiene un efecto despreciable sobre la salud de las generaciones subsiguientes (hijos y nietos). Tampoco otras experiencias han identificado anomalías físicas en recién nacidos que puedan relacionarse con la irradiación de las gónadas de sus padres antes de la concepción (UNSCEAR, 2012). Sin embargo, los experimentos con otros mamíferos —especialmente con ratones— sugieren que tales efectos genéticos heredables sí ocurren, pudiendo variar desde lo indetectablemente trivial hasta enormes malformaciones y pérdidas de funciones, incluida la muerte prematura. Estos alarmantes resultados llevaron a la sobreestimación de los descubrimientos de Muller, cuando existía una necesidad imperiosa de renovar el sistema internacional de protección radiológica, dado que ya habían sido reconocidos los efectos estocásticos (somáticos y hereditarios). Al ser defensores a ultranza de la hormesis, los detractores más fervientes del LNTM se han enfocado en desacreditar a ese genetista y biólogo, arguyendo que ignoró con toda intención otros estudios que rebatían sus experimentos de la mosca, además de haber influido políticamente sobre el BEIR y demás círculos científicos para que dicho modelo lineal sin umbral fuera adoptado (Calabrese, 2012, 2015; Calabrese y O'Connor, 2014).

A partir de 1965, la ICRP comenzó a aplicar el LNTM, según el cual la exposición a las radiaciones ionizantes debe mantenerse tan baja como sea «razonablemente posible» con respecto a las máximas dosis permisibles; o sea, el criterio ALARA (Fry, 1982). Esta decisión no eliminó, sino que intensificó la conjetura entre los científicos opuestos al LNTM de que podría existir un límite por debajo del cual no hubiera consecuencias negativas sobre el ser humano, aunque superara el fondo radiactivo natural. Pero, ¿cómo probarlo, si no habían evidencias epidemiológicas sobre la exposición crónica a bajas dosis/tasas de dosis? El carácter dilemático de las radiaciones ionizantes fue reconocido por uno de los jefes de la ICRP en estos términos: «Pero lo que constituye nuestro dilema es precisamente

---

<sup>30</sup>Esa magnitud básica fue traducida confusamente al español como «dosis equivalente», cuando en realidad debía haber sido «equivalente de dosis», tal como se tradujo a partir de 1977 (Brosed, 2011). Y lo mismo sucedió en ruso.

esta imposibilidad de detectar todo efecto nocivo en los seres humanos, acompañada de cierta vacilación en afirmar que no existe ningún efecto en absoluto. ¿Cómo demostrar empíricamente algo que es negativo?» (Taylor, 1980: 21).

Al reconocer tácitamente que los conocimientos científicos son insuficientes por falta de evidencia empírica, admitiendo que los juicios de valor o discernimiento subjetivo serán siempre necesarios, la ICRP fue adoptando una posición cautelosa hasta declarar oficialmente la adopción del modelo lineal sin umbral (LNTM). Sus presupuestos básicos son:

- 1) existe una relación lineal dosis-efecto para cualquier dosis comprendida entre un determinado valor y el fondo radiactivo natural;
- 2) la dosis de radiación no tiene un umbral por encima del cual se manifiesta un efecto, y por debajo, no. O sea, siempre habrá un efecto probable;
- 3) todas las dosis administradas a un órgano se pueden sumar íntegramente, sin tener en cuenta la tasa ni los intervalos a que se administren. O sea, la radiación recibida es acumulativa;
- 4) no hay ninguna posibilidad de reversión de los efectos de las bajas dosis, sean cuales fueren, una vez que se han manifestado (Taylor, 1980).

#### 3.4/ Etapa del Sistema de Limitación de Dosis (desde 1977 hasta la actualidad)

La adopción del LNTM a nivel internacional quedó consumada oficialmente cuando la ICRP descartó en 1977 el concepto de «máxima dosis permisible» y, en su Publicación 26, por primera vez dejó establecida la diferenciación entre *efectos estocásticos* y *efectos no estocásticos* (ICRP, 1977). Estos últimos fueron reconceptualizados como *efectos deterministas* cuando, después de los sucesos de Chernobyl, aparecieron las recomendaciones de 1990 como Publicación 60 (ICRP, 1991). Así también se les denomina en la Publicación 103, si bien ya se reconocen como *reacciones tisulares nocivas* (ICRP, 2007). Respondiendo a esa clasificación convencional (efectos no estocásticos y efectos estocásticos), desde 1977 hasta la actualidad se ha aplicado el Sistema de Limitación de Dosis, según el cual las dosis admisibles son deducidas con arreglo a la *inferencia causal* que pueda —o no— probarse entre el nivel de exposición y la atribución del daño para la salud: enfermedad o muerte.

Mientras que para las reacciones tisulares de carácter severo (síndrome agudo, por ejemplo) es posible conocer la *inferencia causal*, identificando los valores del umbral de dosis absorbida mediante el diagnóstico clínico de radiopatologías en individuos, resulta imposible hacer lo mismo para los efectos estocásticos. Su propio carácter aleatorio impide atribuirlos de manera inequívoca al resultado de la exposición crónica a dosis ínfimas de apenas unos miligray por encima del fondo natural. Salvo casos excepcionales como el cáncer de tiroides en niños (UNSCEAR, 2012), se considera muy difícil obtener datos epidemiológicos que corroboren los efectos radioinducidos a bajas dosis, pues la mayoría de estos se desarrollaría asintóticamente durante un período de latencia comparable a la expectativa de la vida humana. Asimismo, es preciso descartar otros factores que provocarían el mismo tipo de daños. Sucede con el cáncer de pulmón, cuya alta frecuencia entre fumadores es inobjetable y, por ende, hay que identificar ese hábito como uno de los factores confusores (*confounding*

*factors*) en la investigación radioepidemiológica sobre la aparición de esa enfermedad —por ejemplo— entre trabajadores de la rama nuclear debido a la exposición interna a emisores alfa como el plutonio y el uranio (Grellier *et al*, 2017).

Estas dificultades para dilucidar la causalidad de los efectos estocásticos se enfocan en términos de «análisis contrafáctico»: ¿Se habrían producido esos mismos daños sobre la salud, aunque la exposición a la radiación ionizante no hubiera ocurrido? (UNSCEAR, 2012). Al no contarse con una respuesta satisfactoria en la mayoría de los casos estudiados, los límites de dosis para minimizar la posible aparición de esos efectos aleatorios son establecidos desde 1977 por la ICRP con arreglo a la *inferencia probabilística de riesgos*, combinando técnicas estadísticas (estimación bernoulliana de frecuencia) y la interpretación subjetiva (método bayesiano) (ICRP, 1977; UNSCEAR, 2012; González, 2014). Con ese objetivo, suponiendo una proporcionalidad directa entre la magnitud de la exposición y la posible ocurrencia de efectos estocásticos —o sea, aplicando el LNTM—, son extrapolados los resultados del Life Span Study hacia el rango de las bajas dosis (menores de 100 mSv). Para ello se asume que este estudio de cohorte sí ha atestado con suficiente rigor estadístico la ocurrencia de efectos estocásticos tardíos, comprobándose inobjetablemente el incremento de leucemia y cánceres sólidos en los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki que estuvieron expuestos a altas y medianas dosis de irradiación aguda (gamma y, en menor medida, neutrones). Sin embargo, al no tener en cuenta la radiación interna como un factor muy importante, los resultados del LSS también han sido cuestionados científicamente (Kanetake, 2017).

Los datos epidemiológicos del LSS terminan siendo ajustados controversialmente durante su extrapolación al rango de bajas dosis. Tal es así que son reducidos por el llamado «factor de eficacia de dosis y tasa de dosis admisibles» (DDREF, del inglés Dose and Dose Rate Effective Factor), cuyo valor numérico DREF=2 se mantiene por la ICRP desde la Publicación 60 (ICRP, 1991). Este factor empírico es motivo de disputas entre radioepidemiólogos y radiobiólogos ya que no existe un consenso sobre cuál es la relación dosis-efecto cuando varían las tasas de dosis (dosis recibida por unidad de tiempo). Experimentos con animales de laboratorio (roedores) han diferido antagónicamente al tratar de evaluar si, durante una exposición prolongada a bajas dosis, el riesgo de efectos estocásticos es menor, igual o mayor en comparación con una irradiación aguda similar a la que recibieron los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki (Rühm *et al*, 2015).

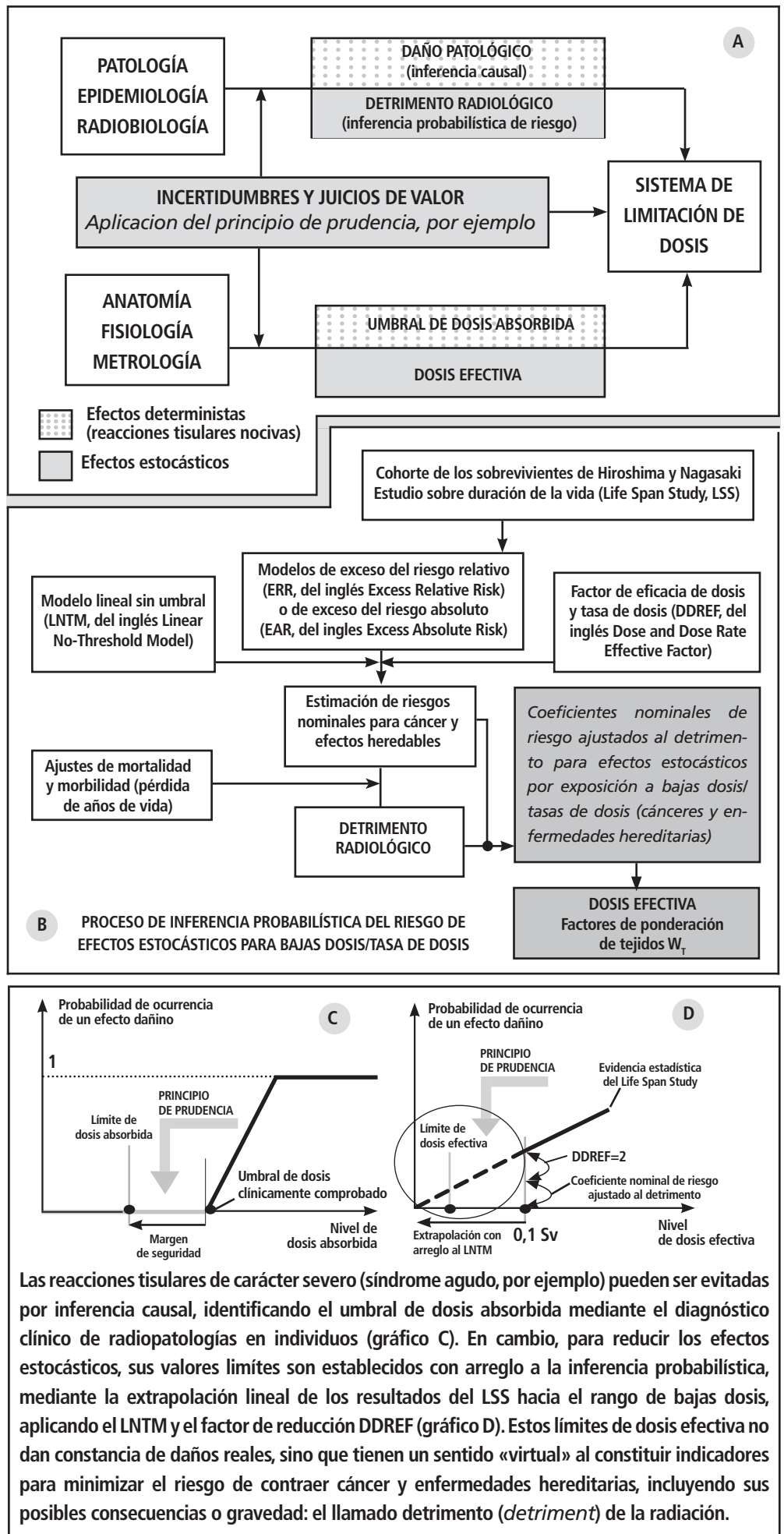
Dadas las insuficiencias epistemológicas de la radioepidemiología, acentuadas por la existencia de teorías radiobiológicas excluyentes entre sí (ver subacápite 3.1), hoy se reconoce sin ambages que las incertidumbres científicas son inherentes a la inferencia probabilística del riesgo radiológico por exposición a bajas dosis/tasas de dosis, máxime cuando se pretende pronosticar las posibles consecuencias o gravedad de dicho efectos radioinducidos en la salud: el llamado detrimento (*detriment*) de la radiación. Junto a las estimaciones objetivamente científicas, resulta entonces necesario incorporar juicios de valor: éticos, morales, utilitarios... — como el principio de prudencia— para tratar de minimizar ese riesgo (UNSCEAR, 2012). Esos juicios de valor problematizan el propio proceso de inferencia al

Luego que, a mediados de los años 50 del siglo XX, los resultados del Life Span Study (LSS) demostraron cierta proporcionalidad entre la magnitud de la dosis absorbida por los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki y la mayor aparición de daños en su salud —leucemia, en primer lugar—, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés) decidió aplicar desde 1965 el modelo lineal sin umbral (LNTM, de Linear No-Threshold Model) que estipula la posibilidad de efectos dañinos (cáncer y enfermedades hereditarias) por mínima que sea la exposición a las radiaciones ionizantes artificiales, si su dosis supera el fondo natural.

Sin embargo, no es hasta 1977 que se consuma la adopción oficial del LNTM por el ICRP en su Publicación 26, al quedar establecida por primera vez la diferencia entre *efectos estocásticos* y *efectos no estocásticos*. Estos últimos fueron reconceptualizados como *efectos deterministas* en la Publicación 60 (ICRP, 1991), y así se les denomina en la Publicación 103, si bien ya se reconocen como *reacciones tisulares nocivas* (ICRP, 2007).

Para responder a esa dualidad (no estocásticos y estocásticos) fue instaurado el Sistema de Limitación de Dosis, según el cual las «dosis admisibles» son implementadas con arreglo a la *inferencia causal* que pueda —o no— probarse entre el nivel de exposición y la atribución del daño sobre la salud (gráfico A). Mientras que para los efectos deterministas por altas dosis es posible inferir la causalidad, para el caso de las bajas dosis solo puede aplicarse la *inferencia probabilística del riesgo de efectos estocásticos* (gráfico B). Esta última se encuentra sujeta a grandes incertidumbres dadas las insuficiencias epistémicas de la radioepidemiología, así como la existencia de teorías radiobiológicas excluyentes entre sí.

Por eso, junto a las estimaciones objetivamente científicas, resulta necesario incorporar juicios de valor: éticos, morales, utilitarios... como el *principio de prudencia* (UNSCEAR, 2012). Ellos problematizan el propio proceso de inferencia del riesgo radiológico al insuflarle un sesgo subjetivo que influye decisivamente en la concepción del Sistema de Limitación de Dosis, tal y como se muestra en esta infografía.



Infografía 12: Concepción del Sistema de Limitación de Dosis. Fuente: elaboración propia.

insuflarle un sesgo subjetivo que influye decisivamente en la concepción del Sistema de Limitación de Dosis (ver infografía 12).

Sobre la base de esa controversial extrapolación lineal de los datos epidemiológicos del LSS, en la Publicación 26 fueron sugeridos los primeros valores numéricos del *factor de riesgo para efectos estocásticos*: cánceres y enfermedades hereditarias. Estos valores tienen en cuenta la probabilidad de que aparezcan esos tipo de daños en el individuo o sus descendientes por exposición a bajas dosis/tasas de dosis, así como el nivel de mortalidad por cáncer y el nivel de gravedad de los efectos hereditarios (ICRP, 1977). Considerando también la incidencia de cánceres no fatales, estos factores fueron redefinidos en la Publicación 60 como *coeficiente(s) nominal(es) de riesgo ajustado(s) al detrimento para efectos estocásticos por exposición a bajas dosis/tasas de dosis* (ICRP, 1991; González, 2014). Adelantamos su significado, aclarando sus términos, pues sostenemos que este constructo matemático socioestadístico es la máxima expresión del dilema de las radiaciones ionizantes, al contener un alto grado de incertidumbres (aleatoria y epistémica) y tratar de paliarlas aplicando juicios de valor:

*coeficiente de riesgo*: es un numeral expresado en porcentaje (% de dosis) que, multiplicado por la dosis, cuantifica la probabilidad subjetiva, plausibilidad o «grado de creencia» que ocurrirá el efecto estocástico (cancerígeno o hereditario)<sup>31</sup>.

*nominal*: se refiere a que este numeral no corresponde a un valor real en individuos, sino que está asociado a la exposición de una población nominal de hombres y mujeres con una distribución de edad típica, promediando grupos etarios de ambos sexos;

*ajustado al detrimento*: significa que este numeral es multidimensional y expresa la esperanza matemática de daño plausible. Entre otras variables, incluye la plausibilidad ponderada de cáncer (fatal y no fatal), así como el deterioro y acortamiento de la vida. En cuanto a la posible ocurrencia de efectos estocásticos hereditarios en los seres humanos por exposición a bajas dosis de radiación ionizante, esta hipótesis no ha sido probada —pero tampoco descartada— por los conocimientos radiobiológicos y radioepidemiológicos (UNSCEAR, 2012).

#### 3.4.1/ *Magnitudes limitadoras de los efectos estocásticos*

El coeficiente nominal de riesgo para efectos estocásticos ajustado al detrimento trajo aparejada consigo una nueva magnitud radiológica: la introducción del equivalente de dosis efectiva (*effective dose equivalent*,  $H_E$ ). Quedaron entonces definidas en la Publicación 26 las dos llamadas «magnitudes limitadoras»:

—el equivalente de dosis en órgano (*dose equivalent*,  $H$ ), que es el producto de la dosis absorbida en un punto ( $D$ ) por el factor de calidad ( $Q$ ). De este modo, también para los efectos estocásticos se tiene en cuenta la eficacia biológica relativa (RBE) de los tipos de radiaciones en dependencia de su transferencia lineal de energía (LET).

---

<sup>31</sup>No debe confundirse con la plausibilidad biológica (*biological plausibility*) o verosimilitud de una hipótesis en los términos propuestos por Austin Bradford Hill; o sea, como uno de los nueve «criterios de causalidad» para tratar de inferir una relación causal a partir de una observación no experimental, mientras determinada hipótesis no haya sido confirmada y/o verificada como verdadera o falsa a la luz de los conocimientos disponibles (Hill, 1965; Morabia, 1991).

MAGNITUDES LIMITADORAS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA (EFECTOS ESTOCÁSTICOS)

DESDE 1977 A 1991

DESDE 1991 HASTA LA ACTUALIDAD

EQUIVALENTE DE DOSIS EN TEJIDO U ÓRGANO  
*dose equivalent*

DOSIS EQUIVALENTE EN ÓRGANO\*  
*equivalent dose*

$$H = Q(L) \times D_t$$

$$H_{T,R} = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Introducido en Pub. 26 (ICRP, 1977), Q (L) queda solo para magnitudes operacionales a partir de Pub. 60 (ICRP, 1991).

Los factores ponderales de radiación ( $w_R$ ) fueron introducidos en Pub. 60 (ICRP, 1991) y actualizados en Pub.103 (ICRP, 2007).

EQUIVALENTE DE DOSIS EFECTIVA  
*effective dose equivalent*

DOSIS EFECTIVA\*  
*effective dose*

$$H_E = \sum_T w_T Q_T D_T$$

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

Los factores ponderales de tejido ( $w_T$ ) fueron introducidos en Pub. 26 (ICRP, 1977).

Los  $w_T$  fueron actualizados en Pub.60 (ICRP, 1991) y, luego, en Pub. 103 (ICRP, 2007).

\*En el caso de la incorporación de material radiactivo en el organismo se trata de *dosis equivalente comprometida*  $H_1(\tau)$  y *dosis efectiva comprometida*  $E(\tau)$ .

Tabla 1: Redefiniciones de las magnitudes limitadoras para efectos estocásticos. Fuentes: ICRP (1977, 1991, 2007).

—el equivalente de dosis efectiva (*effective dose equivalent*,  $H_E$ ), que es el producto de la suma de los equivalentes de dosis por los factores ponderales de las radiosensibilidades de órganos y tejidos ( $w_T$ ), teniendo en cuenta su contribución individual (detrimento relativo) al detrimento total en la salud: gravedad del cáncer y aparición de enfermedades hereditarias.

También en la Publicación 26 fueron adoptadas las unidades del Sistema Internacional (SI) en sustitución del Sistema Convencional (SC): el roentgen (R) fue reemplazado por el coulón/kilogramo ( $1 R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Cl/kg}$ ); el rad por el joule/kilogramo o gray (Gy) para las magnitudes kerma y dosis absorbida ( $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$ ;  $1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy}$ ), y el rem fue sustituido por el sievert ( $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$ ;  $1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv}$ ). El sievert quedó como unidad de medida solamente para las magnitudes limitadoras de los efectos estocásticos.

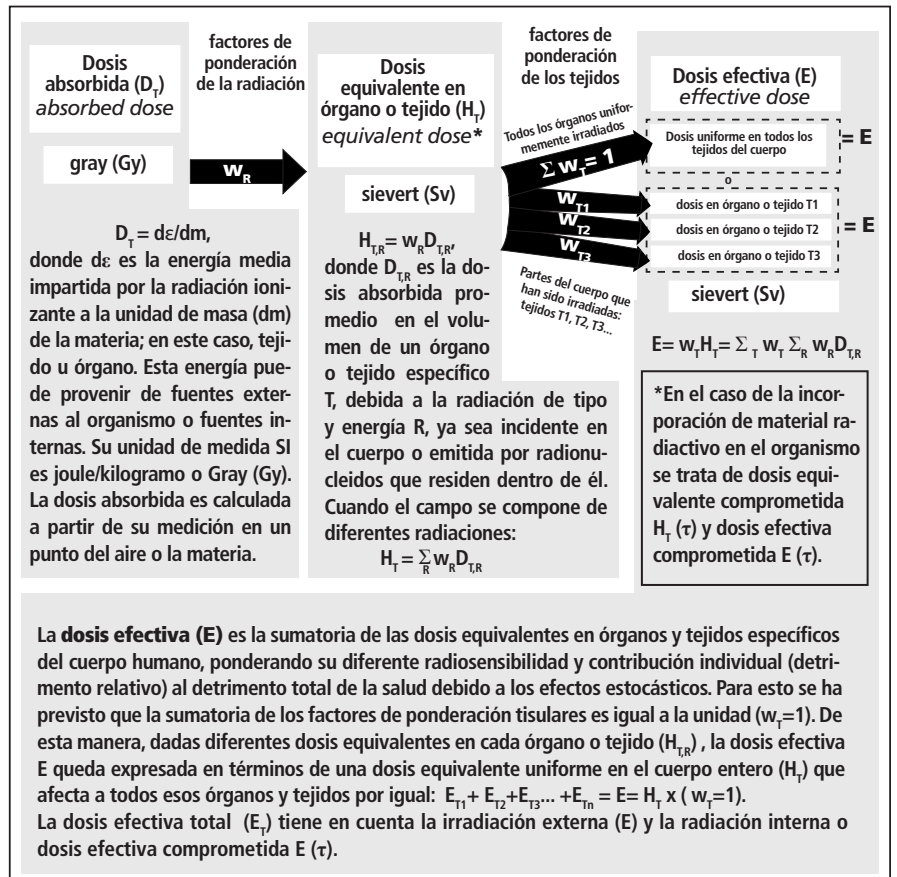
Al considerar más importante la dosis absorbida media en un órgano o tejido ( $D_{T,R}$ ), y no la dosis absorbida en un punto, en la Publicación 60 fueron introducidos los factores ponderales de radiación ( $w_R$ ), en lugar de los factores de calidad (Q) empleados en la Publicación 26 para calcular el equivalente de dosis. Para diferenciar ambas magnitudes, una basada en Q y la otra en  $w_R$ , la segunda se denominó «dosis equivalente en órgano o tejido» o simplemente «dosis equivalente» (*equivalent dose*,  $H_{T,R}$ ). En consonancia, el «equivalente de dosis efectiva» fue renombrado por conveniencia como «dosis efectiva» (*effective dose*, E). Desde entonces, calculadas a partir de la dosis absorbida media ( $D_{T,R}$ ), la *dosis equivalente* y la *dosis efectiva* son las magnitudes limitadoras de los efectos estocásticos, cuyos factores ponderales ( $w_R$  y  $w_T$ ) fueron actualizados en la Publicación 103, todavía vigente (ver tabla 1 e infografía 13).

Por tener un menor ratio energía/longitud,  $w_R$  es igual a 1 para las radiaciones de baja LET (fotones, electrones y muones). Aquí entran los rayos  $\gamma$  por ser fotones, y los rayos  $\beta$  por ser electrones. Para ambos tipos de rayos se cumple, entonces, que la dosis equivalente en

Para reducir la posibilidad de efectos estocásticos con arreglo a la inferencia probabilística del riesgo radiológico fueron concebidas las *magnitudes limitadoras* por la ICRP en su Publicación 26 (ICRP, 1977). Redefinidas como *dosis equivalente* y *dosis efectiva* (sievert, Sv) en la Publicación 60 (ICRP, 1991), se mantuvieron como tales en la Publicación 103 (ICRP, 2007) hasta la actualidad.

La dosis efectiva (E) expresa el riesgo de efectos estocásticos (cáncer y enfermedades hereditarias) por exposición a bajas dosis/tasas de dosis, teniendo en cuenta su gravedad para la salud o detrimento (*detriment*) en dependencia del tipo y energía de la radiación ( $w_R$ ) y de la radiosensibilidad de los órganos y tejidos ( $w_T$ ). De ahí la doble ponderación de la dosis absorbida promedio ( $D_T$ ) para obtener la dosis equivalente ( $H_T$ ) y, sobre la base de esta magnitud intermedia, calcular finalmente la dosis efectiva (E).

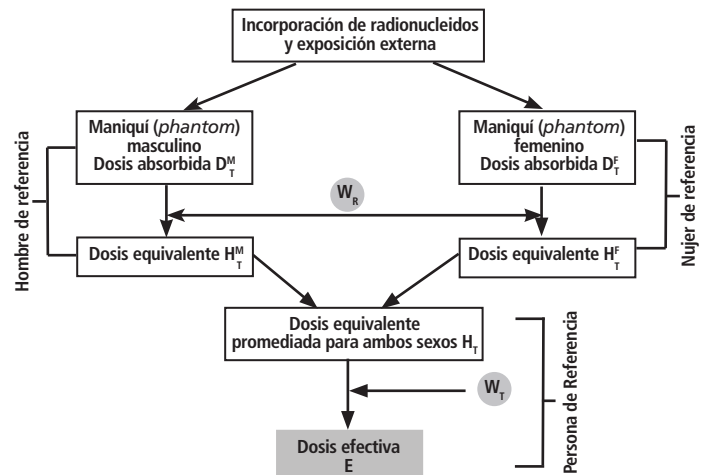
Como  $H_T$  y E no pueden ser medidas físicamente, para velar que se cumplan los límites de dosis en condiciones reales de exposición a irradiación externa (no así para radiación interna) fueron concebidas las *magnitudes operacionales*.



### CÁLCULO DE LAS MAGNITUDES LIMITADORAS

Al no poder medirse en la práctica, las magnitudes limitadoras son calculadas con maniqués (*phantoms*) que modelan la anatomía y fisiología del Hombre y Mujer de Referencia, según sea la exposición: irradiación externa o decaimiento de radionucleidos incorporados. Una vez determinada la dosis absorbida media ( $D_T$ ) en el volumen de cada órgano o tejido específico T (ovarios para las mujeres y testículos para los hombres, por ejemplo), se efectúa su ponderación por  $w_R$  y se obtienen las dosis equivalentes  $H_T$  para ambos géneros: masculino y femenino. El promedio de ambas se multiplica por los valores  $w_T$  y se obtiene la dosis efectiva para la Persona de Referencia.

Introducidos en la Publicación 60 (ICRP, 1991) y actualizados en la Publicación 103 (ICRP, 2007), los factores ponderales de radiación  $w_R$  fueron seleccionados a partir de un amplio espectro de datos experimentales sobre la eficacia biológica relativa (RBE) de las radiaciones. En cuanto a los factores ponderales  $w_T$ , introducidos en la Publicación 26 (ICRP, 1977), son valores medios que representan un promedio de muchos individuos de ambos sexos. Estos factores han sido corregidos con arreglo a los resultados del Life Span Study y otros estudios epidemiológicos de la inducción de cáncer en poblaciones expuestas, así como evaluaciones del riesgo para los efectos heredables.



### Fuentes externas de radiación

#### Magnitudes monitoreadas Indicación de instrumentos

Medición en la práctica con instrumentos de protección radiológica

Las magnitudes operacionales se basan en el equivalente de dosis ( $H=DQ$ ) medido en un punto del campo de exposición real, teniendo en cuenta el tipo de radiación externa y su energía, el ángulo de incidencia y la profundidad en el cuerpo humano. Para ello, a partir de las magnitudes físicas básicas, se caracteriza la irradiación potencial de un área o de las personas con ayuda de sencillos maniqués (*phantom*) que modelan el tronco del ser humano (esfera ICRU, bloques u otros). De esta misma forma, son calibrados los instrumentos de medición (dosímetros).

#### Magnitudes operacionales (sievert, Sv)

Equivalente de dosis ambiental  $H^*(d)$   
Equivalente de dosis direccional  $H(d, \Omega)$   
Equivalente de dosis personal  $H_p(d)$

### RELACIÓN ENTRE MAGNITUDES FÍSICAS, LIMITADORAS Y OPERACIONALES PARA IRRADIACIÓN EXTERNA

#### Magnitudes físicas básicas\*

Fluencia de partículas ( $\phi$ )  
Kerma en el aire (K), gray  
Dosis absorbida (D), gray

Cualquier tipo de irradiación externa (con o sin carga eléctrica) puede ser medida en las magnitudes físicas básicas que caracterizan los campos de radiación en un punto del espacio o de la materia.

\*En el caso de la radiación interna, aquí no contemplada, se utiliza la Actividad (A) en Becquerelios como magnitud física básica.



Tal y como se ha explicado en el recuadro superior, las magnitudes limitadoras tienen que ser calculadas a partir de las magnitudes físicas básicas. Estas son medidas en un punto del cuerpo y, a partir de ellas, mediante el método estadístico de Monte Carlo, se obtiene la cantidad de radiación que llega por las dos vías (externa e interna) a órganos y tejidos en los fantasmas virtuales del Hombre y la Mujer de Referencia. Estas simulaciones se realizan mediante imágenes médicas tomográficas (voxels) que representan la morfología promedio para adultos caucásicos de uno y otro sexo. Tras ser determinadas las dosis absorbidas  $D_T$  (femenina y masculina), estas son ponderadas ( $w_R$ ) para obtener las correspondientes dosis equivalentes ( $H_T^M$  y  $H_T^F$ ). Ambas se promedian para calcular la dosis efectiva E en la Persona de Referencia, empleando los factores de ponderación de los tejidos ( $w_T$ ). Los resultados son comparados con los valores estipulados de «dosis admisible».

#### Magnitudes limitadoras

Dosis absorbida en órgano  $D_T$  (gray, Gy)  
Dosis equivalente  $H_T$  (sievert, Sv)  
Dosis efectiva E (sievert, Sv)

Las magnitudes operacionales medidas en la práctica deben proporcionar una estimación razonablemente conservadora (sin subestimaciones o sobreestimaciones) de las magnitudes limitadoras para irradiación externa. Para lograrlo se establecen los debidos factores de conversión.

sievert es igual a la dosis absorbida en gray. Para los protones y piones cargados,  $w_R$  es igual a 2, mientras que el valor más alto ( $w_R=20$ ) corresponde a las radiaciones de alta LET: partículas  $\alpha$ , fragmentos de fisión e iones pesados. Es el caso también de los neutrones, cuyos valores de  $w_R$  varían desde cerca de 5 hasta 20 en dependencia de cuál sea su energía (ICRP, 2007).

En cuanto a los factores de ponderación  $w_T$ , los órganos más radiosensibles ( $w_T=0,12$ ) son la médula ósea, el colon, el pulmón, el estómago y la mama (ellos cinco suman  $\Sigma w_T=0,6$ ). Le siguen las gónadas (testículos y ovarios) con  $w_T=0,08$ , mientras que a la vejiga, el esófago, el hígado y la tiroides se les asigna  $w_T=0,04$  percápita ( $\Sigma w_T= 0, 16$ ). Para la superficie del hueso, el cerebro, las glándulas salivales y la piel se dispone  $w_T= 0,01$  ( $\Sigma w= 0, 04$ ). Otros restantes 14 órganos y tejidos (0,0086 per cápita) representan en conjunto  $w_T= 0,12$  (ICRP, 2007).

La sumatoria de los factores de ponderación tisulares es igual a la unidad ( $\Sigma w_T=1$ ). Esto ha sido previsto matemáticamente para que, dadas diferentes dosis equivalentes en cada órgano o tejido ( $H_{T,R}$ ), la dosis efectiva resultante  $E$  quede expresada como si se tratara de una dosis equivalente uniforme ( $H_T$ ) que ha afectado por igual a todos los órganos y tejidos del cuerpo. Así puede valorarse la contribución individual (detrimento relativo) de los órganos o tejidos al detrimento total de la salud:

$$E_{T1} + E_{T2} + E_{T3} + \dots + E_{Tn} = E = H_T \times (\Sigma w_T = 1)$$

Por ejemplo: si en la tiroides se comprueba una dosis absorbida de 0,1 Gy —que para radiaciones beta o gamma ( $w_R=1$ ) resulta 0,1 Sv (100 mSv) de dosis equivalente—, la contribución individual de esa glándula afectada corresponde a una dosis efectiva de 0,004 Sv (4 mSv), pues su radiosensibilidad es  $w_T=0,04$ . Esto significa que 0,1 Sv (100 mSv) en tiroides es tan dañino como si todos los tejidos y órganos del cuerpo, incluida la propia tiroides, hubieran recibido una dosis equivalente homogéneamente distribuida de 0,004 Sv (4 mSv) que da lugar a ese mismo valor numérico de dosis efectiva para todo el organismo:

$$E_{\text{tiroides}} (100 \text{ mSv}) = E (4 \text{ mSv})$$

$$H_{\text{tiroides}} \times w_{\text{tiroides}} = (w_{\text{médula ósea}} \times H_{\text{médula ósea}}) + (w_{\text{colon}} \times H_{\text{colon}}) + \dots (w_{\text{tiroides}} \times H_{\text{tiroides}})$$

$$100 \times 0,04 = H \times (\Sigma w_T = 1)$$

$$H = 4 \text{ mSv}, \text{ o lo que es decir también: } E = 4 \text{ mSv}$$

Si la tiroides ha recibido 40 mSv de dosis equivalente, pero también el pulmón ha recibido 20 mSv ( $w_T=0,12$ ), entonces hay que tener en cuenta la suma de los detrimentos relativos de ambos órganos. Aplicando la ecuación anterior, se cumple que su contribución resultante al detrimento total en la salud es igual al que provocaría una radiación homogénea de todo el cuerpo por una dosis equivalente de 0,004 Sv (4 mSv), de la que resulta ese mismo valor de dosis efectiva:

$$E_{\text{tiroides}} (40 \text{ mSv}) + E_{\text{pulmón}} (20 \text{ mSv}) = E (4 \text{ mSv})$$

$$40 \times 0,04 + 20 \times 0,12 = H \times (\Sigma w_T = 1)$$

$$H = 4 \text{ mSv}, \text{ o lo que es decir también: } E = 4 \text{ mSv}$$

Al comparar ambos ejemplos, basta saber que las dosis efectivas resultantes son iguales y, por ende, hay una misma probabilidad de detrimento total en la salud, aunque hayan sido diferentes órganos irradiados a distintas dosis. En el primer caso, solamente la tiroides recibió



100 mSv, mientras que en el segundo caso este mismo órgano recibió una dosis menor (40 mSv), pero también estuvo involucrado el pulmón (20 mSv).

En la medida que se obtengan nuevas evidencias estadísticas, está previsto que los factores de ponderación tisular  $w_T$  pueden ser actualizados, pero siempre readecuándolos para que su sumatoria sea igual a la unidad ( $\sum w_T=1$ ). Estos valores responden a una promediación de los órganos de muchos individuos de ambos sexos y todas las edades, para lo cual se tienen en cuenta los resultados del Life Span Study y otros estudios epidemiológicos de la inducción de cáncer en poblaciones expuestas, así como las evaluaciones del riesgo para los efectos heredables (ICRP, 1991). Al estar relacionados con el coeficiente nominal de riesgo ajustado al detrimento, que es un constructo matemático de carácter socioestadístico, los factores  $w_T$  y la magnitud dosis efectiva  $E$  son duramente criticados por los detractores del LNTM, considerándolos una manera demasiado simplista de vincular la posible ocurrencia del cáncer radiogénico en tejidos u órganos específicos con el detrimento total de la salud (Yablokov *et al*, 2016). En respuesta, la ICRP sostiene que  $w_T$  y  $E$  son magnitudes solamente con fines de protección radiológica y no están destinadas a juzgar la causalidad del cáncer debido a la radiación (ICRP, 2007). Asimismo reconocen las grandes incertidumbres implícitas en la metodología empleada y los juicios de valor incorporados al evaluar el riesgo de efectos estocásticos, incluyendo su detrimento o gravedad.

Los detractores del LNTM replican con el argumento de que no es lo mismo valorar el efecto de la dosis absorbida desde el cuerpo hacia abajo, que desde el órgano o tejido hacia arriba. Para fundamentar la diferencia recurren por analogía a la necesidad de distinguir entre la energía media que un ser humano recibiría calentándose a la luz de una hoguera y la que le sería transferida tragándose una brasa al rojo vivo (Busby y Bertell, 2003). Ejemplifican con la radiación interna, considerando que la ICRP ha subvalorado la peligrosidad de las «partículas calientes», cuya incorporación al organismo con el agua y los alimentos ingeridos y el aire respirado provoca que los seres vivos queden expuestos a la contaminación radiactiva por emisores alfa como el plutonio. Es el caso de los damnificados por el llamado «polvo de Chernobyl», aunque vivan en territorios limpios a juzgar por los reportes aéreos de radiaciones gamma sobre la disminución del cesio-137 (Yablokov *et al*, 2016).

Para este caso de la incorporación de material radiactivo en el interior del organismo, la ICRP ha previsto las magnitudes *dosis equivalente comprometida*  $H_t(\tau)$  y la *dosis efectiva comprometida*  $E(\tau)$ . Los radionucleidos incorporados pueden incidir sobre los órganos y tejidos en dependencia de su manera de ingreso (ingestión, inhalación o absorción a través de la piel), su periodo de semidesintegración y la retención biológica dentro del cuerpo tras incorporarse a la sangre. La necesidad de regular las contaminaciones internas ha llevado a tener en cuenta que la acumulación de dosis puede durar mucho tiempo. Así, para cumplir con los límites de dosis efectiva, se recomienda que se tenga en cuenta el año en curso en que ocurrió la incorporación de los radionucleidos. Para los trabajadores con fuentes radiactivas se evalúa habitualmente durante un período de 50 años —o sea,  $E(50)$ —, considerando la expectativa de una persona joven desde que debuta como fuerza laboral.

Esa dosis efectiva comprometida  $E$  (50) también se usa en las estimaciones prospectivas para los miembros del público que son adultos, mientras que para los bebés y niños se evalúa durante 70 años. Tras el accidente de Chernobyl —por ejemplo—, el control sanitario de los habitantes en zonas contaminadas del extremo norte de Rusia con cesio-137, cesio-134, estroncio-90 y estroncio-89 tuvo en cuenta que estos radionucleidos son un componente crucial de la dosis absorbida por radiación interna debido a los hábitos alimenticios. Es el caso de los pastores de renos y sus familiares, acostumbrados a ingerir la leche y carne de esos animales, cuyo apacentamiento con el líquen contaminado radiactivamente se convirtió en un eslabón crucial de la cadena radiobiótica «suelo (agua)-plantas-animales-hombre» (Chernobyl Forum, 2006).

Las magnitudes limitadoras —tanto para irradiación externa como contaminación interna— son imposibles de medir directamente, pues, aunque se idearan hipotéticos detectores con ese fin, habría que situarlos dentro de los órganos y tejidos. A partir de las magnitudes físicas básicas (fluencia, actividad, kerma en el aire y dosis absorbida en punto), que sí son medibles en la práctica, son calculados  $D_T$ ,  $H_{T,R}$  y  $E$  mediante el método matemático de Monte Carlo, simulando el transporte de sustancias radiactivas por las dos vías (externa e interna) y su diferente absorción por el organismo en maniqués (*phantoms*) (ver infografía 13). Estos son modelos computacionales basados en imágenes médicas tomográficas que describen la anatomía humana (masculina y femenina) con elementos tridimensionales de pequeño volumen (*voxels*), especificando la densidad y composición de órganos y tejidos para una morfología promedio de adultos caucásicos de ambos sexos (ICRP, 2007).

Para comprobar que se cumplen las magnitudes limitadoras en las condiciones reales de exposición a fuentes radiactivas externas (no así para radiación interna), fueron concebidas por la ICRU en 1985 las llamadas *magnitudes operacionales*, que sí pueden medirse en la práctica en función del tipo de radiación y su energía  $Q$  (L), el ángulo de incidencia y la profundidad en el cuerpo humano. Para la vigilancia de área (dosis que podría recibir un individuo) se emplean el *equivalente de dosis ambiental*  $H^*(d)$  y el *equivalente de dosis direccional*  $H(d, \Omega)$ . Para la vigilancia radiológica individual (dosis que ya el individuo recibió) se utiliza el *equivalente de dosis personal*  $H_p(d)$ , donde  $d$  es una profundidad apropiada en una dirección especificada  $\Omega$  por debajo de un punto específico en el cuerpo humano. Se recomiendan 10 mm para medir las radiaciones fuertemente penetrantes o, lo que es lo mismo, para órganos situados en profundidad, y 0,07 mm y 3 mm para medir radiaciones poco penetrantes u órganos superficiales como la piel y el cristalino del ojo (ICRP, 2007).

Una de las tareas primordiales de la protección radiológica es comprobar que dichas magnitudes operacionales proporcionen una estimación razonablemente conservadora, sin demasiadas sobreestimación o subestimación, de las magnitudes limitadoras durante la exposición a fuentes externas de radiación. Con ese objetivo, la ICRU y la ICRP establecen los criterios que interrelacionan las magnitudes físicas básicas con las magnitudes operacionales, caracterizando la irradiación potencial de un área o de las personas con ayuda de simples maniqués físicos que modelan el tronco humano, como las esferas ICRU, bloques y otros.

De esta forma son calibrados los instrumentos de medición (dosímetros), ya que esto no puede hacerse en presencia de un individuo real. La relación entre las magnitudes operacionales y magnitudes limitadoras se establece mediante factores de conversión (ver infografía 13).

Como ya se ha apuntado, no han sido definidas magnitudes operacionales que provean directamente una estimación de la dosis equivalente y la dosis efectiva cuando son comprometidas; o sea, debidas a la incorporación de radionucleidos en el organismo. La evaluación de la radiación interna con fines de protección se realiza a partir de la actividad (A) de los radionucleidos incorporados, ya sea midiéndola durante la vigilancia radiológica de cuerpo entero u órganos específicos (tiroides, por ejemplo), o por mediciones indirectas (orina y heces) y mediciones de muestras medioambientales aplicando modelos biocinéticos (ICRP, 2007). Resulta muy complejo determinar el nivel de acumulación de los radionucleidos en los diferentes órganos de distintas personas; en especial, la presencia de las ya mencionadas «partículas calientes» del orden del micrómetro. Alojadas en los pulmones, su presencia ha sido constatada en más de la mitad de los llamados «liquidadores» de Chernobyl bajo investigación, así como en habitantes de territorios supuestamente descontaminados (Yablokov *et al*, 2016).

#### 3.4.2/ Juicios de valor para la optimización: antes y después de Chernobyl

Aunque el Sistema de Limitación de Dosis se oficializa en 1977, la experiencia de Chernobyl influyó decisivamente en la transformación de la protección radiológica, haciendo más ostensible el papel de los juicios de valor. Es lo que veremos ahora, aprovechando fuentes testimoniales solamente conocidas en idioma ruso, tal y como hicimos con los alegatos de Dollezhal, constructor del reactor nuclear RBMK-1000; del ingeniero Dyatlov, responsable del experimento que condujo a su destrucción, y del académico Legásov, protagonista de las medidas de liquidación (ver subacápite 2.4). Nuestro objetivo ahora es destacar cómo los criterios de «tolerabilidad» y/o «aceptabilidad» del riesgo nuclear y radiológico se complejizaron a partir de esa experiencia nefasta, ampliando la brecha epistémica entre expertos y profanos.

Como ya se ha explicado antes, a los límites de dosis para efectos deterministas es posible fijarles un valor umbral, reconociéndolo mediante el diagnóstico clínico de patologías en individuos. A Dyatlov —por ejemplo— se le diagnosticó un síndrome de radiación aguda tras haber recibido una dosis no menor de 5 Gy<sup>32</sup>. En cambio, los límites de dosis efectiva total  $E_T$  (radiación externa más contaminación interna) para los trabajadores y el público tienen solamente un sentido virtual como dosis admisibles. Sus valores numéricos han sido establecidos únicamente para limitar la probabilidad de efectos estocásticos, ateniéndose al nivel superior de la «tolerabilidad» del riesgo en la sociedad. Este criterio subjetivo involucra juicios de valor como la cantidad de muertes tolerables, el acortamiento de la esperanza de vida y otros indicadores asociados a los

<sup>32</sup>Dyatlov logró sobrevivir increíblemente hasta 1991, muriendo pocos meses después de abandonar la prisión, donde cumplió cuatro de los diez años a los que fue condenado tras considerársele el máximo culpable del accidente. Ese mismo año había comenzado a tratarse en la división de quemaduras de la clínica universitaria de Munich (Dyatlov, 2003).

daños sobre la salud. La limitación de las dosis efectiva para los trabajadores y el público se define mediante la relación:

$$\text{Límite de dosis anual (Sv/año)} = \frac{\text{nivel de riesgo anual tolerable (\%/año)}}{\text{coeficiente nominal de riesgo ajustado al detrimento (\%/Sv)}}$$

Para evaluar el nivel de riesgo anual tolerable, en la Publicación 26 fueron analizados los índices de mortalidad en diferentes actividades humanas, incluidas las ocupaciones productivas más complejas. En 1977 se consideraba que una industria con altos estándares de seguridad tenía una tasa promedio de muertes accidentales en el orden de  $10^{-4}$ ; es decir, unas 100 muertes por cada un millón de empleados. Mientras tanto, la inferencia probabilística del factor de riesgos estocásticos mediante el LNMT a partir de los resultados del LSS había arrojado los siguientes índices de detrimento por 1 Sv de dosis recibida: 1,  $25 \times 10^{-2}$  cánceres mortales y  $0,4 \times 10^{-2}$  efectos hereditarios severos en hijos y nietos. Empleando la fórmula arriba expuesta, fue comprobado que el límite ya establecido de dosis anual para los trabajadores con fuentes de radiación ionizante (5 rem; o sea, 50 mSv) garantizaría una tasa de mortalidad por exposición cercana a 350 decesos por millón en un año; o sea,  $3,5 \times 10^{-4}$ . Esta cifra era comparable a los riesgos registrados para los trabajadores de transportes y compañías de servicios públicos en los Estados Unidos, entre otros sectores (Pochin, 1978).

Para el público en general, el nivel de tolerabilidad social se estimaba entre  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  muertes por año, por lo que también se mantuvo el límite de dosis anual de 5 mSv. Este valor se establece siempre mucho más pequeño que el límite ocupacional, ya que tiene en cuenta la exposición durante toda la vida (no solo para la edad laboral) e incluye a bebés y niños, considerándolos más radiosensibles. Además, tiene en cuenta que los miembros del público solo están protegidos por el control de la fuente radiactiva, y no por monitoreo individual, como sí sucede con los trabajadores expuestos profesionalmente a radiaciones ionizantes, cuya magnitud de dosis recibida y estado de salud son verificados de manera obligatoria.

Es así que las dosis admisibles establecidas en la Publicación 1 (ICRP, 1959) y Publicación 6 (1964) quedaron corroboradas en las recomendaciones de 1977, tanto para la exposición ocupacional como la exposición del público: 50 mSv/año y 5 mSv/año, respectivamente. Sin embargo, a partir de la Publicación 26, ya no se trata de la noción de «máxima dosis permisible», sino que los límites de dosis recibida comienzan a emplearse solamente como una frontera entre el «riesgo inaceptable» (*unacceptable risk*) y el «riesgo aceptable» (*acceptable risk*). Por lo que es preciso actuar hasta que la exposición radiactiva sea «tan baja como sea razonablemente alcanzable»; o sea, el criterio ALARA basado en el LNMT. La filosofía práctica de la protección radiológica se reorientó entonces hacia la jerarquización de la *optimización*, considerando —además— que dicho criterio puede ser gestionado en términos monetarios, pues las decisiones humanas para cualquier actividad responden siempre a un balance entre costos y beneficios (Pochin, 1978).

Esta nueva postura filosófica práctica quedó expresada mediante la unificación de los tres principios que la ICRP había manejado indistintamente a lo largo de los años para la exposición a fuentes de radiaciones ionizantes bajo control garantizado:

*Principio de justificación:* Cualquier decisión que altera la situación de exposición a la radiación debería ocasionar más beneficio que daño.

*Principio de optimización de la protección:* La probabilidad de una exposición, el número de personas expuestas y la magnitud de sus dosis individuales deberían ser mantenidas tan baja como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales; o sea, el susodicho criterio ALARA: *As Low as Reasonably Achievable*.

*Principio de aplicación de límites de dosis:* La dosis total a cada individuo no debería exceder los límites recomendados para determinadas condiciones.

Al referirse a «número de personas», el principio de optimización trajo consigo la introducción del equivalente de dosis efectiva colectiva (*collective effective dose equivalent*), que a partir de la Publicación 60 (ICRP, 1991) pasó a ser la dosis colectiva efectiva  $S$  (*collective effective dose*). Por esta magnitud se entiende la sumatoria de las dosis efectivas medias  $E_i$  pronosticadas o recibidas por los miembros de un grupo o población, cuyo número de individuos  $N_i$  ha estado o estará expuesto a una fuente radiactiva durante un determinado periodo o lapso de tiempo:  $S = \sum_i E_i N_i$

La dosis efectiva colectiva tiene como unidad de medida el julio por kilogramo (J/kg) —o sea, el sievert—, pero se denomina especialmente sievert-persona (Svp). De esta manera, se expresa que el riesgo inferido probabilísticamente para una dosis baja puede ser insignificante a nivel individual, pero puede resultar relevante cuando se trata de colectividades expuestas a esa misma dosis, por mínima que sea. La validez de este supuesto se basa en que —según el LNTM— los efectos estocásticos son considerados aditivos, acumulativos y lineales sin umbral. Si un individuo recibe suficiente radiación (dosis  $D$ ) para causarle al menos un cáncer probable, esto significa que la exposición de  $X$  personas a una dosis  $D/X$  también podría causar al menos un caso de cáncer entre todas ellas. Esto se explica porque una parte de esas  $X$  personas será más sensible a las radiaciones y por el propio carácter estocástico de los efectos nocivos: mientras más materia biológica energizada, aunque sea por un mínimo impacto radiactivo, mayor será la probabilidad de daño.

La noción de dosis efectiva colectiva sirvió para instrumentar la jerarquía del criterio ALARA en términos de coste-beneficio como principio rector de las exposiciones planificadas: la exposición ocupacional en primer lugar (trabajadores de la industria nuclear, por ejemplo), aunque también comenzó a extenderse a la protección del público cercano a los repositorios de desechos radiactivos y otras situaciones de exposición, incluidas las médicas y accidentales (ICRP, 1983). El objetivo de la optimización sería reducir la dosis efectiva colectiva hasta que cualquier medida adicional de protección radiológica (barreras para la fuente radiactiva, por ejemplo) ya no resulta razonable, pues el costo de la inversión excede el beneficio por reducción de posibles daños a la salud. Aunque la ICRP advirtió desde un inicio que no se refería al «costo de la vida», sino al costo de los recursos para proteger esa vida, la utilización del criterio ALARA en términos monetarios resultó cuestionada tanto desde el punto de vista ético como práctico, al existir grandes dudas de cómo calcular el precio del Sv-persona para lograr el riesgo aceptable (IAEA e ICRP, 1979).

Estas reticencias con respecto a la aplicabilidad de la optimización mediante el análisis de costo-beneficio se acrecentaron tras ocurrir el desastre de Chernobyl en 1986. Por primera vez en la historia se había producido una contaminación transfronteriza por liberación de radionucleidos artificiales provenientes de un reactor nuclear con fines civiles, los cuales se dispersaron rápidamente por extensas zonas de Europa, asentándose la mayor parte en el hemisferio septentrional. Grandes poblaciones quedaron expuestas a niveles de dosis que, durante los primeros días, llegaron a superar en 15 veces el fondo radiactivo natural en un área de 200 000 km<sup>2</sup> de la otrora Unión Soviética. Como resultado, cerca de ocho millones de personas vivirían en territorios contaminados en Bielorrusia, Ucrania y la parte europea de Rusia (Yablokov *et al*, 2016). Este escenario catastrófico ni siquiera había sido imaginado; por tanto, era imposible que existiese alguna experiencia internacional de cómo enfrentarlo mancomunadamente.

Realmente no existía ninguna metodología para evaluar las consecuencias radiológicas a largo plazo de la exposición a bajas dosis/tasas de dosis, ni definidos valores numéricos de límites de dosis efectiva, ni desarrollado criterios fundamentados (análisis costo-beneficio) para optimizar las medidas de protección que debían adoptarse según fuera variando el modo y grado de exposición (individual y colectiva). Las recomendaciones de la ICRP en su Publicación 40, así como las normativas de seguridad radiológica del OIEA, solo contemplaban liberaciones accidentales relativamente pequeñas de materiales radiactivos que no trascendían las fronteras del país donde estaba instalado el reactor nuclear o fuente desprotegida. Su mayor hincapié estaba en las medidas urgentes durante las fases inicial e intermedia del accidente para proteger al público en la zona directamente afectada y hasta un determinado radio a partir del epicentro de liberación radiactiva (ICRP, 1984; IAEA, 1985a, 1985b).

No es hasta casi un lustro después de haber ocurrido los sucesos de Chernobyl que la ICRP establece una diferenciación del sistema de protección radiológica en la Publicación 60, basándose en el vínculo entre los individuos y las fuentes radiactivas: controladas y no controladas. Para el caso de las exposiciones en situación planificada, cuando las dosis son controladas, se denomina «práctica» (*practice*) a aquel tipo de actividades —por lo general, beneficiosas— que incrementan la exposición individual a las radiaciones ionizantes o el número de personas expuestas, ya sea porque se han introducido nuevas fuentes y vías de transferencia o porque se modificaron las ya existentes: desde un simple equipo de rayos X hasta una central electronuclear. Por «intervención» (*intervention*) se definió aquel tipo de acciones humanas para reducir la exposición a dosis no controladas, ya sea mediante la supresión de las fuentes radiactivas, modificación de las vías de exposición o disminución de la cantidad de individuos expuestos. Este sería el caso de los accidentes nucleares en la fase de emergencia y de exposición prolongada, así como el caso de la exposición a los altos niveles de radón-222 en el interior de algunos hogares, cuya incidencia en el cáncer de pulmón también comenzaba a ser preocupante (ICRP, 1991).

Sin embargo, la gran novedad de la Publicación 60 fue el reconocimiento de que la exposición a bajas dosis de radiación ionizante entrañaba un riesgo mayor de efectos

cancerígenos que el estimado hasta entonces. Esta primicia respondía a una reevaluación integral de la exposiciones de los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki, luego de haberse implementado el nuevo sistema dosimétrico DS86 en el Life Span Study (LSS). A partir de una rectificación de la irradiación neutrónica y de rayos gamma, teniendo en cuenta las propiedades de las estructuras de madera como blindaje, se había concluido que los *hibakushas* recibieron dosis menores a las estimadas por el sistema dosimétrico anterior T65D (RERF, 2016).

Como resultado de la extrapolación lineal de esos nuevos datos del LSS, los límites anuales para efectos estocásticos en situación planificada fueron reducidos abruptamente con respecto a la Publicación 26: desde 50 mSv a 20 mSv para los trabajadores, y desde 5 mSv a 1 mSv para el público (ICRP, 1991). Estos valores reducidos de dosis efectiva ya no fueron obtenidos mediante el juicio comparativo con las tasas de mortalidad en las industrias de alta seguridad, sino que resultan del propio modelo matemático empleado para el cálculo del coeficiente nominal de riesgo ajustado al detrimento. Así, tras procesar los nuevos resultados epidemiológicos del LSS, la ICRP aprovechó en su Publicación 60 para estrenar el análisis multifactorial del detrimento (*detriment*) como medida del perjuicio total a la salud que experimentaría un grupo expuesto y su descendencia a consecuencia de una exposición a bajas dosis/tasas de dosis (ICRP, 1991).

Al acentuarse el componente subjetivo del modelo estadístico-probabilístico, el *coeficiente nominal de riesgo ajustado al detrimento* fue enseguida criticado por sobreañadir más incertidumbres y juicios de valor con tal de justificar el LNTM, sin que la presunta linealidad dosis-efecto a bajas dosis/tasas de dosis hubiese sido probada científicamente. En especial, la Academia de Ciencias de Francia estimó que la Publicación 60 no aportaba elementos convincentes para reducir el límite de dosis efectiva de 5 mSv/año a 1 mSv/año para el público, augurando que la filosofía práctica de la protección radiológica terminaría compulsando a percibir las radiaciones ionizantes como igualmente peligrosas a cualquier nivel de exposición (Académie des Sciences, 1995; Tubiana, 2005; Tubiana *et al*, 2007).

La reducción de los límites de dosis efectiva en la Publicación 60 es posiblemente una de las decisiones de mayor impacto social en la historia de la ciencia y la tecnología, aunque esto no se reconozca. Al disminuir abruptamente los límites de dosis efectiva para exposición planificada, esta polémica decisión de la ICRP complicó aún más la búsqueda de soluciones para proteger a los damnificados de Chernobyl, ya que añadió un factor imprevisto al escenario de incertidumbre radiológica. A partir de entonces los juicios de valor fueron determinantes, primando por encima de los criterios objetivamente científicos, cuando hubo que decidir la permanencia —o no— de las poblaciones en los territorios contaminados. De manera contraproducente, la propia experticia internacional contribuyó al aumento de la intolerancia social hacia el riesgo radiológico en la compleja coyuntura política que siguió al accidente, cuya dimensión catastrófica desde el punto de vista humanitario fue reconocida por el gobierno soviético hacia 1990. Este asunto de cómo los propios expertos nucleares han contribuido, consciente o inconscientemente, a intensificar la brecha epistemológica

COEFICIENTES NOMINALES DE RIESGO AJUSTADOS AL DETRIMENTO PARA EFECTOS ESTOCÁSTICOS ( $10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ o $\%/ \text{Sv}$ )						
POBLACIÓN EXPUESTA	CÁNCER (FATAL Y NO FATAL)		EFECTOS HEREDABLES		TOTAL	
	PUB. 60	PUB. 103	PUB. 60	PUB. 103	PUB. 60	PUB. 103
TODA (NIÑOS INCLUIDOS)	6,0	5,5	1,3	0,2	7,3	5,7
ADULTOS	4,8	4,1	0,8	0,1	5,6	4,2

COEFICIENTE DE RIESGO FATAL GLOBAL APROXIMADO ( $10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ o $\%/ \text{Sv}$ )		
PUB.26	PUB. 60	PUB. 103
1,25	5,0	5,0

Tabla 2: Variaciones de los coeficientes nominales de riesgo ajustados al detrimento. Fuentes: ICRP (1977, 1991, 2007).

con el público laico es una lección inaprendida de Chernobyl. De ahí que un escenario muy similar, en el sentido del confuso manejo de la información especializada, se haya vuelto a repetir durante los sucesos de Fukushima Daiichi.

Aunque ya se ha dicho, es importante recalcar que la reducción de los límites de dosis en la Publicación 60 fue recomendada por la ICRP solamente para la exposición planificada del público y los trabajadores en situación normal (prácticas). En ningún momento se dispuso que esos nuevos valores de 1 mSv/año y 20 mSv/año también eran válidos para los casos de accidente y exposición prolongada (intervenciones). Pero, sea cual fuere el modo de aplicación de esa normativa, tales ajustes se basaban en una reevaluación al alza de los coeficientes de riesgo nominales ajustados al detrimento para efectos estocásticos; en especial, del *coeficiente de riesgo fatal global aproximado* (ver tabla 2). Si este numeral era  $1, 25 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  en la Publicación 26, a partir de la revisión del LSS subió a  $5 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$  en la Publicación 60; o sea, cuatro veces. De ahí las complicaciones que trajo su interpretación a raíz de Chernobyl.

En principio, este coeficiente debe interpretarse como la cantidad de muertes por cánceres radioinducidos (más el riesgo de malformaciones genéticas) que podrían ocurrir en un grupo poblacional dado, cuyos miembros han recibido individualmente una dosis efectiva igual a 1 Sv. Este valor de 5 % debe añadirse a la probabilidad natural de las defunciones por cáncer, considerada un 20 % del total de decesos por enfermedades de cualquier tipo: cardiopatía, accidente cerebrovascular, del sistema respiratorio, etc. De esta manera, si un colectivo de personas recibiera percápita 1 Sv de dosis efectiva, los desenlaces fatales por cáncer crecerían hipotéticamente de 20 a 25 % durante el transcurso de sus vidas. Por ejemplo: si cada uno de 10 000 individuos acumuló dosis de 1 Sv, las muertes esperadas por cáncer en ese colectivo subirían de 2000 a 2500, ya que 500 serían probablemente radioinducidas.

Ahora bien, con arreglo a la propia fundamentación estadístico-probabilista de la dosis efectiva colectiva por el modelo lineal sin umbral (LNTM), ese coeficiente de riesgo fatal global también puede ser interpretado de una segunda manera: como la cantidad de personas que podrían fallecer por cáncer radioinducido, independientemente de cuán bajas fuesen las dosis individuales recibidas de manera crónica por encima del fondo natural. Esta segunda interpretación también depende de cuán grande sea la dosis efectiva colectiva, pero el sentido



de este producto cambia radicalmente porque prioriza el tamaño poblacional. Por ejemplo: para 1 000 000 personas que recibieran apenas 10 mSv (0,01 Sv) per cápita, la probabilidad de muerte por cáncer radioinducido resultaría igualmente 500 decesos:

**Muertes por cáncer = dosis efectiva colectiva x coeficiente de riesgo fatal global**

$$500 \text{ muertes} = (1\,000\,000 \text{ personas} \times 0,01 \text{ Sv}) \times (5 \times 10^{-2}) \text{ Sv}^{-1}$$

$$500 \text{ muertes} = 10\,000 \text{ Sv-persona} \times (5 \times 10^{-2}) \text{ Sv}^{-1} = 500 \text{ personas}$$

Aunque fuera concebida por la ICRP para exposiciones planificadas, esta segunda interpretación del coeficiente de riesgo fatal global en función de la dosis efectiva colectiva comenzó a utilizarse para pronosticar las muertes a largo plazo como consecuencia de Chernobyl. Una entidad oficialmente reconocida como el International Chernobyl Project, convocado por el OIEA a petición del gobierno soviético, calculó que la dosis efectiva total en los territorios más contaminados —donde habitaban cerca de 700 000 personas— alcanzaría cerca de 50 000 Sv<sub>p</sub> durante el período comprendido desde 1990 a 2060, por lo que apenas se producirían unos 2 500 cánceres fatales, aunque no se adoptara ninguna contramedida (IAEA, 1991c). Paralelamente, empleando la misma ecuación para poblaciones más grandes —así como mayores valores de dosis efectiva colectiva y de coeficiente de riesgo fatal global—, organismos no gubernamentales como Greenpeace y científicos independientes hicieron sus propios cálculos que diferían en un orden de 100 hasta 1000 veces con respecto a esas estimaciones oficiales (Yablokov *et al*, 2009).

Amplificados por los medios de comunicación masiva como números de muertes reales esperadas —no hipotéticas—, esos pronósticos totalmente divergentes entre sí (desde apenas mil hasta un millón de decesos) elevaron las cotas de incertidumbre social durante los primeros años posteriores a la tragedia, no ya solo por la minimización o hiperbolización de sus consecuencias radiológicas, sino porque evidenciaron las discrepancias irreconciliables entre los propios expertos. Esos antagonismos se agudizaron debido a la ya mencionada reducción de los límites de dosis efectiva por la ICRP en la Publicación 60, al entenderse que se aplicaban a cualquier situación de exposición, tanto controlada como no controlada.

### 3.4.3/ *La frustración de los radioproteccionistas soviéticos*

Al gran impacto social de esas recomendaciones internacionales sobre el curso de los acontecimientos posteriores a Chernobyl, se refirió el destacado radiofísico soviético I. B. Keirim-Markus, su editor científico en idioma ruso. En el prefacio y comentario suyos a la Publicación 60, el experto aprovecha sutilmente para vincular el contenido de esas normativas de la ICRP con las complejas circunstancias que siguieron al desastre, sobre todo a las enormes dificultades para intentar la optimización de las medidas de protección en términos monetarios con respecto a las dosis efectivas colectivas:

La experiencia de Chernobyl mostró que, incluso a nivel gubernamental, resulta imposible optimizar las decisiones utilizando solamente el balance coste-beneficio para la radiación, ya que es obligatorio tener en cuenta otros factores no radiológicos como son la actitud de la población

hacia las decisiones adoptadas y la influencia psíquica de la situación radiológica sobre la salud. En la Publicación 60 esto se refleja en un enfoque más moderado que antes sobre la optimización de la radiación (Keirim-Markus, 1994a: 3-4).

Más adelante, en otros trabajos suyos, Keirim-Markus se refiere mucho más críticamente a lo acontecido cuando comenzaron a difundirse dichas recomendaciones de la ICRP en la Unión Soviética, luego de que ya había sido acordado implementar como tope del riesgo tolerable un límite de dosis efectiva anual de 0,5 rem o *ber* (5 mSv) para cada habitante de las zonas contaminadas. De esta manera, esas personas no acumularían más de 35 rem (350 mSv) en el transcurso de sus vidas, considerando 70 años como promedio ( $0,5 \times 70 \text{ rem} = 35 \text{ rem}$ ). Esta llamada «concepción de los 35 *ber*» o «límite de dosis para toda la vida» había sido impulsada desde 1988 por el académico Leonid A. Ilin, presidente de la Comisión Nacional de Protección Radiológica y director del Instituto de Biofísica, al que pertenecía Keirim-Markus, también participante en la elaboración de dicha propuesta. Su principal objetivo era garantizar la permanencia relativamente «segura» de la población afectada en sus territorios autóctonos, mientras las medidas de protección —restricción del consumo de alimentos, por ejemplo— eran decididas sobre la marcha con arreglo a ese límite de dosis acumulada.

Siendo muy inferior al límite de 1 Sv (1000 mSv) estipulado por la ICRP en su Publicación 40, ese valor numérico de 350 mSv había sido calculado considerando a los niños nacidos en 1986 como el «grupo crítico» —o sea, más vulnerable—, teniendo en cuenta las dosis absorbidas por la población desde aquel año inicial de la catástrofe (Ilin, 1994). Solo si la situación radiactiva era de tal magnitud que sería superada esa magnitud de dosis sin ninguna duda, se intervendría para mudar a los damnificados en forma planificada hacia territorios limpios. Un primer cálculo arrojaba que unas 56 mil personas se encontraban en esa situación de peligro y, por tanto, debían ser reasentadas obligatoriamente. En el resto de las zonas contaminadas, si todavía fuera necesario, continuarían aplicándose las acciones remediales para disminuir los niveles de radiación, incluyendo la transformación de los métodos de producción agrícola y la restricción del consumo de alimentos como la leche de granja. La mayor aspiración consistía en eliminar todas esas medidas restrictivas donde ya ese límite de 350 mSv estuviese garantizado para 70 años de exposición crónica, a la par que se iban recuperando las condiciones de vida anteriores a la tragedia (Ilin, 1994).

Sin embargo, coincide entonces que la ICRP recomienda el nuevo límite de dosis efectiva (1 mSv/año) en su Publicación 60 para la exposición del público en situación planificada. Y aunque no se refiere a la situación de accidente nuclear, este valor numérico fue interpretado por el descollante movimiento ecologista y determinados círculos científicos dentro de la Unión Soviética —incluidos médicos, genetistas y radiobiólogos— como el indicador universal del «riesgo aceptable» y, por ende, el único criterio válido para justificar una concepción «más humana» de la protección radiológica en favor de los damnificados por Chernobyl. A partir de este imperativo moral, en contra de la concepción de los 35 rem (350 mSv) fue impulsada por miembros de la Academia de

Ciencias de Bielorrusia la concepción de no más de 7 rem (70 mSv) durante toda la vida (70 años x 1 mSv). Esta república soviética era la más afectada territorialmente por la contaminación radiactiva y, al fragor de los debates políticos, muchos científicos y ecologistas se habían sumado al pujante movimiento nacionalista que había despuntado en contra de los dictados de Moscú (Stepanov, 2010). Es el caso del radiobiólogo M. V. Malko, quien defendió esa concepción propia, «bielorrusa», con estos argumentos en contra de los 35 *ber*:

«La ciencia por primera vez se enfrenta a un caso de irradiación crónica con bajas dosis de millones de personas. Por tanto, en la actualidad no es posible dar una evaluación exacta sobre el daño a la salud de la población en los territorios contaminados. Para hacer esas evaluaciones se necesita una larga investigación en las zonas afectadas por la avería (...) ¿Qué hacer? Observar por largo tiempo cuál será el destino de la población en las regiones afectadas, prácticamente sin emprender ninguna medida activa de protección radiológica, como ha exigido la concepción del “límite de dosis para toda la vida”, o asumir los grandes costos para emprender nuevas medidas, como exige la concepción bielorrusa. Me parece que la segunda opción significa el derecho a la vida. No se puede, a fin de cuentas, experimentar con la gente» (Malko, 1991: 4; citado en Kasperski, 2010: 92).

En tal coyuntura política es que, según Keirim-Markus, la injustificada reducción de los límites de dosis por la ICRP contribuyó a que la radiación ionizante fuera percibida como mucho más peligrosa y el valor de 35 rem (350 mSv) durante toda la vida terminó rechazado por considerarse demasiado alto. Aunque la concepción «bielorrusa» de 7 rem (70 mSv) tampoco llegó a fructificar, una variante igualmente estricta y todavía mucho más polémica por el criterio empleado —ya que incluyó la densidad de la contaminación radiactiva—, quedó refrendada el 15 de mayo de 1991 cuando el Sóviet Supremo de la URSS aprobó la Ley no. 1244-1 «Sobre la protección social de los ciudadanos expuestos a los efectos de las radiaciones por la catástrofe de Chernobyl». El impacto socioeconómico y psicológico fue enorme. Refiriéndose solamente a Rusia, el testimonio de Keirim-Markus es ya de por sí elocuente:

El número de regiones consideradas contaminadas se elevó de 4 a 17, y la población afectada de 0,15-0,20 a 2,6 millones de personas. La rehabilitación de los territorios encareció súbitamente y se prolongó; la ola de radiofobia condenó a la población a mucho más daño que la radiación elevada. La radiofobia trajo mucho mal a otros países de Europa, donde la dosis era insignificante. Contrariamente a la posición declarada por la ICRP, aumentó en forma abrupta la visión negativa de la sociedad hacia la utilización de la energía atómica y las fuentes de radiación (Keirim-Markus, 1999: 17).

Apenas unos meses después, en diciembre de 1991, dejó de existir la URSS y cada una de las antiguas repúblicas de Rusia, Ucrania y Bielorrusia dictó sus propias regulaciones para los afectados por Chernobyl. ¿Hasta qué punto la sorprendente decisión de la ICRP fue una muestra de conservadurismo científico o el resultado de una conjura para desestabilizar el Estado soviético, añadiendo incertidumbre sociorradioecológica a la ya

enorme incertidumbre socioeconómica y sociopolítica? Aunque la interrogante parezca demasiado especulativa, se encuentra en el trasfondo de las afirmaciones de Keirim-Markus y otros expertos soviéticos que atribuyeron el aumento del «estrés radiofóbico crónico» a la aplicación contraproducente del LNTM por la ICRP (Antonov, 1989), llegando incluso a inculpar a esta Comisión de haberse dejado presionar por los líderes políticos durante la elaboración de las recomendaciones de 1990 (Rachinski, 1997).

Sin embargo, en *Realidades y mitos de Chernobyl* (1994), una de las primeras obras testimoniales de un científico sobre la tragedia, el académico Ilin apenas comenta las recomendaciones de 1990, tal vez porque ya entonces él pertenecía al comité principal de la ICRP (en su libro hay una foto tomada en 1993, donde aparece junto a los demás miembros de esa directiva). De hecho, el científico esgrime como prueba a favor de su concepción de los 35 rem que hubiera sido validada por varios expertos internacionales de esa Comisión, quienes visitaron la URSS formando parte de una delegación de la OMS en 1989. En cambio, dos años después, esa propuesta de Ilin fue desestimada por el ya mencionado International Chernobyl Project, cuya actuación bajo la égida del OIEA se limitó a proponer un conjunto de medidas interventoras que fueran lo más racionalmente posibles, luego de revisar los datos y métodos utilizados por los expertos soviéticos y cotejarlos con los conceptos y criterios manejados por la experticia occidental.

Según el informe técnico de ese proyecto, los costos económicos y sociales de las medidas adoptadas por el gobierno soviético hasta 1990 para restringir el consumo de alimentos fueron desmedidos al compararlos con el real beneficio para la salud por concepto de dosis evitada. El bloqueo de esos productos provocó una enorme escasez alimentaria, así como cambios injustificados en los patrones de alimentación que afectaron —sobre todo— a las poblaciones acostumbradas a abastecerse de su propia cosecha y crianza de animales. Más controversiales fueron las medidas de reubicación temporal y reasentamiento permanente; en primer lugar, porque se emplearon al unísono tres indicadores o criterios para justificar esos niveles de intervención: el valor anual de dosis permisible; el límite de dosis durante toda la vida, y el grado de contaminación superficial. El informe reconoce la ausencia en ese momento de un consenso internacional sobre cuál debía ser el criterio cuantitativo óptimo para decidir tales medidas de protección. No obstante —admite—, de haber existido tal consenso, aun así el nivel de intervención dependería de factores sociales y políticos muy difíciles de evaluar y que escaparían al alcance del sistema de protección radiológica (IAEA, 1991c).

Las opiniones críticas de Keirim-Markus y de Ilin expresan el desconuelo de esos reputados radioproteccionistas, al comprender que sus propuestas científicamente argumentadas quedaron desacreditadas y, en su lugar, prosperaban criterios subjetivos que eran compartidos por neófitos, diletantes y hasta especialistas de alto nivel de otros campos del conocimiento e, incluso, por radiobiólogos. Entre estos últimos había quienes mal interpretaron los cambios introducidos por la ICRP en su Publicación 60, o distorsionaron premeditadamente su significado para obedecer a los intereses políticos en juego. Al fin y al cabo, Ilin y Keirim-Markus exteriorizan la inconformidad y/o frustración de los expertos

soviéticos que, antaño reconocidos oficialmente, ahora veían a su propio gobierno darles la espalda para recurrir a la consultoría foránea. Quedaba así ignorada la capacidad y el prestigio de la tan celebrada «Ciencia soviética», cuyas contribuciones a la radiología y a la física de la salud habían sido avaladas por esa misma comunidad nuclear internacional, a la que ahora debía someterse por razones políticas, más que científicas.

Considerada la máxima autoridad en respuesta médico-radiológica a desastres nucleares, Ilin tuvo un papel protagónico durante la primera etapa de la tragedia y escribió su ya mencionado libro a modo de memorias y alegato. Este testimonio transmite cuán compleja resultó la relación entre la experticia científica y las autoridades gubernamentales de la Unión Soviética para la toma de decisiones en aquel escenario de incertidumbre radical que siguió a la primera explosión de un reactor nuclear civil en la historia, cuando todavía sus dimensiones catastróficas eran mantenidas en secreto para el resto del mundo. Veamos algunos de sus pasajes para ilustrar cómo los juicios de valor —en especial, los políticos— siempre resultarán decisivos durante el enfrentamiento a un desastre nuclear y sus consecuencias radiológicas a corto, mediano y largo plazos.

Para la protección de la población en caso de avería o ataque nuclear con liberación incontrolada de productos radiactivos, en la Unión Soviética había sido previsto desde la década de 1970 por el propio Ilin y sus colegas del Instituto de Biofísica un sistema de intervención en dos niveles, según fuera la dosis equivalente acumulada: 250 mSv (nivel B) y 750 mSv (nivel A). Cuando ocurrió la avería de Chernobyl, una vez que hubo conciencia de su alcance, bastó la medición de las radiaciones gamma en Prípiat, la ciudad a cinco kilómetros de la central electronuclear donde vivían sus trabajadores, para comprender que el máximo nivel A había sido alcanzado a pocas horas de ocurrido el accidente, pues las dosis superaban en 1000 veces el fondo radiactivo natural. Aun así, no fue hasta el 27 de abril por la tarde que fue evacuada urgentemente la mayoría de los pripiatenses (44 460), mientras que 5 mil se quedaron en la ciudad para ayudar en las labores de *likevidatsiya* (Ilin, 1994).

El académico Ilin considera totalmente injustificado que no se hubieran evacuado de inmediato al resto de las poblaciones hasta 10 km y, seguidamente, a toda la gente dentro de la llamada «zona de exclusión»: los 30 km circulares alrededor del epicentro de la catástrofe. No es hasta el 2 de mayo que se decreta la evacuación forzosa de las primeras 16 mil personas en aquel primer radio (10 km), cuando ya habían recibido dosis acumuladas entre 300-400 mSv y 500-700 mSv en algunas aldeas. A partir del 4 de mayo comenzó el traslado de las 40 mil restantes, pertenecientes al segundo radio —o sea, los 30 km—, para un total aproximado de 56 mil personas sacadas de sus lugares de residencia entre el 2 y 6 de mayo, excluyendo a los habitantes ya evacuados de Prípiat. Contando a estos últimos, desalojados el 27 de abril, fueron no menos de 100 mil evacuados en apenas diez días, sin que trascendiera ninguna información en los medios masivos de comunicación, ni se alertara al resto de las regiones sobre el peligro que se cernía sobre ellas por el avance de las nubes radiactivas.

Un factor crucial en el testimonio de Ilin es su convencimiento de que esa evacuación forzosa de la zona de exclusión (30 km) no fue decidida sobre la base de criterios

dosimétricos, si bien las mediciones ya arrojaban que la situación radiológica era muy grave, a pesar de que los datos eran confusos por la carencia de instrumentos adecuados y personal debidamente calificado. En su opinión, esa decisión fue adoptada cuando se valoró el escenario de que ocurriera un recalentamiento de la zona activa del reactor nuclear dañado y la posible destrucción de su basamento de hierro y concreto, debido a lo cual toda la masa ígnea de combustible, grafito y metal fundidos caería sobre el gran depósito de agua situado debajo de la instalación. Este desplome provocaría una explosión colosal a causa de un golpe térmico y la consiguiente liberación radiactiva. Esta hipótesis solamente fue descartada tras comprobarse que apenas había agua en dichos depósitos de la piscina de borboteo, perteneciente al sistema emergente de enfriamiento del RBKM-1000 en caso de la máxima avería por proyecto. Al respecto, resulta muy sugerente contrastar este criterio del radioproteccionista Ilin con las memorias del académico Legásov en su testimonio inconcluso (ver subacápite 2.4.5).

El mayor perjuicio de la evacuación tardía consistió en que los habitantes de la zona de exclusión, principalmente quienes vivían dentro del radio de 10 km, absorbieron grandes cantidades de yodo-131 en tiroides. Esto se agravó porque no fueron aplicadas las medidas profilácticas elementales: prohibir la ingestión de leche de granja; protegerse los órganos respiratorios durante el paso de la nube radiactiva, y suministrar tabletas de yoduro de potasio o agentes bloqueadores con yodo estable para impedir que su homólogo radiactivo se aloje en ese órgano. Como la vida media del yodo-131 es apenas unos ocho días, su actividad es muy alta en las primeras horas, de ahí que tales medidas preventivas deban ser adoptadas sin dilación. De lo contrario, el llamado «golpe de yodo» se convierte en el problema médico principal al afectar sobre todo a los niños, por ser más radiosensibles, al igual que el embrión o feto en la mujer embarazada. Una vez que se inhala o ingiere, el yodo radiactivo pasa a la circulación y termina concentrándose en la tiroides, provocando dosis muy altas de rayos beta en esa glándula. Según Ilin, hacia fines de agosto de 1986, unas 150 mil personas recibieron una dosis absorbida superior a 300 mGy, que era el límite acordado para iniciar la evacuación forzosa.

Mientras esto sucedía, desde el 30 de abril hasta el 2 de mayo, y en menor medida los días siguientes hasta el 6 de mayo, una masa de aire radiactivo habían llegado a Kíev, la capital de Ucrania, por lo que la inhalación del yodo-131 por su población debió ser considerable. Ajenos a esa realidad, totalmente desinformados, centenares de kievitas asistieron al desfile del primero de mayo, convocados por el primer secretario del PCUS en esa república, Volodomir Szherbitski. El académico Ilin invoca el criterio ALARA para explicar que la suspensión de ese desfile masivo clasificaría dentro de los factores sociales que debían haberse tenido en cuenta para que —según reza el principio de optimización— «la probabilidad de una exposición, el número de personas expuestas y la magnitud de sus dosis individuales sean tan bajas como sea razonablemente alcanzable». Sin embargo, aun cuando las autoridades conocían de los altos niveles de radiación desde la noche anterior (30 de abril), no se atrevieron a posponer el desfile por

motivos políticos, tratándose de la festividad más importante del movimiento comunista internacional, celebrada al unísono en todos los países socialistas.

Unos días después, correspondió a Ilin y al también reconocido académico Yuri Izrael, este a cargo de los servicios meteorológicos, expresar su veredicto *ipso facto* sobre si era necesario evacuar urgentemente a los cerca de tres millones de habitantes de Kíev, o, al menos, a los niños y mujeres embarazadas. Emplazados por el mencionado Szherbitski, los dos científicos debieron asumir toda responsabilidad por la decisión que debía tomarse, de modo que el primer secretario del PCUS pudiera transmitirla a Moscú. Al no haber registros sobre los niveles de concentración del yodo-131 en la capa de aire pegada al suelo, a partir solamente de las mediciones de la radiación gamma, ambos expertos infirieron que el riesgo de inhalación de ese radionucleido podía tolerarse, ya que la dosis absorbida en tiroides para cada individuo no excedería 300 mGy (0,3 Gy). Para evitar la ingestión de yodo radiactivo, ellos consideraron que bastaba controlar el consumo de productos contaminados; en especial, la leche de granja. Conociendo, además, que ya había sido descartada una nueva explosión del reactor nuclear, Ilin e Izrael dejaron plasmada en mensaje cifrado su decisión conjunta de que no era necesaria la evacuación forzosa.

Al ser desclasificada la información secreta sobre aquellos acontecimientos en 1990, ambos científicos fueron declarados persona *non grata* para Kíev durante una sesión del Soviet Supremo de Ucrania, esgrimiéndose que por su culpa todos los habitantes de esa ciudad habían quedado expuestos a la contaminación radiactiva durante los primeros días de la catástrofe. Treinta años después, se les ha llegado a reconocer justamente por lo opuesto: Ilin e Izrael salvaron a los kievitas al evitar una medida que hubiera causado mayores perjuicios que los presumibles daños radiológicos. Si toda esa población hubiera sido evacuada forzosamente, el costo hubiera sido invaluable no solo en términos económicos, sino sociales, psicológicos y políticos. A diferencia de la decisión gubernamental de convocar al desfile del primero de mayo, que incumplió el *principio de optimización de la protección*, el segundo episodio se atuvo al *principio de justificación*: cualquier decisión que altera la situación de exposición a la radiación debe ocasionar más beneficio que daño.

Los acontecimientos de Chernobyl revelaron la importancia crucial de la connivencia entre la experticia científica y los intereses políticos para la toma de decisiones en situación de exposición radiológica que supera cualquier pronóstico. Aunque la brusca reducción de los límites de dosis efectiva por la ICRP en sus recomendaciones de 1990 estuviera justificada por la revisión al alza de la estadística epidemiológica del Life Span Study, debió ser obvio que esta disposición de la experticia internacional tendría una repercusión política de gran envergadura al hacerse pública precisamente en aquella difícil coyuntura socioradioecológica. Ajenos a la filosofía práctica de la protección radiológica basada en el modelo lineal sin umbral (LNTM), no ya solo el amplio público laico, sino representantes de otras ramas científicas difícilmente podrían entender que esos nuevos límites de dosis efectiva se referían solo a la inferencia probabilística de riesgos plausibles para exposición planificada (o sea, bajo control). A interpretarlos erróneamente contribuyó la propia experticia al manejarlos durante

el cálculo de la dosis acumulativa para toda la vida en las zonas contaminadas, discrepando antagónicamente sobre cuál debía ser el valor numérico de este umbral : 350 mSv o 70 mSv.

Por ser un constructo matemático de carácter socioestadístico, cuya unidad de medida es imperceptible por los cinco sentidos humanos, la «dosis efectiva» solo puede ser interpretada como un indicador «virtual» del riesgo radiológico en la incertidumbre (ontológica y epistémica). Sin embargo, percibido por la opinión pública como un indicador de daños biológicos reales, ante la disyuntiva de vida o muerte, era inevitable que primara el juicio de valor «humanista», según el cual la mejor opción de protección radiológica sería siempre aquella que diera lugar a la dosis numéricamente más baja, aunque no hubiera conciencia de cuánto significaba la diferencia entre 1 y 5 mSv/año en términos de detrimento o gravedad para la salud. Tampoco había conciencia entonces de que la evacuación forzosa, la reubicación temporal y el reasentamiento permanente son acciones disruptivas que conllevan también un aumento de la probabilidad de otros importantes efectos perjudiciales de carácter psicosocial como la depresión crónica, la radiofobia y el estrés posttraumático. Esta condición dilemática bastaría para tipificar a Chernobyl —y, después, a Fukushima Daiichi— como catástrofes socioradioecológicas por sus consecuencias irreversibles para grandes conglomerados humanos, al transformarles radicalmente su vida.

### 3.5/ ¿Aceptabilidad o tolerabilidad?: el criterio ALARA en la encrucijada

Los juicios de valor (subjetivos) siempre han estado presentes durante la evolución del sistema internacional de protección radiológica, quedando implícitos en los diferentes criterios de dosis admisible: desde la dosis de tolerancia (*tolerance dose*), pasando por la máxima dosis permisible (*maximum permissible dose*), hasta el Sistema de Limitación de Dosis y sus magnitudes limitadoras (en especial, la dosis efectiva). No obstante, a tenor con la revisión de los resultados del Life Span Study y el enorme impacto social de Chernobyl, la Publicación 60 de la ICRP significó el reconocimiento tácito del carácter único del riesgo nuclear y radiológico por la complejidad conceptual y técnica de su evaluación con fines de protección. Esta complejidad se manifiesta en la diferenciación aún vigente de la relación dosis-efecto en tres zonas, según la inferencia causal que pueda —o no— probarse entre el nivel de exposición y la atribución del daño para la salud: mediante el reconocimiento clínico de patologías (zona I, de altas dosis); a partir de la confiabilidad de los datos epidemiológicos (zona II, de dosis medianas y relativamente altas), y reconociendo que persisten grandes divergencias en el campo de la radiobiología (zona III, de bajas dosis).

Estas divisiones zonales se corresponden con la variación del criterio de dosis admisible a la largo de la historia, siendo evidentes dos reducciones ostensibles en los años 1954 y 1991, respectivamente, sustentadas ambas en los resultados del Life Span Study (ver infografía 14). La primera reducción drástica de la dosis permisible ocurre al constatarse el aumento de la incidencia de leucemia en los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki y, en lo adelante, adoptarse el LNTM durante la coyuntura política internacional que siguió a la alarma pública por la proliferación de los ensayos



nucleares y el peligro de sus efectos perjudiciales (cancerígenos y genéticos) debido al aumento del fondo radiactivo global.

La segunda reducción ostensible — como ya explicamos pormenorizadamente — tuvo lugar cuando la revisión de los resultados del Life Span Study condujo a un recálculo inesperado por la ICRP del coeficiente de riesgo fatal global aproximado, haciéndose público en el momento que la Unión Soviética se enfrentaba a las consecuencias radiológicas de Chernobyl, mientras su sistema socioeconómico se abocaba al colapso. Vistas así, en perspectiva diacrónica, ambas reducciones de la dosis permisible corroboran que la gestión del riesgo nuclear y radiológico dependerá siempre de factores extracientíficos, incluyendo valores morales y éticos. En consonancia, la evolución histórica del Sistema de Limitación de Dosis trasluce el vínculo raigal entre la experticia científica y las instancias políticas que caracteriza al dominio de la fisión atómica, sin que pueda desligarse de su estreno bélico por primera y única vez en Hiroshima y Nagasaki.

### 3.5.1/ *Resumen diacrónico de las dosis permisibles*

Para ilustrar cuánto han variado los límites numéricos de las dosis permisibles, según las recomendaciones de la ICRP, puede establecerse una homologación aproximada entre las distintas magnitudes empleadas y sus unidades de medida (roentgen, rad, rem), unificándolas en sievert como si fueran un mismo tipo de exposición, independientemente de la eficacia biológica de los tipos de radiación y de la radiosensibilidad de los tejidos (Yablokov, 2002; OECD, 2009). He aquí esas variaciones resumidas por etapas:

*Etapas de la «dosis de tolerancia» (desde 1928 hasta 1954):* Acorde con el concepto de un umbral seguro por debajo del cual no existirían efectos dañinos de las radiaciones ionizantes, en 1928 fue propuesto el primer valor de dosis permisible a partir de la «dosis umbral eritematosa»: 0, 1 DUE por año, que hoy correspondería a 700-1560 mSv/año, según sea la conversión adoptada. Este valor se redujo hasta unos 300-500 mSv/año en 1934, cuando esa dosis de tolerancia se acordó en 0, 2 roentgen por día (60 R/año). La noción de dosis de tolerancia continuó empleándose y, en 1951, el ICRP propuso un límite de 0, 3 R/semana (15 R/año) para las radiaciones de baja LET, lo que representa unos 150 mSv/año. O sea, durante esa primera etapa de la protección radiológica, vinculada en sus inicios a la experiencia de los radioterapeutas, y, después, a la etapa secreta del proyecto Manhattan, la dosis admisible fue reducida unas diez veces, teniendo solo en cuenta los efectos que pueden ser clínicamente diagnósticos.

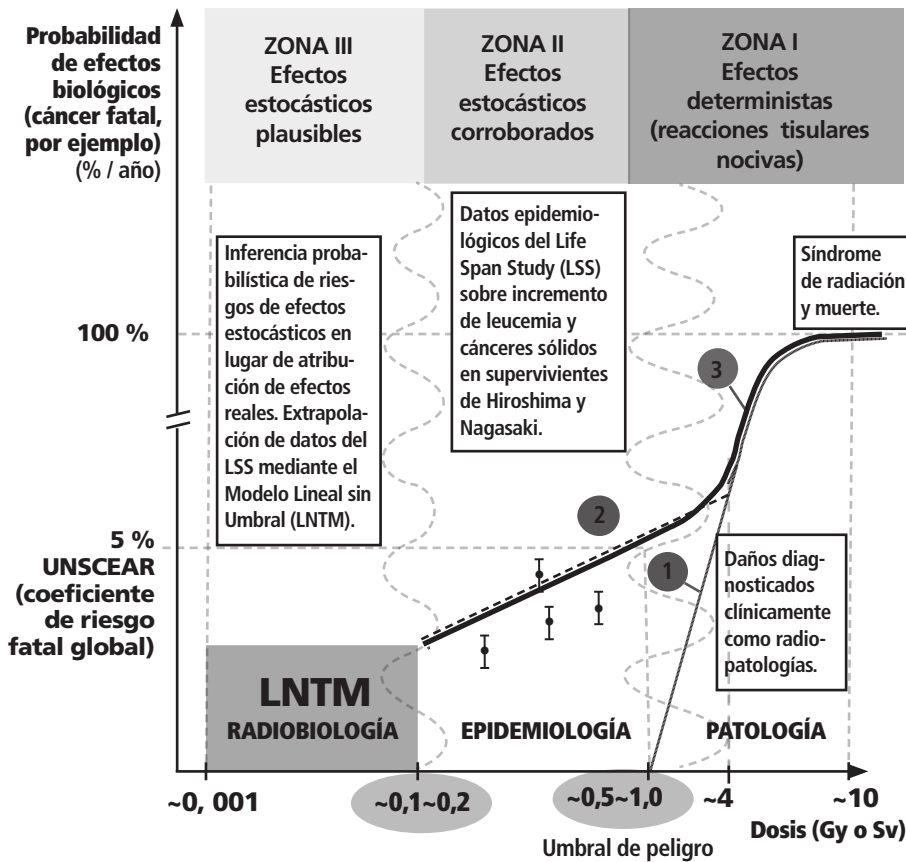
*Etapas de la «máxima dosis permisible» (desde 1954 hasta 1977):* En 1954 fueron reportados los primeros casos de leucemia en los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki. Entonces tuvieron que ser reconocidos los efectos tardíos estocásticos, así como la imposibilidad de demostrar la existencia de un umbral de exposición libre de riesgo. La dosis permisible de 15 R/año (150 mSv/año) fue reducida por el ICRP en su Publicación 1 (1959) y Publicación 6 (1964) a unas dosis anuales de 5 rem (50 mSv) para los trabajadores y de 0, 5 rem (5 mSv) para el público. Estos valores numéricos

La evolución histórica del Sistema de Limitación de Dosis ha quedado plasmada en la diferenciación de la relación dosis-efecto mediante tres zonas, según la inferencia causal que pueda —o no— probarse entre el nivel de exposición y la atribución del daño para la salud. Así, para una irradiación total del cuerpo, el diagnóstico clínico de patologías en individuos demuestra que los efectos deterministas (reacciones tisulares nocivas) comienzan por encima de una dosis absorbida de 0,5-1 Gy (curva 1 y zona I) hasta ser el único tipo de daños a partir de 4 Gy (curva 2).

Las zonas II y III, cuyos límites son ambiguos, corresponden a la inferencia probabilística de los efectos estocásticos, divididos en dos tipos: los que han sido constatados epidemiológicamente mediante estimación de frecuencia (bernulliana) por el Life Span Study (LSS) para medianas y altas dosis (zona II), y los que no han sido corroborados con suficiente rigor estadístico, pero su posible

aparición a bajas dosis es aceptada por el Modelo Lineal Sin Umbral (LNTM), si bien las teorías de la radiobiología divergen al respecto (zona III). La plausibilidad de estos efectos estocásticos se infiere por estimación subjetiva (bayesiana) a partir de la extrapolación lineal de los datos estadísticos del LSS hacia la zona III. De ahí que los límites de dosis efectiva por debajo de 0,1 Sv (100 mSv) sean solamente indicadores «virtuales» para minimizar el riesgo de cáncer (fatal y no fatal), así como de enfermedades hereditarias, ya que no dan ninguna constancia de su ocurrencia real.

La curva 3 es la resultante de las curvas 1 y 2, si bien las zonas I y II se solapan en un rango ambiguo entre 0,5-1 Sv y 4 Sv, donde lo mismo pueden ocurrir reacciones tisulares que efectos estocásticos. A fin de cuentas, esta diferenciación por zonas es bastante relativa porque los daños dependen también de la tasa de dosis recibida y de la radiosensibilidad del organismo, entre otros factores.



—Zona I (> 0,5-1 Gy): Por encima de este valor umbral ocurren las reacciones tisulares nocivas, cuya gravedad aumenta a partir de 4 Gy hasta provocar siempre la muerte por encima de 10 Gy. El límite de dosis se expresa mediante la dosis absorbida promedio en órgano ( $D_T$ ) y, cuando están involucradas radiaciones de alta LET, mediante la dosis absorbida ponderada según EBR para órgano o tejido ( $AD_T$ ). Esta magnitud fue introducida por el OIEA en 2004.

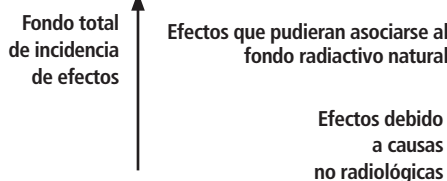
—Zona II (entre 100-200 mGy y 0,5-1 Gy): efectos estocásticos constatados por el LSS, como leucemia y cánceres sólidos. En este rango también pudieran producirse opacidad del cristalino (catarata) y daños potenciales al embrión/ feto. Para evitarlos se establecen límites en dosis equivalente  $H_T$  (milisievert, mSv).

—Zona III (por encima del fondo natural hasta 100 mGy): inferencia probabilística de riesgo de efectos estocásticos en límites de *dosis efectiva* E (milisievert, mSv), extrapolando datos del LSS con arreglo al LNTM.

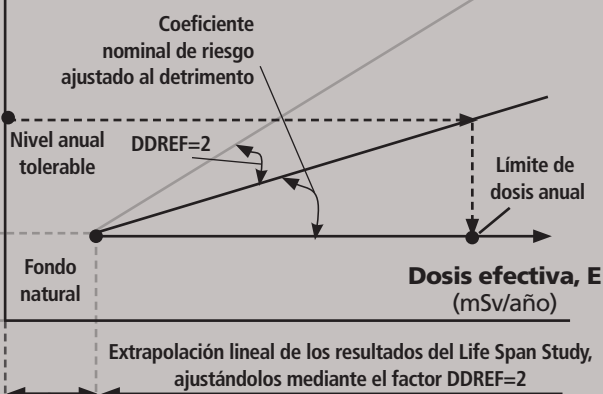
**INFERENCIA PROBABILÍSTICA DE RIESGOS DE EFECTOS ESTOCÁSTICOS, APLICANDO MODELO LINEAL SIN UMBRAL (LNTM)**

Expresados en la magnitud de dosis efectiva (E), los límites de dosis para efectos estocásticos (cancerígenos, específicamente) se atienen al nivel superior de la «tolerabilidad» (*tolerability*) del riesgo en la sociedad.

$$\text{Límite de dosis anual (mSv/año)} = \frac{\text{nivel de riesgo anual tolerable (\% / año)}}{\text{coeficiente nominal de riesgo ajustado al detrimento (\% / mSv)}}$$



**Probabilidad de efectos biológicos (Ejemplo: muertes por cáncer, % / año)**

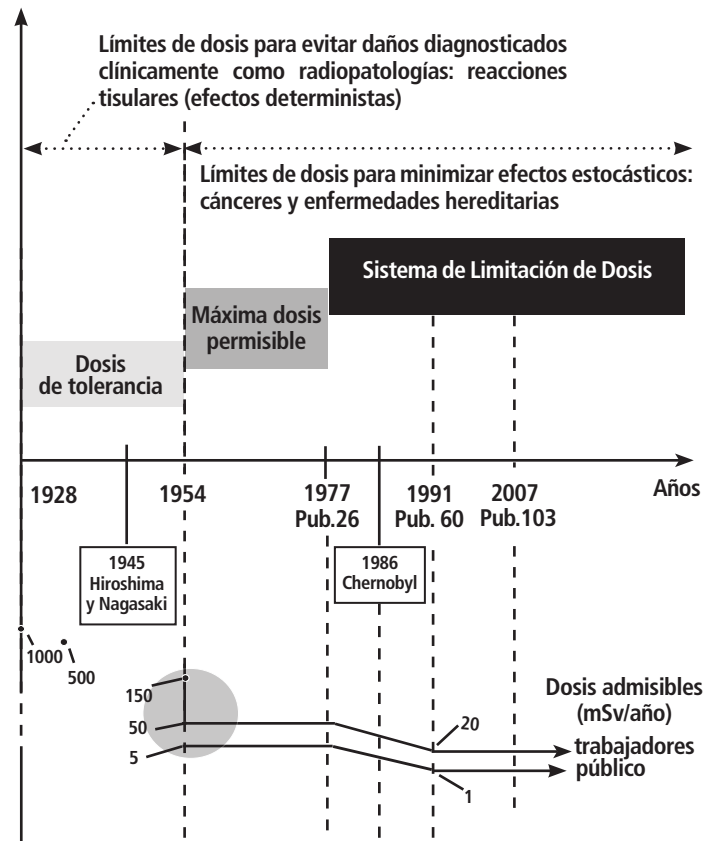


La dosis anual del fondo natural es 2,4 mSv como promedio a nivel global, oscilando entre 1 y 10 mSv/año según el lugar, la altura y otros factores.

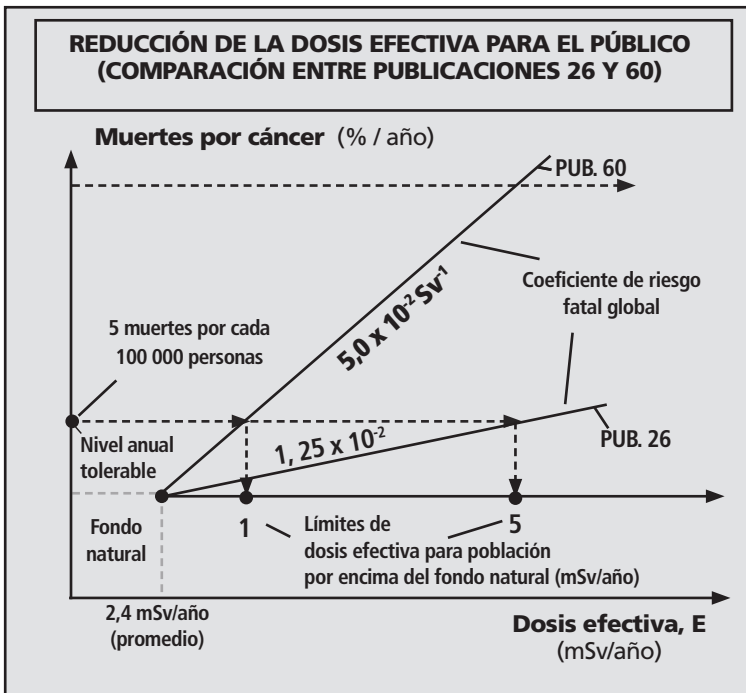
Fuentes utilizadas: González, A. (1994, 2002), Lochard, J. (2011, 2015) e ICRP (1977, 1991, 2007), entre otras.

## VARIACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DOSIS ADMISIBLE

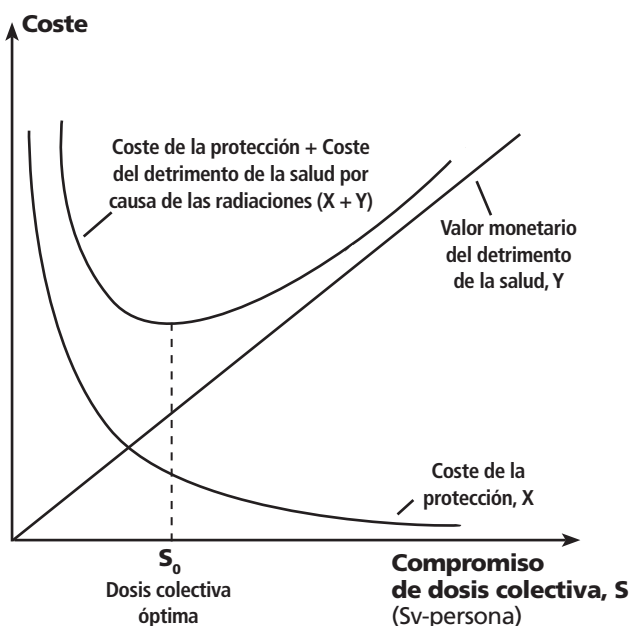
- Etapa de la «dosis de tolerancia» (desde 1928 hasta 1954): uso de la *exposición* (roentgen) y, después, de la *dosis RBE en rem*, mensurando la dosis absorbida en rep o rad (ver infografía 11).
- Etapa de la «máxima dosis permisible» (desde 1954 hasta 1977): la dosis RBE en rem es sustituida en 1962 por el equivalente de dosis (*dosis equivalente*), expresado también en rem. Comienza a aplicarse el LNTM para cualquier dosis superior al fondo radiactivo natural.
- Etapa del Sistema de Limitación de Dosis (desde 1977 hasta la actualidad): son definidas las *magnitudes limitadoras* para efectos estocásticos (cancerígenos y hereditarios) en la Publicación 26 (ICRP, 1977). Tras ser reformuladas en la Publicación 60 (ICRP, 1991) como *dosis equivalente* y *dosis efectiva*, sus factores ponderales ( $w_R$  y  $w_T$ ) fueron actualizados en la Publicación 103 (ICRP, 2007).



Cuando se analiza en plan diacrónico la evolución de los diferentes criterios de «dosis admisible» y la reducción sostenida de sus valores límites por la ICRP, puede afirmarse que los juicios de valor (subjetivos) siempre han estado implícitos: desde las *tolerance dose* hasta el proceso de inferencia probabilística del riesgo de efectos estocásticos como *dosis efectiva*. Esos juicios de valor se acentuaron cuando se produjo la convivencia entre la experticia científica y los grupos políticos ante la alarma pública por los ensayos nucleares militares y debido a la incertidumbre social que primó durante los cinco años siguientes al desastre de Chernobyl en 1986. De ahí pueden colegirse las dos bruscas reducciones de la dosis admisible en 1964 y 1991, respectivamente.



## APLICACIÓN DEL PRINCIPIO DE OPTIMIZACIÓN (ALARA) PARA EXPOSICIONES PLANIFICADAS EN PUBLICACIÓN 26



A partir de la Publicación 26, el sistema de protección radiológica se fundamenta en tres principios: justificación, optimización y aplicación de los límites de dosis. Y si bien se reconoce como Sistema de Limitación de Dosis, su filosofía práctica se rige por el segundo principio: «la probabilidad de una exposición, el número de personas expuestas y la magnitud de sus dosis individuales deben ser mantenidas «tan baja como sea razonablemente alcanzable» (*As Low as Reasonably Achievable, ALARA*), teniendo en cuenta los factores económicos y sociales» (ICRP, 1977).

El criterio ALARA comenzó aplicándose en términos de coste-beneficio solamente a las exposiciones planificadas; o sea, bajo control garantizado. Su objetivo es reducir la dosis efectiva colectiva  $S$  hasta que cualquier medida adicional de protección radiológica ya no resulta razonable, pues el costo de la inversión excede el beneficio por reducción de posibles daños a la salud. No obstante, siempre han existido grandes dudas sobre el valor monetario de la salud (precio del Sv-persona), máxime cuando se trata de aplicar ese principio de optimización a grandes poblaciones expuestas a bajas dosis/tasas de dosis después de un accidente nuclear como Chernobyl (ver infografía 15).

diferenciados ya fueron establecidos basándose en la aplicación del LNTM con arreglo a los primeros resultados del Life Span Study (LSS). Esta brusca reducción, en cinco veces para los trabajadores y 30 veces para el público, respondió a la alarma mundial por las pruebas nucleares militares en la atmósfera, detenidas en 1964. Esos límites de dosis fueron confirmados al implementarse oficialmente en 1977 la noción de dosis efectiva y la aplicación del criterio de optimización (ALARA).

*Etapas del Sistema de Limitación de Dosis (desde 1977 hasta la actualidad):* Una revisión al alza del riesgo de los efectos estocásticos estimados por el LSS, conllevó en 1990 a la disminución de las dosis permisibles hasta 20 mSv/año y 1 mSv/año para la exposición planificada (ocupacional y público en general); o sea, una reducción brusca en 2, 5 veces para los trabajadores y en cinco veces para el público. Hemos relacionado esta decisión de la ICRP con los sucesos de Chernobyl y el derrumbe inminente de la Unión Soviética. Estos límites de dosis efectiva fueron corroborados en 2007 por la ICRP en su Publicación 103, aunque los coeficientes nominales de riesgo ajustados al detrimento para efectos estocásticos por exposición a bajas dosis/tasas de dosis volvieron a ser recalculados.

Esta más reciente revisión se caracterizó por la notable disminución del coeficiente de riesgo para los efectos heredables en seis y ocho veces para toda la población expuesta (niños incluidos) y para los adultos, respectivamente, al considerar que no hay evidencia directa de que la exposición de madre y padre a la radiación conduzca a un exceso de ese tipo de enfermedad en la progenie (ver tabla 2). No obstante, la ICRP consideró que se había mantenido inalterado el detrimento combinado junto a los cánceres (fatales y no fatales), por lo que redondeó el coeficiente nominal genérico de riesgo o *coeficiente de riesgo fatal global* a 5 % por Sv recibido, tal y como en la Publicación 60. Es por eso que también los límites de dosis efectiva se mantuvieron idénticos en la Publicación 103 hasta la actualidad:

—20 mSv/año para la exposición ocupacional, promediándolo en períodos definidos de cinco años oficiales consecutivos (o sea, 100 mSv acumulados en cinco años), con la condición adicional de que no debe exceder los 50 mSv en ninguno de los años individuales.

—1 mSv/año para el público, si bien persisten las dudas de que esta limitación proteja a niños y mujeres embarazadas, tras ser reconocida una mayor radiosensibilidad del embrión o feto en las distintas etapas del desarrollo intrauterino (UNSCEAR, 2012).

En síntesis: desde que en 1925 comenzó a ser regulado oficialmente, el valor de la dosis permisible ha sido reducido por el ICRP en no menos de 50 veces para la protección ocupacional (de unos 1000 a 20 mSv/año), mientras que para el amplio público en unas 1000 veces (de unos 1000 a 1 mSv/año). Desde que fueron reconocidos los efectos estocásticos y comenzó a aplicarse el LNTM, la disminución ha sido en 7, 5 veces (de 150 a 20 mSv/año) para los trabajadores, y en 150 veces (de 150 a 1 mSv/año) para el público. Aunque son estimados imprecisos, dada la ambigüedad de las magnitudes radiológicas y sus unidades de medida, así como por las incertidumbres implícitas en el cálculo de las dosis permisibles, el análisis diacrónico de cómo dicho valor límite ha sido reducido sostenidamente confirma el carácter único del riesgo nuclear y radiológico.

### 3.5.2/ Generalización del criterio ALARA a los accidentes nucleares

Luego de la brusca reducción de los límites de dosis efectiva en la Publicación 60 (ICRP, 1991), aunque el Sistema de Limitación de Dosis apenas tuvo variaciones numéricas para exposiciones planificadas, el sistema de protección radiológica —visto como un todo— tuvo una importante transformación conceptual cuando aquellas recomendaciones fueron reemplazadas por la Publicación 103 (ICRP, 2007). Estas directrices de la ICRP se diferencian entre sí porque la primera aplica un «enfoque basado en procesos» (*process-based approach*), mientras que la segunda adopta un «enfoque basado en situaciones» (*situation-based approach*). Este cambio de perspectiva conceptual obedece a que tales recomendaciones fueron emitidas a los cinco y veinte años —respectivamente— de haberse producido el desastre de Chernobyl. Durante los tres lustros que mediaron entre una y otra publicación de la ICRP había variado radicalmente el contexto sociopolítico internacional y, al conmemorarse el vigésimo aniversario de la tragedia en 2006, se hicieron públicos los resultados del llamado Foro de Chernobyl sobre la evaluación de sus consecuencias radiológicas<sup>33</sup>.

Acometido bajo la égida del OIEA, con la participación protagónica de expertos del UNSCEAR, ese programa de investigación concluyó categóricamente que los daños radioinducidos por aquel desastre habían sido sobredimensionados y no se reportaban grandes perjuicios sobre la salud de los afectados, ni siquiera en los territorios más contaminados en las antiguas repúblicas soviéticas, devenidas países independientes desde 1991: Bielorrusia, Ucrania y Rusia. Al clasificarlo como «accidente muy grave», quedó manifiesto que la OIEA nunca le concedería la categoría de «catástrofe», aunque reconociera sus enormes consecuencias sociales, económicas, institucionales y políticas. Chernobyl era considerado un capítulo cerrado —incluso en Rusia—, mientras se avizoraba el renacimiento de la energética nuclear hasta que se complicó luego de Fukushima Daiichi.

Basándose en las recomendaciones del International Chernobyl Project<sup>34</sup>, la Publicación 60 había adoptado el criterio de *intervención* para afrontar los accidentes nucleares separadamente de las situaciones planificadas (*prácticas*), en tanto se esclarecían las consecuencias radiológicas de aquella tragedia. Quince años después, a raíz del Foro de Chernobyl, en la Publicación 103 ya se generaliza explícitamente el criterio ALARA como filosofía práctica de optimización a toda situación de exposición, aunque se haya perdido el control de la fuente radiactiva a gran escala. Este segundo enfoque o «criterio único» responde a la siguiente visión paliativa: aun cuando se haya producido una gran liberación irreversible de radionucleidos artificiales, es posible evitar los daños radiológicos si se actúa previsoramente y, de proponérselo, recuperar las condiciones de vida hasta volver a una situación normal en los territorios contaminados. Sobre esta base, fueron concebidas la Publicación 109 para la protección de las personas en situación de emergencia radiactiva

<sup>33</sup>El Foro de Chernobyl fue fundado en 2003 por la ONU, reuniendo un grupo de sus agencias bajo la égida del OIEA. Su informe científico fue publicado en 2005 y, al año siguiente, apareció una versión revisada que se considera la definitiva.

<sup>34</sup>El International Chernobyl Project se formó en 1990 a solicitud del gobierno soviético para evaluar la situación ambiental y de salud en las áreas contaminadas, así como las medidas tomadas para proteger a los damnificados. Su informe científico con conclusiones y recomendaciones fue presentado en mayo de 1991 en Viena.

(ICRP, 2009b) y la Publicación 111 para aquellas que viven en zonas contaminadas a largo plazo (ICRP, 2009a). Ambos documentos insisten en que, aunque resulte muy complejo por el alto grado de incertidumbre, es posible optimizar una estrategia de protección con la participación de las autoridades y las personas interesadas (*stakeholders*) más relevantes; en primer lugar, los propios afectados.

Sin embargo, al ocurrir la tragedia de Fukushima Daiichi en 2011, todavía esas recomendaciones de la ICRP eran revisadas por el OIEA con vistas a integrarlas en sus normas básicas internacionales de seguridad (NBS) para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación. Mientras tanto, seguían en vigor las NBS emitidas en 1996, cuyo contenido se basa en la Publicación 60 y los valores numéricos de dosis para niveles de intervención (IAEA, 1996b). Aun así, al tener que aplicar las acciones de protección con carácter urgente, la autoridad reguladora japonesa optó por atenerse a la Publicación 103, mezclando erráticamente ambos enfoques de protección (basado en procesos y basado en situaciones). La evacuación precipitada de unas 150 000 personas provocó una gran cantidad de defunciones entre personas de edad avanzada, además de graves efectos psicosociales como el «autoestigma radiactivo». Este severo impacto social a corto plazo superó los presumibles detrimentos a mediano y largo plazos sobre la salud (cáncer de tiroides, en primer lugar) por exposición a bajas dosis/tasas de dosis de radiación (Kai, 2013; Hatanaka *et al*, 2014).

Aunque existen grandes similitudes entre Chernobyl y Fukushima Daiichi en cuanto a la indefensión de los damnificados, se trata de sucesos muy diferentes cuando se analizan desde la perspectiva de las recomendaciones de la ICRP. En el primer caso se trata de un desastre sin precedentes que superó toda expectativa imaginable, acentuado por el secretismo gubernamental sobre sus consecuencias radiológicas durante los primeros cinco años de ocurrido. La Publicación 60 fue concebida *a posteriori* y su aplicación sirvió para cuestionar las decisiones de la experticia oficial soviética, con el factor añadido de desatar una enorme polémica social debido a la brusca reducción de los límites de dosis admisible por la ICRP debido a un reajuste de los datos epidemiológicos del LSS, si bien esta novedad se restringía a las situaciones planificadas y en nada concernía a una situación postaccidental (ver subacápite 3.4.3).

Otra es la significación de Fukushima Daiichi, ya que puso en evidencia las contradicciones intrínsecas del sistema de protección radiológica, cuya transformación conceptual en la Publicación 103 para la generalización del criterio ALARA a los accidentes nucleares se prestó a grandes equívocos entre los propios radioproteccionistas japoneses. Esta disfuncionalidad creó una gran confusión en el amplio público y los tomadores de decisiones a niveles gubernamental y local, superando en repercusión mediática a los estragos causados por el sismo y tsunami. A su condición de triple desastre (terremoto-tsunami-crisis nuclear) se añade que Fukushima Daiichi también fue un «desastre informativo» debido al exceso de información discordante sobre la cuantificación del riesgo radiológico (Hatanaka *et al*, 2014).

A instancias de la propia ICRP fueron creados los grupos de trabajo TG84 y TG93 para un análisis «autocrítico» —a modo de lecciones aprendidas— que esclareciera los errores cometidos con el ánimo de corregirlos (González *et al*, 2013; Lochard, 2015; Homma, 2018). También fueron editadas en japonés todas las recomendaciones más importantes emitidas por esa Comisión a lo largo de su historia, ya que una de las problemáticas más acuciantes fue el embrollo con las magnitudes y unidades de radiación, agudizadas por las dificultades de traducción. Por último, la tragedia de Fukushima Daiichi ha llevado a recapacitar sobre las nociones de «tolerabilidad» y/o «aceptabilidad» del riesgo radiológico que, abordadas en la Publicación 60, fueron obviadas en la Publicación 103. Es lo que trataremos como conclusión de esta panorámica histórica y conceptual de la protección radiológica.

#### *Publicación 60: enfoque basado en procesos*

Poco antes de ocurrir los sucesos de Chernobyl, el problema de la tolerabilidad y/o aceptabilidad del riesgo nuclear y radiológico estaba siendo tratado por una encuesta pública sobre la construcción del primer y único reactor nuclear de agua a presión PWR en Reino Unido, en la localidad de Sizewell (O’Riordan *et al*, 1985). Esa investigación interpelaba tanto a científicos sociales como a expertos nucleares británicos, cuando se produjo aquel desastre y se conocieron los primeros informes soviéticos sobre sus causas. Entonces fue concebido el modelo «Tolerability of Risk» (ToR) en 1988 por la Health and Safety Executive y la Royal Society para cuantificar numéricamente el criterio ALARP (As Low As Reasonably Practicable); o sea, «tan bajo como sea razonablemente practicable»<sup>35</sup>. El ToR se fundamenta en esta ambigua distinción entre «tolerabilidad» y «aceptabilidad» del riesgo:

La “tolerabilidad” no significa “aceptabilidad”. Tolerabilidad se refiere a la disposición para vivir con un riesgo para asegurar beneficios, entendiendo que dicho riesgo se controla apropiadamente. “Tolerar” un riesgo no significa que se considera insignificante o algo que podemos ignorar, sino algo que es necesario revisar y reducir aún más, si podemos y cuando podamos. Por otro lado, un riesgo será “aceptable” para fines de la vida o del trabajo, cuando significa que estamos prestos a admitir que ya está bien así (HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, 1988: 2).

Aprovechando las herramientas del ToR, la ICRP renunció a la división tajante entre «riesgo inaceptable» (*unacceptable risk*) y «riesgo aceptable» (*acceptable risk*) de la Publicación 26 (ICRP, 1977) para agregar la noción intermedia de «riesgo tolerable» (*tolerable risk*) en la Publicación 60, alertando que esas líneas separadoras no pueden entenderse como una frontera entre lo «peligroso» y lo «seguro» (ICRP, 1991). Esta salvedad reconoce los factores subjetivos que intervienen en el proceso de inferencia probabilística del riesgo radiológico para bajas dosis/tasas de dosis con arreglo al LNTM. Por tanto, la Publicación 60 es la que fundamenta el deslinde entre las nociones de tolerabilidad y de aceptabilidad del riesgo radiológico: el riesgo tolerable se vincula con el principio de limitación (mantener los valores

---

<sup>35</sup> Aunque difieren en determinados matices, los criterios ALARP y ALARA pueden considerarse homólogos.

numéricos de dosis efectiva por debajo de los límites estipulados), mientras que el riesgo aceptable solamente puede ser resultado del proceso de optimización, el cual depende de factores sociales y económicos. A partir de este discernimiento para una situación planificada o *práctica* (fuente controlada), quedó establecido un sistema de protección radiológica bicéfalo o de «dos velocidades» para diferenciarla de una situación de emergencia radiactiva o *intervención* (fuente no controlada), cuando se actúa en condiciones de riesgo inaceptable que pueden afectar a grandes conglomerados humanos (ver infografía 15).

El principio de limitación se aplica solamente a las prácticas porque la dosis recibida puede reducirse en forma planificada por debajo de los límites dispuestos con respecto a las fuentes reguladas (por ejemplo: la exposición con fines de diagnóstico médico a rayos X, resonancia magnética u otra tecnología nuclear). Se excluye toda aquella exposición debida a fuentes existentes en el medio ambiente que se encuentran desprovistas de control, como sucede con la radiación natural de fondo y la presencia de radón en los edificios. Seguidamente, el proceso de optimización consiste en seguir reduciendo las dosis efectivas por debajo de los valores numéricos que han sido propuestos como «restricciones de dosis» (*dose constraint*) hasta donde sea razonablemente alcanzable y, de esta manera, conseguir el riesgo aceptable o nivel ALARA.

Por estar siempre expuestos a la radiación ionizante debido a sus ocupaciones, un buen ejemplo de la aplicación del criterio ALARA como filosofía práctica de optimización son los propios trabajadores de las centrales atómicas, minas de uranio y plantas para el reprocesamiento del combustible irradiado. Aunque en estos complejos existe un estricto control sobre las vías de exposición a las fuentes radiactivas, se inculca la necesidad de optimizar las dosis efectivas para cada situación planificada que surja: una operación de mantenimiento, pongamos por caso. Los trabajadores nucleares se adaptan mentalmente a esas exigencias para conseguir el riesgo aceptable, porque están conscientes de que las circunstancias laborales influyen decisivamente sobre su estado de salud (Cram, 2016). Este «ambiente» de optimización viene acompañado por un seguimiento obligatorio de esos colectivos laborales mediante el diagnóstico temprano de enfermedades con métodos de cribado (*screening*).

Las *intervenciones* corresponden a aquellos casos cuando, ya habiéndose producido la pérdida de control de la fuente radiactiva, los daños únicamente pueden mitigarse mediante la aplicación de algún tipo de acción o medida protectora sobre las vías de exposición o los potenciales afectados, en tanto se recupera el control de la fuente. No queda más remedio que renunciar al principio de limitación, fijando otros referentes numéricos más elevados de dosis admisible, por encima de los cuales debe decidirse cómo «intervenir» en auxilio de la gente para evitar los efectos deterministas graves y restringir los efectos estocásticos. Estos niveles de intervención (*intervention levels*) quedaron planteados por primera vez en la Publicación 60, considerando las recomendaciones del Chernobyl International Project (IAEA, 1991).

Criterios tales como «dosis anual», «promedio de dosis durante un cierto período de tiempo», y «nivel de contaminación radiactiva» fueron revisados críticamente a partir de



las lecciones que arrojó el primer quinquenio posterior a esa tragedia en la entonces Unión Soviética. Paralelamente fueron introducidos los nuevos criterios de «dosis proyectada» (*projected dose*), «dosis residual» (*residual dose*), «dosis evitable» (*avertable dose*) o «dosis evitada» (*averted dose*) para evaluar el resultado de las intervenciones. Sus valores numéricos aparecieron en la Publicación 63 (ICRP, 1992), que sustituyó a la Publicación 40 (ICRP, 1984), y estos fueron adoptados con ligeras variaciones por el OIEA en su primera guía de seguridad después de Chernobyl sobre los criterios de protección radiológica para los casos de emergencia nuclear. También sirvieron de base para las ya mencionadas normas básicas de seguridad emitidas en 1996 (OIEA, 1994; IAEA, 1996b; Crick, 1996). Tales criterios de intervención volvieron a ser tratados por la ICRP para el caso de las exposiciones prolongadas en la Publicación 82 (ICRP, 1999).

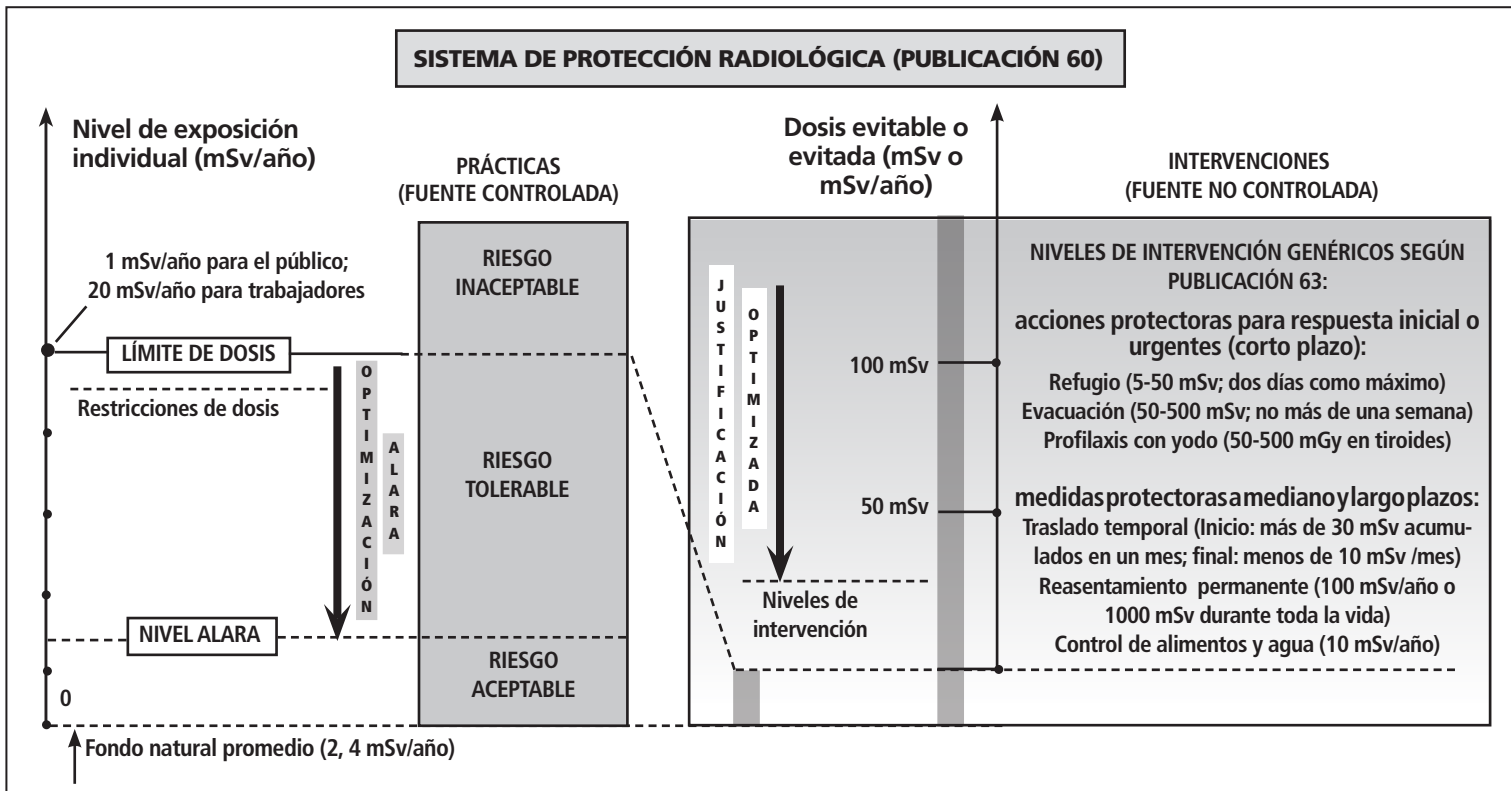
La cantidad relevante para los efectos deterministas es la «dosis proyectada», que sería la dosis recibida durante un tiempo de significancia biológica, si no se adoptara ninguna contramedida. A partir de esta magnitud, previendo también los efectos estocásticos, se consideran los criterios cuantitativos de «dosis evitable» (o «dosis evitada») como los mejores indicadores para elegir los niveles de intervención. Por «dosis residual» (*residual dose*) (dosis proyectada menos dosis evitada) se entiende aquella que se espera recibir después que termine la acción protectora o porque se decidió interrumpirla o no implementarla (ver infografía 15).

Para respuesta inicial o urgente (corto plazo), hay tres medidas principales que definen las situaciones en las que se clasifica una emergencia: refugio, profilaxis radiológica (pastillas de yodo) y evacuación. Entre las medidas a mediano y largo plazo, estarían el traslado temporal o el reasentamiento permanente, la prohibición de consumir alimentos y agua potable de la zona, y las labores de descontaminación radiactiva. Por ejemplo, en la Publicación 63 aparece como contramedida justificada que el traslado temporal debe iniciarse cuando la dosis evitable fuese más de 30 mSv recibidos durante el primer mes, y de debe concluir cuando ya fuera menor de 10 mSv. Si es poco probable que se lograra esa dosis evitada en el transcurso de un año o dos, la población debía ser reasentada con carácter permanente, lo que es obligatorio para una dosis recibida de 1 Sv durante toda la vida (ICRP, 1992). Es muy significativo que este valor supera a la propuesta de 350 mSv que, apenas dos años antes, había causado tanto rechazo en la Unión Soviética.

Esos valores indicativos de dosis evitada en la Publicación 63 no se basan en ningún juicio de aceptabilidad o tolerabilidad. Resultan de consideraciones genéricas sobre los beneficios y perjuicios de la medida o acción protectora, cumpliendo con el principio de justificación en primera instancia: cualquier intervención debe hacer más bien que mal. Quiere decir: la evitación del detrimento asociado a la radiación debe superar el coste económico y social de la acción disruptiva. Dicho principio de justificación se cumplirá siempre cuando la dosis absorbida (o equivalente) pueda superar el umbral de efectos deterministas y provocar síndrome de irradiación aguda; cuando exista peligro de afectaciones severas a la mujer embarazada con riesgo de aborto por diversas causas,

A l ser concebido originalmente para situación de exposición planificada en la Publicación 26 (ICRP, 1977), el Sistema de Limitación de Dosis no estaba apto para afrontar el escenario de liberación radiactiva que provocó Chernobyl. Cinco años después, la ICRP adoptó un «enfoque basado en procesos» (*process-based approach*) en la Publicación 60 (ICRP, 1991) para evitar que se confundieran la gestión del riesgo en situación planificada (*práctica* o fuente controlada) con la situación durante una emergencia nuclear o radiactiva (*intervención* o fuente no controlada). Así quedó un sistema de protección radiológica bicéfalo o de «dos velocidades».

Sin embargo, dos décadas después de aquella tragedia, la ICRP implementó un «enfoque basado en situaciones» (*situation-based approach*) en la Publicación 103 (ICRP, 2007) para generalizar el criterio ALARA como filosofía práctica de optimización a los casos de desastre nuclear y/o radiactivo. Este cambio conceptual asume que, a largo plazo, puede alcanzarse una dosis recibida «tan baja como sea razonablemente alcanzable» en los territorios contaminados. Esas recomendaciones se pusieron a prueba durante los sucesos de Fukushima en 2011, pero todo hace indicar que su desafortunada aplicación provocó males mayores que beneficios a los afectados.

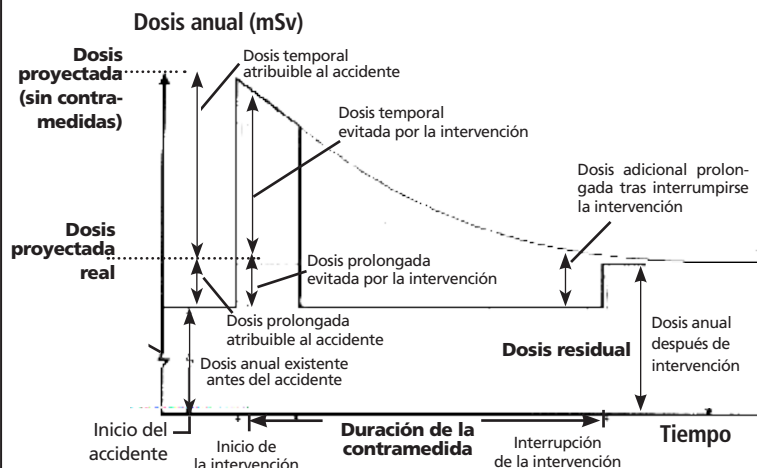


Según la Publicación 60, cuando una fuente de radiación funciona bajo control y la exposición de las personas ocurre según lo planificado (*prácticas*), el riesgo radiológico se gestiona con arreglo a los límites de dosis efectiva. Ellos son el tope entre las nociones subjetivas de «riesgo inaceptable» (*unacceptable risk*) y «riesgo tolerable» (*tolerable risk*), por debajo del cual se establecen «restricciones de dosis» (*dose constraint*) hasta cierto punto admisibles, aunque no sean satisfactorias del todo. El proceso de optimización consiste en seguir reduciendo las dosis efectiva por debajo de los valores numéricos de las restricciones de dosis hasta donde sea razonable socioeconómicamente y, de esta manera, conseguir el «riesgo aceptable» (*acceptable risk*) o nivel ALARA.

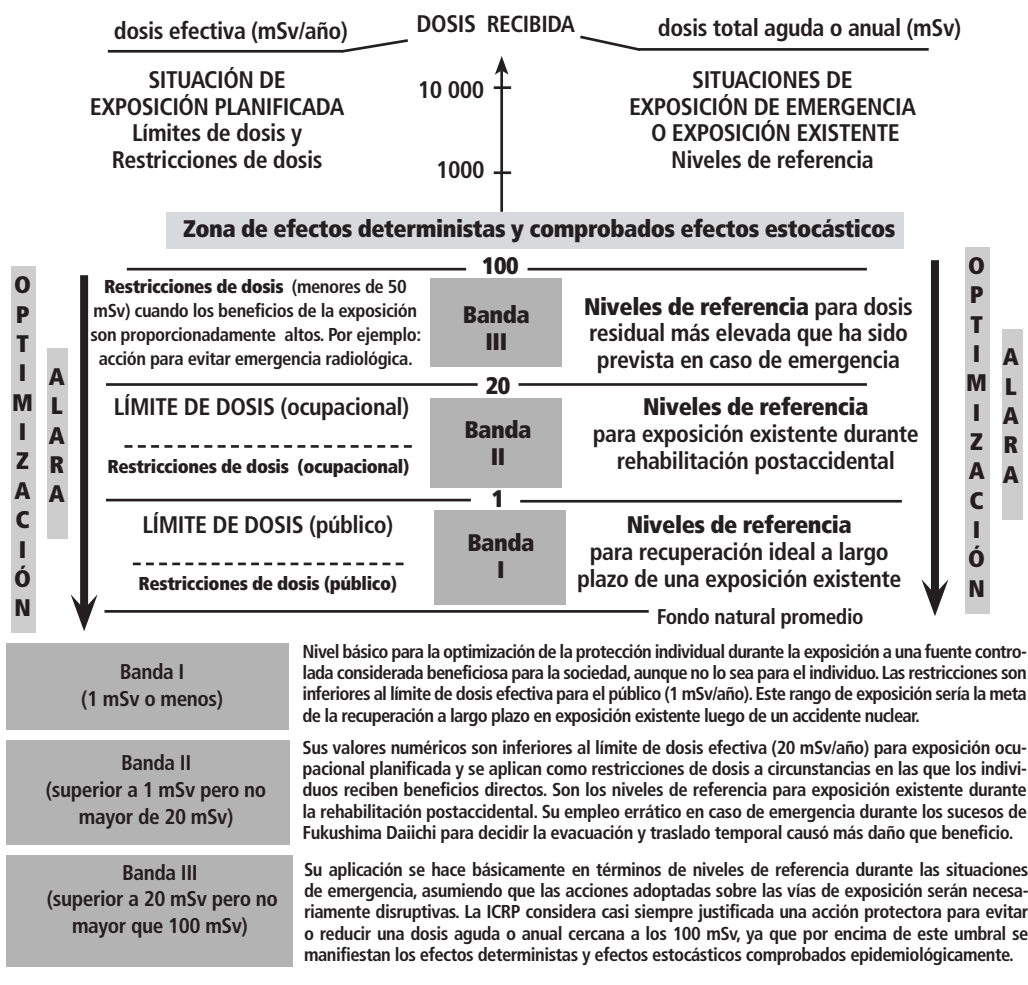
En el caso de las *intervenciones* (fuente no controlada), se tiene en cuenta que ya se ha producido la liberación de radionucleidos artificiales, por lo que hay que fijar valores numéricos de dosis más elevados («niveles de intervención»), renunciando al principio de limitación, aunque ateniéndose a los principios de justificación y optimización. Por esta última se entiende el proceso de maximizar el beneficio neto por evitación de posibles daños radioinducidos, comparándolo con los costos que provoca la contramedida en el estilo de vida de los afectados. O sea, se trata más bien de una «justificación optimizada». Una vez lograda la dosis evitada, cesa la medida de protección y no se prevé reducción de la dosis residual.

### CRITERIOS DE INTERVENCIÓN (PUBLICACIONES 63 Y 82)

La Publicación 63 (ICRP, 1992) definió como «dosis proyectada» (*projected dose*) aquella que resulta si no se adopta ninguna intervención. En función de su duración y costo, cada contramedida individual debe estar justificada y optimizada con arreglo a la «dosis evitable» (*avertable dose*) o «dosis evitada» (*averted dose*). La «dosis residual» (*residual dose*) es aquella que se espera recibir a partir de que culmine esa intervención. En la Publicación 82 (ICRP, 1999) se ajustaron estos conceptos al caso de las exposiciones prolongadas.



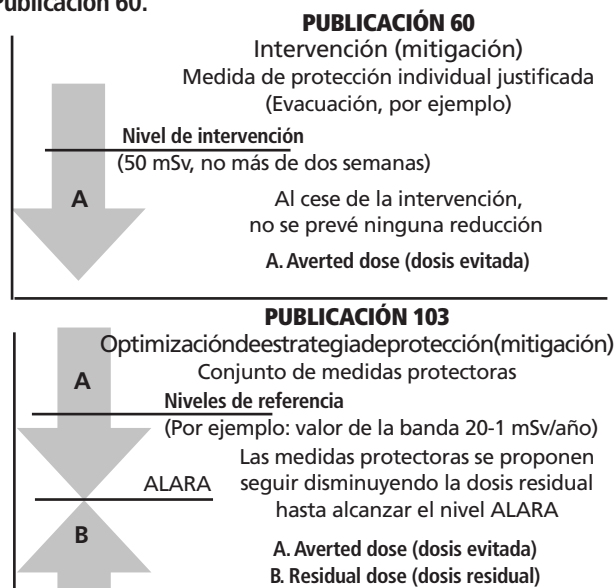
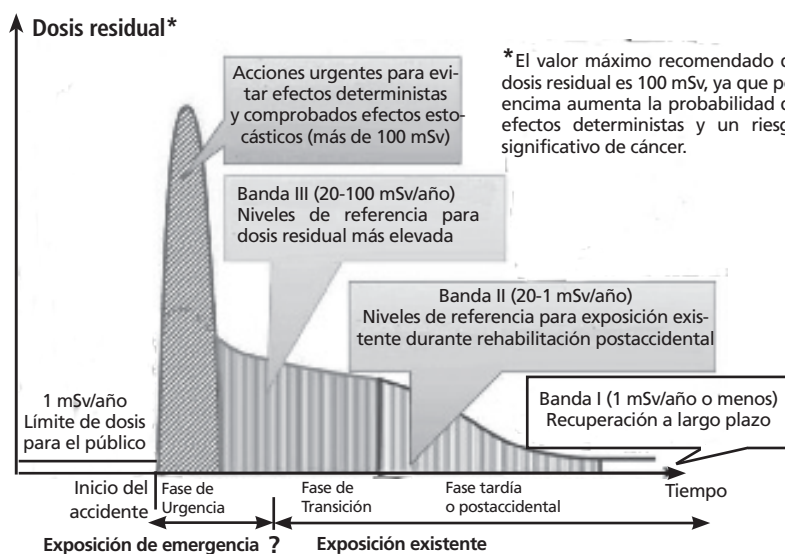
## SISTEMA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA (PUBLICACIÓN 103)



La ICRP reformó el sistema de protección radiológica en su Publicación 103, luego de que el Foro de Chernobyl, patrocinado por el OIEA, excluyó efectos negativos profundos sobre la salud imputables a aquel desastre, pasados veinte años de haberse iniciado. Esas nuevas recomendaciones, aún vigentes, generalizaron la aplicación del criterio ALARA como filosofía práctica de optimización a los casos de accidente nuclear, asumiendo que es posible recuperar las condiciones de vida en territorios contaminados, logrando niveles cercanos a 1 mSv/año, aunque fuese mediante una estrategia de protección a largo plazo. Para ello fue establecido un criterio único de valores numéricos en tres bandas que se aplican en dependencia de la *situación de exposición* (planificada, existente, o de emergencia). Este sistema siguió teniendo en cuenta la *categoría de exposición*: ocupacional y del público, además del caso especial de la exposición médica de pacientes y sus acompañantes.

## NIVELES DE REFERENCIA (PUBLICACIÓN 103, 109 y 111)

Al generalizar el criterio ALARA a las situaciones de emergencia y existente, la Publicación 103 se refiere a las dosis residuales que deben obtenerse después de implementar una estrategia de protección. Sus valores numéricos quedarían por debajo del nivel de referencia que se ha elegido dentro de alguna de las tres bandas, partiendo de que estas pueden ajustarse a igual número de fases que caracteriza un accidente nuclear. Sin embargo, la Publicación 109 y la Publicación 111 no definen criterios radiológicos para el tránsito de una situación de exposición emergencia a una exposición existente. Es por ello que la dosis evitada (o evitable) sigue siendo un indicador importante para justificar contramedidas específicas de intervención, tal y como se plantea en la Publicación 60.



Infografía 15: Transformaciones conceptuales del sistema de protección radiológica después de Chernobyl. Fuente: elaboración propia.

incluida la muerte del embrión o feto, o cuando existiera una alta probabilidad de efectos estocásticos comprobados epidemiológicamente, como es el cáncer de tiroides radioinducido en infantes.

Una vez justificada la intervención, solo entonces cabría proponerse su optimización en el sentido de maximar los beneficios con respecto a los perjuicios que aquella podría causar, teniendo en cuenta su forma, escala y duración. O sea, la Publicación 60 plantea realmente una suerte de «justificación optimizada». Sin embargo, la experiencia real de Chernobyl demostró cuán complejo resulta no ya tratar de optimizar, sino saber cuál intervención resulta más beneficiosa que dañina en un escenario radiactivo cambiante. ¿Acaso es posible prever todas las transformaciones que sufre un ecosistema, luego de haberse producido la liberación irreversible de radionucleidos artificiales de larga duración o período de semivida? Ello dependerá de la cantidad y propiedad de los elementos radiactivos, así como de su concentración y migración en los componentes de la biocenosis. Por ejemplo: para evitar el aumento de la dosis comprometida (radiación interna) en los habitantes de Gómel y otros territorios contaminados de Bielorrusia, nunca se podrá renunciar al férreo control sobre el consumo de los productos del bosque, especialmente de los tipos de hongo más propensos a la acumulación de cesio-137 (Azovskaya *et al.*, 2018).

#### *Publicación 103: enfoque basado en situaciones*

Aunque la Publicación 60 se refiere a la optimización de las intervenciones, se trata más bien de una «justificación optimizada», que en ningún modo se relacionaba explícitamente con el criterio ALARA. Este solamente se aplicaba a las prácticas o situación planificada, al igual que las nociones de riesgo no aceptable, riesgo tolerable y riesgo aceptable. Este asunto de la distinción entre *tolerabilidad* y *aceptabilidad* del riesgo fue obviado sin explicación alguna por la ICRP cuando decidió renunciar al enfoque basado en procesos (prácticas e intervenciones), optando en la Publicación 103 por el enfoque basado en situaciones de exposición: planificada, de emergencia y existente. La razón declarada de este cambio de enfoque se explica porque «refuerza el principio de optimización de la protección, el cual debe ser aplicable de una manera similar a todas las situaciones de exposición» (ICRP, 2007: 4). Las categorías de exposición siguieron siendo las mismas: ocupacional y del público, así como el caso especial de la exposición médica de pacientes<sup>36</sup>.

Hemos sugerido que la conclusión definitiva del Foro de Chernobyl, aduciendo una sobreestimación de los daños radioinducidos adjudicables a este «accidente grave», influyó decisivamente en que la ICRP generalizara el criterio ALARA a las situaciones de exposición de emergencia y de exposición existente. Al respecto se esgrime en la Publicación 103 que «hay un deseo, tanto del individuo expuesto como de las autoridades,

---

<sup>36</sup>El diagnóstico médico se valora solamente como situación de exposición planificada, aunque los llamados *niveles de referencia* pueden emplearse para indicar si la dosis recibida por un paciente sometido a un procedimiento de imagenología específico está justificada y puede optimizarse. Las restricciones de dosis se aplican a quienes acompañan o confortan al paciente, así como a los voluntarios en investigaciones (ICRP, 2007).

de reducir las exposiciones a niveles cercanos o similares al de situaciones consideradas como “normales”» (ICRP, 2007:9). Con arreglo a este presupuesto, quedó establecido un criterio único de valores numéricos para la dosis recibida en tres bandas: 1 mSv o menos; mayor de 1 hasta 20 mSv, y mayor de 20 hasta 100 mSv (ver infografía 15). Toda situación que diera lugar a una dosis superior a 100 mSv (aguda o anual) se considera inaceptable, salvo para las circunstancias relativas a la exposición de trabajadores de emergencia que actúan por voluntad propia.

Como ya hemos visto, en la Publicación 103 se mantuvieron idénticos los límites de dosis efectiva para el individuo de la Publicación 60, entendidos como la suma de las dosis recibidas de todas las fuentes reguladas en situación planificada; o sea, 1 y 20 mSv/año para exposición del público y ocupacional, respectivamente. Por debajo de esos valores numéricos se siguieron empleando las «restricciones de dosis» para la optimización de la protección con respecto a cada fuente controlada. Por tanto, la transformación conceptual del sistema de protección radiológica incumbe más a las situaciones de exposición de emergencia y de exposición existente (Lochard, 2011). Una exposición de emergencia (o de urgencia) es cuando se pierde el control de la fuente radiactiva, mientras que una exposición existente se refiere a que esa situación ya se produjo, se prolonga o se hereda. Para ambas situaciones de exposición (emergencia y existente) fue propuesto el nuevo concepto «niveles de referencia» (*reference levels*) como el tope por encima del cual se juzga inapropiado que tengan lugar exposiciones, y por debajo del cual debe intentarse la optimización de la protección, ya enunciada explícitamente como criterio ALARA. Este nivel de referencia debe ser elegido tan bajo como sea razonablemente alcanzable en dependencia de las circunstancias prevaletes (*prevailing circumstances*).

Aplicados al individuo nominal o Persona de Referencia, los valores numéricos dentro de cada banda pueden ser seleccionados indistintamente como restricción de dosis o nivel de referencia en dependencia de cuál sea la situación de exposición afrontada (ver infografía 15). Las restricciones de dosis para exposición planificada se manejan como dosis efectiva anual (mSv/año), al igual que los niveles de referencia para exposición existente. En situación de exposición de emergencia, los niveles de referencia se expresan como la dosis total recibida por un individuo que no deberá excederse, ya sea en forma aguda o como estimado de dosis anual si se trata de una exposición crónica acumulativa. Asimismo, debe tenerse en cuenta un aspecto crucial: los niveles de referencia de la Publicación 103 aluden a la dosis residual y son empleados para evaluar una estrategia de protección como conjunto de distintas acciones o medidas al unísono. De ahí que sus valores numéricos no deban aplicarse como niveles de intervención, ya que esta anterior categoría de la Publicación 60 se refiere a la dosis evitable (o evitada) para cada medida protectora por separado (ICRP, 2007).

Si para decretar la evacuación preventiva, las autoridades japonesas se hubieran atenido a las NBS vigentes, basadas en la Publicación 60, esa acción protectora de urgencia debía haberse efectuado para una dosis evitable de 50 mSv, previendo que la población podría

retornar al cabo de dos semanas a sus lugares de origen, si las circunstancias lo posibilitaban. Sin embargo, al optar por el criterio único de la Publicación 103, en lugar de ese valor numérico, fue elegido 20 mSv/año, que puede ser entendido como el tope inferior de dosis residual para exposición de emergencia (banda III) o como el tope superior de dosis residual para exposición existente con vistas a proponerse la optimización de la rehabilitación postaccidental (banda II). Todo hace indicar que esa dosis efectiva (20 mSv/año) fue aplicada al unísono en los dos sentidos totalmente excluyentes entre sí: como dosis evitable para decretar la evacuación (en forma similar a un nivel de intervención, en el sentido de la Publicación 60), y como dosis residual por debajo de la cual debía efectuarse la optimización (o sea, como nivel de referencia, en el sentido de la Publicación 103).

Esa mala interpretación de los niveles de referencia para gestionar la fase de emergencia y post-accidente en Fukushima Daiichi puso de manifiesto que no existía una comprensión cabal entre los propios radioproteccionistas de cómo debía aplicarse la Publicación 103 durante los accidentes nucleares severos. Tratándose de un desastre inusitado, máxime cuando el terremoto había causado más de 15 000 muertes y 2 500 desaparecidos, el gran conflicto surgió cuando la población no entendió por qué ya podía regresar a sus hogares, si todavía seguiría expuesta al mismo valor numérico de dosis recibida (o sea, 20 mSv) por causa del cual había sido evacuada. Por demás, la gente se preguntaba: «¿cuál es la razón para consentir que dosis individuales de 20 a 100 mSv por año sean aceptables ahora, después del accidente, cuando dosis superiores a 1 mSv por año eran inaceptables antes del accidente?» (González *et al*, 2013). Decisiones como reabrir las escuelas, pero limitando la salida de los niños al aire libre para evitar una exposición mayor de 20 mSv/año, fueron objeto de repudio general (Urabe *et al*, 2014).

Por añadidura, independientemente de que —por primera vez— se tratara de implementar el criterio ALARA durante un accidente nuclear, salieron a relucir determinadas complejidades de la protección radiológica que se han arrastrado a través de los años. Hubo una gran confusión sobre las magnitudes y unidades de medida que fue «exacerbada por la traducción y confundida por la comunicación» (González, 2012: 2). Como una dificultad sustancial se reconoció el engorro de que las magnitudes dosis equivalente, dosis efectiva y equivalente de dosis tienen una terminología similar y también una unidad común: el sievert. El problema más grave parece haberse presentado con el reporte de las dosis equivalentes de tiroides, ya que estas eran registradas como dosis efectivas. Esto creaba la confusión de que las dosis equivalentes debían ser mucho más altas, ya que la dosis efectiva pondera la contribución de ese órgano al detrimento total de la salud por un factor  $w_t$  igual a 0,04.

Al igual que sucedió en Chernobyl, las discordancias entre los propios expertos contribuyeron a la incompreensión de las normativas de protección radiológica por parte del amplio público en lo que respecta a las diferencias entre una situación bajo control y una situación fuera de control. La validez del LNTM volvió a ser cuestionada con nuevos bríos, incluso por los propios expertos del OIEA, reprochándole que contribuye



Figura 11: Adecuación de la noción de «tolerabilidad» del riesgo al sistema de protección radiológica basado en los tipos de situaciones de exposición. Fuente: Lochard, 2015.

a acrecentar la confusión sobre los efectos de la exposición a bajas dosis<sup>37</sup>. Esto ha llevado a que los partidarios de ese modelo y de la generalización del criterio ALARA a los accidentes nucleares se hayan visto obligados a recapacitar sobre la necesidad de retomar el concepto omitido de «tolerabilidad» como el «elemento central del sistema de protección radiológica» (Lochard, 2015). Su adecuación a la Publicación 103 tiene en cuenta el tipo de la situación de exposición y su grado de control, a la par que recomienda cuál actitud debe mantener la población con respecto al riesgo en correspondencia con los intervalos de dosis recibida (mSv/año): *reacción* (entre 100 y 20), *vigilancia* (entre 20 y 1) y *quietud* (menos de 1 mSv). En el caso de la situación de emergencia, toda dosis por debajo de 100 mSv/año pudiera ser manejada como «tolerable» en dependencia de las circunstancias prevalecientes (ver figura 11), pero solamente será «aceptable» cuando sea el resultado del proceso de optimización al término de la recuperación a largo plazo.

<sup>37</sup>En entrevista que nos concedió el reconocido experto internacional Abel González durante el XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear, celebrado en La Habana en 2018, este expresó con respecto a esas controversias entre homólogos: «Creo que nosotros hemos ignorado en la profesión algunos elementos básicos de filosofía, ya sea por ignorancia o por soberbia. Hemos ignorado la metafísica que claramente distingue entre lo real y lo inferible. Atribuir objetivamente efectos es del mundo real; inferir subjetivamente riesgos es del mundo notional. En la relación dosis-respuesta hay filosofía del mundo real y del mundo notional. El mundo real está por encima de 100 mSv, de ahí que podamos atribuir efectos en retrospectiva; el mundo notional está por debajo de 100 mSv, donde no sabemos qué pasa y, por eso, tratamos de inferir riesgos en prospectiva». En opinión de González, el modelo de la ICRP es algo más sutil que una relación lineal entre la dosis y la respuesta: «Como no se sabe qué pasa debajo de 100 mSv, se asume que un incremento de dosis por encima de la dosis natural inducirá un incremento proporcional de probabilidad subjetiva de daño estocástico. Esto se asume porque se ha considerado el mejor enfoque práctico para proteger a la gente». Finalmente, González se declara partidario de la opción regulatoria *De minimis*: «El dilema de las dosis bajas puede resolverse sobre la base del sentido común, sea legislativo o normativo, en lugar de con modelos científicos de respuesta a la radiación basados en conjeturas biológicas y epidemiológicas que no pueden ser probadas».

Los accidentes nucleares o desastres radiactivos pueden dividirse en tres fases, según el escenario y las medidas protectoras que se adopten (Moehrle y Raskov, 2015):

—la fase de urgencia, que puede estar dividida en una fase de advertencia y una fase de liberación radiactiva, cuando en horas y días deben tomarse las principales acciones protectoras tempranas: refugio o confinamiento, evacuación y profilaxis con yodo, además de otras medidas como la restricción de alimentos que puedan contener cesio radiactivo;

—la fase intermedia o de transición, que comienza con la interrupción de toda descarga radiactiva y la recuperación del control de la fuente al cabo de días, semanas o meses. Son revocadas las acciones tempranas y se deciden las medidas a mediano y largo plazos, como son —entre otras— el traslado temporal o el reasentamiento permanente, el control de alimentos y agua potable, y las labores de descontaminación radiactiva;

—la fase tardía postaccidental, que puede durar meses, años o décadas en dependencia de la magnitud de la liberación radiactiva. Su objetivo es la rehabilitación de las condiciones de vida hasta donde sea razonablemente posible, aspirando a recuperar la situación normal.

Los valores numéricos de las tres bandas de dosis residuales debieran ajustarse a ese igual número de fases (ver infografía 15). Sin embargo, no hay criterios radiológicos bien definidos por la ICRP para delimitar cuándo se ha transitado de una fase a otra, como tampoco desde una situación de exposición emergencia a una situación de exposición existente. Reconociendo estas insuficiencias de la Publicación 109 y la Publicación 111, la ICRP ha enfatizado después de Fukushima Daiichi en la necesidad de involucrar a los propios damnificados en el proceso de toma de decisiones para compartir responsabilidades. No se trata ya solamente de fomentar una «cultura práctica de la protección radiológica» (*practical culture of radiological protection*) y «protección de autoayuda» (*self-help protection*) para beneficio del público laico, tal y como proclamaba la segunda de esas recomendaciones de la ICRP. Ahora se exhorta enfáticamente a los radioprotectores para que presten sus servicios a los «afectados interesados» (*affected stakeholders*), de modo que sea posible establecer un proceso de diálogo entre ambas partes para el mutuo aprendizaje (Lazo, 2016). Este cambio de postura se resume en el siguiente razonamiento: «Los aspectos de la protección radiológica deben supeditarse a los valores sociales, y no los valores sociales a la protección radiológica (...) Las decisiones son informadas por la ciencia, pero son impulsadas por los valores sociales» (NEA, 2018).

La tragedia de Fukushima Daiichi ha llevado a un reconocimiento de los graves perjuicios sociales que provocan las evacuaciones, traslados temporales y reasentamientos masivos en caso de contaminación radiactiva. Aunque los efectos psicosociales ya habían sido reconocidos como una consecuencia importante de Chernobyl, siempre habían sido achacados a las difíciles condiciones socioeconómicas en la antigua Unión Soviética y su infortunado tránsito hacia el capitalismo. Ahora, después de la tragedia japonesa, se reconoce mucho más el sustrato emotivo de la percepción del riesgo radiológico y sus efectos perjudiciales como depresión, ansiedad, trastorno de estrés postraumático y síntomas somáticos sin explicación médica (Bromet, 2014). También



se subraya la importancia del sentimiento de «autoestigma radiactivo», cuyo arraigo sociocultural se remonta al rechazo sufrido por los *hibakusha*, en especial por las mujeres debido a los presumibles efectos de la radiación sobre el embarazo futuro o la herencia genética (Carpenter y Heath, 2013; Maeda y Susuki, 2018). De hecho, esta categoría se ha revalorizado como «persona expuesta a las radiaciones» para incluir también a los damnificados por el desastre de Fukushima Daiichi (Naono, 2019).

*¿Hasta qué punto la tolerabilidad y/o aceptabilidad del riesgo nuclear y radiológico en la sociedad siempre quedarán supeditadas a razones culturales, políticas, ideológicas, éticas y morales, independientemente de cuán válidos sean los métodos científicos para aplicar el principio de prudencia en términos probabilísticos?* Esta macrointerrogante coloca al sistema internacional de protección radiológica en la encrucijada de ser más científico o más social, en tanto el propio LNTM preconiza la imposibilidad de establecer umbrales numéricos de dosis que delimiten la frontera entre lo peligroso y lo seguro. Ante esta disyuntiva, basta reconocer la vulnerabilidad de embarazadas y niños para que, de acuerdo con el principio de precaución, cualquier toma de decisiones por los expertos en un escenario de incertidumbre radiactiva termine supeditándose a los juicios de valor que manejen los laicos/afectados.

Esa brecha epistémica y perceptiva, que hemos identificado como conflicto ética *versus* conmensurabilidad, se intensifica al imbricarse con la disputa irreconciliable entre los propios expertos, polarizados antagónicamente al no poder resolver el enigma biológico de las curvas dosis-respuesta (ver subacápite 3.1.1). Y aun cuando se proponga como solución conciliadora la aplicación del precepto *De minimis*, el dilema sociorradioecológico persistirá en la medida de que hay una diferencia sustancial entre el «riesgo real» (objetivo) de los expertos/decisores y el «riesgo percibido» (subjetivo) por los laicos/afectados cuando se trata de vivir en alerta perenne, sumidos en el temor y la indefensión a causa de ese peligro inefable que es la radiactividad artificial. Habiendo reconocido esta distinción riesgo real (objetivo)/riesgo percibido (subjetivo) desde el enfoque intratécnico, ya podemos pasar al enfoque extratécnico del dilema *regulación/promoción* como el dilema de los dilemas de la energética nuclear.

**T**hree Mile Island, Chernobyl, Fukushima Daiichi... cada uno de estos accidentes superiores a la base de diseño (BDBA) ha sido un caso distinto, con sus propias causas tecnológicas intrínsecas, pero vistos diacrónicamente arrojan una tendencia en apenas tres décadas, descalificando el «nunca más» y planteando la posibilidad siempre latente de que pueda ocurrir otro desastre nuclear en el futuro. Desde una perspectiva intratécnica, en los capítulos anteriores corroboramos que esos BDBA compulsaron a que la «filosofía práctica» de los expertos nucleares haya tenido que variar para seguir controlando tecnológicamente el poder destructivo, absoluto y subitáneo de la fisión atómica. A la par, con cada uno de esos accidentes, fue incrementándose la incertidumbre sobre los posibles efectos dañinos de los radionucleidos artificiales que pueden sobreañadirse al fondo radiactivo natural, ingresar en la comunidad biótica y ser inhalados o digeridos por los seres vivos en forma desapercibida.

Ese balance historiográfico nos ha permitido apreciar el derrotero accidentado de la energética nuclear, cuyo inmenso potencial catastrófico obliga a recapacitar sobre aquellas dudas plenamente justificadas que, desde un inicio, cuestionaron tal opción energética. Para ello comenzamos identificando el dilema del doble uso (militar y civil) como el dilema morfogenético por antonomasia, al que se vinculan otros dos dilemas ontológicos: el dilema ubicación/seguridad (*siting and safety*) y el dilema de las radiaciones ionizantes (dilema sociorradioecológico). Todos están relacionados con la naturaleza del material fisible (uranio y plutonio) y la incertidumbre con respecto a los efectos biológicos de la radiactividad artificial. Así, cuando nos referimos al carácter único del riesgo nuclear y radiológico, se tiene en cuenta que:

- 1) la posibilidad de proliferación del arma atómica se encuentra urdida en el ciclo de combustible con fines energéticos pretendidamente civiles (dilema de doble uso);
- 2) el sistema de defensa en profundidad (DiD) de los reactores nucleares puede ser vulnerable intrínsecamente y, por ende, a sucesos exteriores como los desastres naturales (dilema ubicación y seguridad);
- 3) no hay consenso científico sobre cuáles son los límites inferiores de dosis admisibles para la salud humana durante la exposición crónica a radiación ionizante de origen artificial por encima del fondo natural acostumbrado (dilema sociorradioecológico).

Aquilatada esa triada dilémica como incertidumbre ontológica, resulta comprensible que Chernobyl —y, en especial, Fukushima Daiichi— hayan obligado a reflexionar en retrospectiva sobre el estreno bélico de la energía nuclear, en tanto la pérdida de su control siempre reavivará el espectro siniestro de haberse aprovechado premeditadamente para provocar la muerte instantánea de decenas de miles de personas. Además, hemos visto que los propios expertos nucleares consideran que el seguimiento de los supervivientes

japoneses a los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki es la única fuente epidemiológica confiable para evaluar los efectos perjudiciales de la radiación ionizante sobre la salud humana. Todo ello ha agravado acumulativamente el temor del amplio público a la radiactividad y, por ende, sigue intensificándose la brecha epistémica —y, como ya vimos, también perceptiva— entre expertos y no expertos, partidarios y opositores a la energética nuclear. Luego de Fukushima Daiichi, esto ya se reconoce sin ambages por los propios gestores del sistema internacional de protección radiológica:

La “comunicación de riesgos” no ha logrado reducir la brecha en todo el mundo entre profesionales experimentados y personas desinformadas, y la relación de nuestros contemporáneos con la radiactividad sigue siendo en gran parte dominada por el espectro de Hiroshima y Nagasaki, y la incertidumbre sobre los efectos de las bajas dosis alimentadas durante décadas por la controversia científica y social en curso sobre los efectos de la radiación (Lochard, 2015: 45).

Aferrada a la postura de subestimar al amplio público, considerándolo «personas desinformadas», esta aseveración es un ejemplo fehaciente del desafío epistemológico que plantea el carácter único del riesgo nuclear y radiológico al campo de estudios Ciencia, Tecnología y Sociedad (ECTS). En vista de ello, nuestro enfoque intratécnico de la energética nuclear dará un giro para plantearse el *dilema regulación/promoción* desde una perspectiva extratécnica, tratando de responder a la interrogante: *¿Hasta qué punto los tres grandes accidentes superiores a la base de diseño (Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima Daiichi) son resultado de un desfasaje entre la promoción de la energética nuclear y la capacidad societal y/o institucional para garantizar su seguridad mediante mecanismos reguladores?* Esta interrogante nos permitirá encarar el problema de la aceptabilidad social de esa opción energética como «objeto de riesgo global» que supera por su potencial catastrófico a todos los demás riesgos tecnológicos (Agazzi, 1996).

Entendemos que esa brecha epistemológica, no ya solo entre los «profesionales experimentados y personas desinformadas», sino entre el sistema tecnocientífico nuclear y el resto de la sociedad, se fue exacerbando como resultado de las circunstancias sociopolíticas que caracterizaron a la Guerra Fría (ver capítulo 1). A diferencia de la URSS, donde regía solamente la propiedad estatal y se otorgaba un carácter épico de hazaña científica a cada logro relacionado con el dominio de la fisión atómica, escondiendo toda contradicción o experiencia negativa, la energética nuclear en Estados Unidos debió encarar el cuestionamiento público desde un primer momento en que se dio luz verde a la iniciativa privada.

No sería hasta la catástrofe de Chernobyl, teniendo como antecedente a Three Mile Island, que el secretismo quedaría totalmente al descubierto como una manifestación intrínseca del dilema regulación/promoción de la energética nuclear, independientemente del modelo socioeconómico imperante. A partir de entonces, la brecha epistemológica se hizo más notoriamente axiológica, ya que cuesta trabajo confiar en los expertos nucleares.

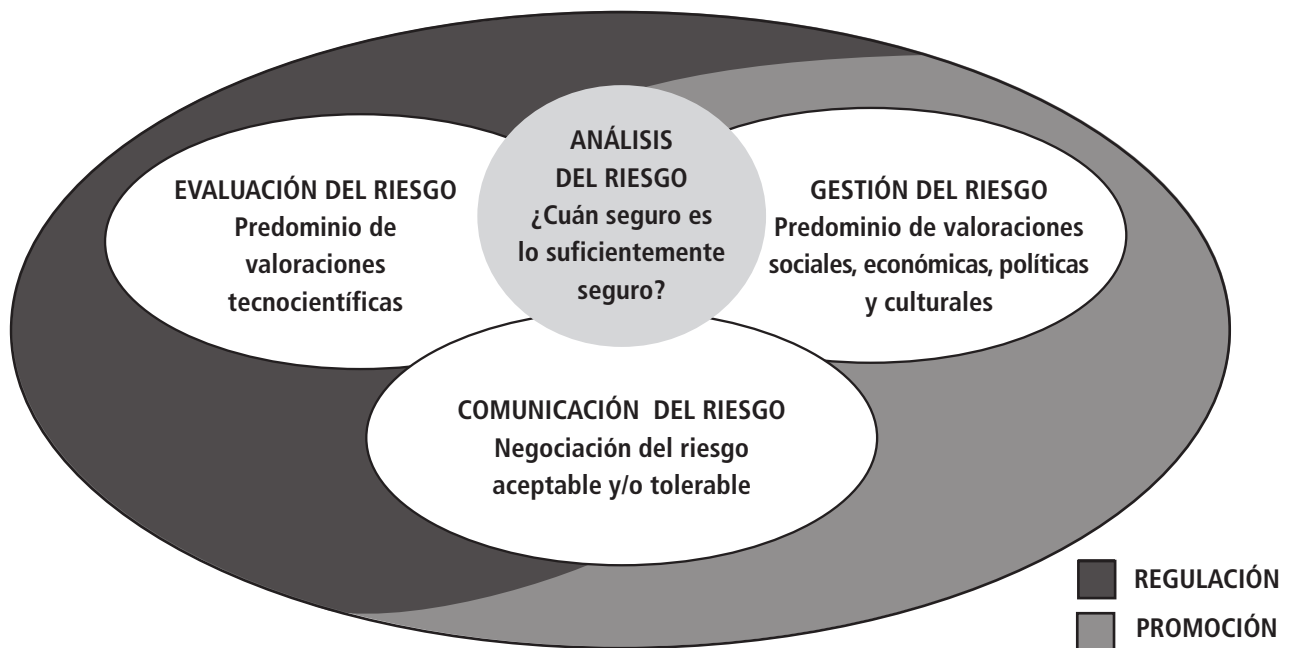


Figura 12: Marco analítico del dilema regulación/promoción de la energética nuclear. Fuente: elaboración propia.

Quedó de manifiesto que, para encubrir sus propias insuficiencias, ellos pueden engañar a las instancias del poder político, a los propios miembros de su sistema tecnocientífico e, incluso, autoengañarse cuando carecen de respuesta para sus fracasos.

El secretismo nuclear había sido denunciado tempranamente en Estados Unidos cuando, en respuesta a la posición ambivalente (regulatoria y promotora) de la Atomic Energy Commission (AEC) y del Joint Committee on Atomic Energy (JCAE), desde mediados de la década de 1950 se intensificaron las controversias políticas en el Congreso entre los grupos que patrocinaban esa opción energética y los grupos oponentes a su desarrollo. Esto trajo un cambio de énfasis desde lo estrictamente tecnológico hacia lo sociopolítico y, por ende, la opinión de las personas «no técnicas» se hizo cada vez más importante en la toma de decisiones sobre la energética nuclear. Los grandes encontronazos entre expertos y no expertos, entre legisladores a favor y en contra de las centrales atómicas, reflejaban la disonancia entre las estimaciones técnicas del riesgo y la percepción pública del mismo. La corriente antinuclear comenzó a ganar cada vez más adeptos en los ámbitos intelectuales y académicos, así como dentro de las clases media-media y media-alta (Kasperson *et al*, 1979).

A la par de la repudia general contra la proliferación del arma atómica y las reivindicaciones ecologistas, ese movimiento opositor había comenzado por aquellas localidades en que se proponía una instalación nucleoenergética con fines comerciales o algún repositorio de desechos radiactivos, intensificándose cuando los ciudadanos empiezan a hacer uso de su derecho a participar en el proceso para la concesión de licencias constructivas a las empresas privadas; o sea, al involucrarse en el ámbito de la regulación. En 1958 tuvo lugar el primer escándalo a raíz de que la AEC concedió su beneplácito a la Pacific Gas & Electric Company para el emplazamiento de un reactor reproductor (*Breeder Reactor*) en Bodega Bay, en el norte de San Francisco, California (Wellock, 1998).

Fue entonces que Chauncey Starr, un ingeniero eléctrico y físico participante en el proyecto Manhattan, devenido uno de los primeros empresarios privados en la rama nuclear, propuso sagazmente un método comparativo para cuantificar la aceptabilidad social de los riesgos asociados a distintas tecnologías y actividades peligrosas. Por su perspicacia sociológica y hábil manejo de los datos estadísticos, esta propuesta logra un enorme éxito entre los círculos favorables a la energética nuclear cuando aparece en la revista *Science* su artículo «Social Benefit versus Technological Risk. What is our society willing to pay for safety?» («Beneficio social versus riesgo tecnológico. ¿Cuánto está dispuesta la sociedad a pagar por la seguridad?») (Starr, 1969).

Al abrir la pregunta dilemática *How safe is safe enough?* (¿Cuán suficiente es la seguridad adoptada?, o mejor: ¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?), convirtiéndola en el problema fundamental de la seguridad tecnológica, Starr introdujo el concepto de «riesgo aceptable» (*acceptable risk*) como el pretendido eslabón que despejaría las contradicciones entre la evaluación del riesgo (*risk assessment*) por parte de los expertos nucleares y la gestión del riesgo (*risk management*) para la toma de decisiones en correspondencia con la valoración económica, social y política. A partir de que fue planteada esa interrogante, el análisis del riesgo (*Risk Analysis*) comenzó a desarrollarse como una disciplina que pretende aunar esas dos facetas o dimensiones (más técnica y más social) mediante la comunicación del riesgo (*risk communication*) para la negociación del riesgo aceptable y/o tolerable (ver figura 12).

El gran éxito de Starr consistió en haber contribuido a que la «filosofía práctica» de los ingenieros nucleares quedara validada como «filosofía del riesgo aceptable» para la regulación de los sistemas tecnológicos complejos. Por «regulación» se entiende el conjunto de principios, criterios y normativas que tratan de garantizar la seguridad tecnológica. Aunque haya sido superado, su método cuantitativo de las «preferencias reveladas» (*Revealed Preferences Approach*) significó el debut del *Risk Analysis* bajo el paraguas de la teoría del actor racional (*rational choice*), según el cual todas las acciones humanas pueden ser descritas como problemas de maximización de la utilidad o de optimización (coste/beneficio). Profesando una suerte de realismo fiscalista, su basamento tecnocientífico es la reificación del «riesgo objetivo» y, por tanto, la posibilidad de medirlo y cuantificarlo con suficiente exactitud mediante el uso de las técnicas estadísticas y probabilísticas, incluso aunque exista cierto grado de incertidumbre (epistémica y aleatoria). Para ello se da por sentada la alta fiabilidad de la Evaluación Probabilista del Riesgo (Probabilistic Risk Assessment, PRA), cuya aplicación en la energética nuclear se instauraría a partir del informe Rasmussen o WASH-1400 en 1974 (ver subacápite 2.2).

En virtud de esa presunta fiabilidad técnica, para que los beneficios de la energética nuclear fueran reconocidos en su justa medida, se imponía la necesidad de influir decisivamente sobre la percepción subjetiva de los riesgos por el amplio público, la cual puede estar distorsionada y llegar a ser irracional (Starr, 1969). Así, mientras el concepto de *acceptable risk* era entronizado técnicamente en el ámbito de la regulación, su empleo retórico en la palestra pública contribuía a la promoción de la energía nuclear en el contexto

más álgido de la Guerra Fría. Un ejemplo de dicha retórica es la polémica conclusión del WASH-1400, afirmando eufemísticamente que la probabilidad de morir al año en Estados Unidos por causa de 100 plantas atómicas en funcionamiento era tan irrelevante como perecer por causa de la caída de un meteorito ( $10^{-9}$ ; o sea, 1 muerte cada 1000 000 000 de años). No obstante, al unísono, el PRA había demostrado que no era totalmente descartable un accidente muy grave con fusión del núcleo a causa de un fallo tecnológico de poca cuantía, como ocurrió en Three Mile Island (ver subacápite 2.3).

A partir de ese momento, cada accidente histórico superior a la base de diseño (BDBA) provocó un nuevo estadio del dilema regulación/promoción de la energética nuclear, poniendo en duda su aspiración futurista a convertirse en la única fuente de supervivencia de la humanidad. Esto lleva a plantearse hasta qué punto la concepción ingenieril de lo «suficientemente seguro» ya fracasó y se impone su revisión total como marco analítico para la negociación del riesgo aceptable y/o tolerable. Para entender el tamaño desafío que esto significa para los ECTS resulta imprescindible un análisis panorámico del *Rysk Analysis* y de las diversas teorías sociológicas del riesgo como disciplinas que nacieron en el interregno entre Ciencia, Tecnología y Sociedad, con los ingenieros nucleares de un lado, y los científicos sociales del otro.

#### 4.1/ El «riesgo aceptable»: ingenieros nucleares versus científicos sociales

Las primeras investigaciones sobre la gestión del riesgo se deben a estudios académicos vinculados a la teoría de juegos, la teoría de la decisión y la economía teórica, como son los métodos para la cuantificación de preferencias individuales o *utilidad*<sup>38</sup>. No cabe dudas de que Chauncey Starr se inspiró en dichos métodos para aplicar su análisis de coste/beneficio a los riesgos tecnológicos, manejando a conveniencia los datos estadísticos sobre la percepción pública de los riesgos naturales y tecnológicos. Aunque se le tacha de «positivista ingenuo» por su formulación demasiado simplista del *acceptable risk* (Shrader-Frechette, 1991), el significado filosófico de su propuesta se aquilata mejor si se analiza aquel artículo seminal con la pregunta *How safe is safe enough?* como manifiesto sociológico de la creencia o ideología que profesa un culto a la racionalidad tecnocientífica vinculada al dominio de la fisión atómica. La pervivencia de este credo utilitario y pragmático hace que la mayoría de los expertos nucleares evada cualquier reflexión crítica sobre la esencia dilemática que le otorga un carácter único al riesgo nuclear y radiológico. Una excepción sería Alvin Weinberg y su concepto de «transciencia» (*trans-science*), cuya aplicación al análisis del «Regulator's Dilemma» representó una suerte de disidencia dentro de la propia comunidad nuclear (ver subacápite 4.2).

Luego de la Segunda Guerra Mundial, Chauncey Starr había estado al frente de uno de los cinco programas que, subvencionados por el gobierno, se propuso desarrollar reactores nucleares experimentales; en su caso, el SRE (Sodium Reactor Experiment), primero de carácter civil en ser aprovechado por una compañía privada, Southern Ca-

<sup>38</sup>A estos temas se dedica el segundo capítulo de *Ciencia y política del riesgo* (López Cerezo y Luján, 2000).

California Edison Company, para producir electricidad hacia una red de distribución comercial, el 12 de julio de 1957, a la ciudad de Moopark, en California (Buck, 1983)<sup>39</sup>. Dos años antes, en 1955, el ingeniero había fundado su propia empresa: Atomics International (AI), como una filial privada de la North American Aviation Company (luego, Rockwell International Company), donde comenzó a laborar después de cerrado el proyecto Manhattan, dedicándose a investigar el posible uso de la propulsión nuclear en cohetes intercontinentales y aviones a reacción (Starr, 1995).

Como general manager de la AI —y, a la vez, vicepresidente de la North American Aviation Company—, Starr respondía por todos los proyectos que esta importante compañía aeronáutica había emprendido con la AEC. De hecho, había logrado que su prototipo de reactor con sodio/refrigerante y grafito/moderador (Sodium Graphite Reactor, SGR) fuera escogido para la escalada industrial, firmándose un contrato entre AI, la AEC y la Consumers Public Power District of Nebraska con vistas a la construcción de una planta comercial de 75 MWe en Hallam. Editado por la propia AI, un pequeño tabloide divulgativo con el título de *Nuclear News* (junio de 1958) da cuenta de ese y otros éxitos de la empresa, como es haber exportado reactores de investigación a Japón —el primer reactor nuclear que tuvo ese país—, Alemania, Dinamarca e Italia, así como el interés de los científicos italianos por otro de los programas de la compañía: el Organic Moderated Reactor Experiment (OMRE), llamado así porque era enfriado con un compuesto orgánico (terfenilo).

Como presidente de AI e ingeniero de profesión, Starr era reacio a una aprobación apresurada de regulaciones para los emplazamientos de las centrales atómicas por considerar que «podrían sofocar la industria nuclear infantil», según manifiesta en carta dirigida, el 29 de junio de 1959, a Harold L. Price, director de la Division of Licencing and Regulation de la AEC. Varios son los argumentos esgrimidos para explicar su negativa, entre ellos uno que resulta primordial porque resume el sentido de su posterior enfoque sobre la aceptabilidad social del riesgo nuclear y radiológico:

Todo el concepto de la energía nuclear y su aplicación se encuentra en una etapa inicial y está sujeto naturalmente al escrutinio y la crítica de todos los frentes, tanto por los educados en este campo, como por aquellos cuyo concepto de la energía nuclear se limita solamente a las bombas atómicas y de hidrógeno y la “lluvia radiactiva”, muy publicitados. Además, la industria ha crecido bajo un velo de estricto control de seguridad y regulaciones bastante rigurosas en comparación con otros sectores. Por ejemplo, en otras industrias, la regulación de las actividades potencialmente peligrosas tradicionalmente se han iniciado debido a la ocurrencia de accidentes. La demanda de regulaciones inmediatas sobre emplazamientos de reactores nucleares no se deriva de una historia de accidentes, sino más por un temor derivado de la radiactividad a partir de las armas nucleares (U.S. AEC, 1959).

---

<sup>39</sup> Anteriormente, el 26 de junio de 1954, había sido puesto en servicio el reactor soviético AM-1, llamado así por las siglas de *Atomni Mir* («Átomo Pacífico» en ruso) en la CEN de Óbninsk, reconocida como la primera de su tipo en el mundo. La primera central electronuclear comercial de Estados Unidos comenzó a funcionar el 2 de diciembre de 1957, en Shippingport, Pennsylvania. Tenía un reactor de agua ligera presurizada de 60 MWe que inicialmente había sido diseñado para un gran portaaviones, por lo que su combustible era uranio enriquecido hasta el 93% (Stiefel *et al*, 1963).

Apenas dos semanas después de que Starr enviara esa carta, del 12 al 26 de julio de 1959, el SRE sufrió una excursión de potencia que causó la fusión parcial de su núcleo. Así, su proyecto de puntería como fundador de la AI protagonizó la primera avería importante en un reactor nuclear civil estadounidense (Pickard *et al*, 2009). Del accidente solamente se supo al cabo de un mes por nota publicada en *Los Angeles Daily News* (29 de agosto), minimizando los daños tecnológicos y descartando la liberación de materiales radiactivos dentro de la instalación y hacia el exterior. Como las autoridades involucradas —AI y AEC— escondieron toda información comprometedor, coexisten versiones antagónicas sobre sus consecuencias. Las investigaciones histórica y periodística, basándose en fuentes testimoniales, aseveran que fueron venteadas secretamente grandes cantidades de gases radiactivos a la atmósfera (Rogers, 2012). En cambio, las evaluaciones técnicas siempre han desestimado la seriedad radiológica del accidente, corroborando la ausencia de yodo y cesio radiactivos en tales emisiones, tal y como aseguraron en su momento los informes secretos de la AI (Pickard *et al*, 2009). En todo caso, la preocupación que subyace a la controversia es si los operadores, sus familias y demás habitantes cercanos a esta instalación estuvieron expuestos a niveles de radiación con peligro para su salud, en cuyo caso debían ser indemnizados.

Aunque muchos años después, en una pequeña autobiografía, Starr se referirá a las dificultades relacionadas con la seguridad de aquellos primeros reactores nucleares, en ningún momento menciona la avería del SRE —sacado de servicio en 1964—, aunque la línea estadounidense de reactores sodio-grafito siguió desarrollándose por un tiempo. En cambio, al referirse a su renuncia a la presidencia de AI, Starr sugiere que estuvo relacionada con la paralización en 1967 de su proyecto para desarrollar el OMRE; o sea, el reactor enfriado con terfenilo (Starr, 1995). A pesar de que el gobierno canadiense estaba interesado en el empleo de dicho refrigerante como posible sustituto del agua pesada en los reactores CANDU, ese programa experimental fue clausurado por la AEC debido a la falta de presupuesto. También Starr expresa su decepción por el retiro de todo apoyo por parte de la Air Force a los proyectos de reactores nucleares enfriados con una aleación de sodio y potasio en estado líquido, uno de cuyos prototipos —el SNAP-10A— sirvió para propulsar un pequeño satélite puesto en órbita en 1965, otro de los experimentos pioneros llevados a cabo por AI.

Es muy difícil precisar cuáles factores, además de la accidentabilidad, influyeron en el fracaso de las empresas privadas que, como AI, apostaron por proyectos alternativos a los reactores de agua ligera LWR (PWR y BWR), cuya serialización comercial se impuso a la postre. Dentro de la comunidad de expertos había un fuerte debate interno, luego de que en 1957 el reporte Brookhaven o WASH 740 previó la posibilidad de un accidente nuclear grave, al que se sumó el informe Ergen sobre los posibles daños en la contención radiactiva debido a la pérdida de refrigerante (LOCA) y las curvas de Farmer sobre la cantidad de muertes por emisiones de yodo y cesio radiactivos, ambos estudios desarrollados en 1967 (ver subacápite 2.1). Fue entonces que Starr reparó en que la aceptabilidad social del riesgo era tan importante como su evaluación técnica. Para ese momento era decano de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad de California en los Ángeles (UCLA).



#### 4.1.1/ *Preferencias reveladas versus preferencias expresadas*

Chauncey Starr propuso su «método de preferencias reveladas», llamándole así porque se basa en datos empíricos de archivos históricos como los seguros de vida. El aprovechamiento de este tipo de indicadores le permitió sostener que el riesgo tradicionalmente aceptado en el pasado sirve de criterio para evaluar cuán aceptables son los riesgos actuales. Este enfoque estadístico partía de que, mediante ensayos y errores, la sociedad logra siempre un equilibrio óptimo entre beneficios (dólares) y los riesgos de cada actividad (muertes fatales/exposición en horas) como resultado de un proceso acumulado de acciones y toma de decisiones: «Tales preferencias sociales históricamente reveladas y los costos son lo suficientemente duraderos como para permitir su uso con fines predictivos» (Starr, 1969: 1232).

Para corroborar su hipótesis, mediante sofisticados cálculos matemáticos, Starr demostró que, si aumentaban en diez veces los beneficios de una actividad, el riesgo asociado a la misma era 1000 veces más aceptado. Luego comparó los riesgos atribuidos a distintas actividades, diferenciándolos en «riesgos voluntarios» (conducir un coche, volar en avión, tabaquismo...) y «riesgos involuntarios»: muerte prematura por enfermedades, desastres naturales o debido a la producción y el transporte de sustancias peligrosas, incluida la generación de electricidad. El análisis estadístico reveló que, para un mismo promedio anual de beneficios por persona, el grado de aceptabilidad de los riesgos asumidos voluntariamente era 1000 veces mayor que el de los riesgos involuntarios o impuestos. Aprovechó, además, para sugerir que «esa aceptación social del riesgo está directamente influenciada por la conciencia pública en torno a los beneficios de una actividad, gracias a elementos como la publicidad» (Starr, 1969: 1235).

Por último, arribó a la tesis que imprime a su estudio una evidente finalidad utilitaria: para que se aceptara un riesgo involuntario, la actividad en cuestión tenía que ofrecer cerca de mil veces más beneficios que la correspondiente a un riesgo voluntario equiparable, además de que esos beneficios debían ser reconocidos socialmente. Asimismo, existían unos límites de aceptabilidad para la exposición involuntaria, según fuera la probabilidad de muerte (personas/año) y la relación beneficio/riesgo (Starr *et al*, 1972). Todo riesgo involuntario es desdeñable por debajo del coeficiente de mortalidad anual a causa de riesgos naturales ( $10^{-6}$ ), mientras que resulta inadmisibles si supera el coeficiente de mortalidad anual por enfermedad ( $10^{-2}$ ). Entre ambos valores se encuentra la curva creciente de niveles de riesgos aceptados históricamente de manera involuntaria, según sean los beneficios obtenidos (ver figura 13).

En cuanto a la aplicación de ese análisis comparativo a la seguridad de las centrales atómicas, que era el principal objetivo del método, este había permitido saber que el diseño ingenieril, ateniéndose a criterios económicos por sí solos, ya garantizaba un nivel de riesgo muy por debajo del socialmente aceptado para las centrales eléctricas tradicionales (carbón y fuel oil). En pocas palabras: a partir de las preferencias reveladas podía afirmarse que el riesgo de la energía nuclear era ya aceptable, mientras se mantuvieran los estándares de seguridad alcanzados. Aunque enseguida fue criticado por el manejo intencional de los datos empíricos, este enfoque comparativo vino de plácemes a la actividad reguladora. El *Risk Analysis* quedó validado como una de sus herramientas más valiosas ante la ausencia de una teoría económica

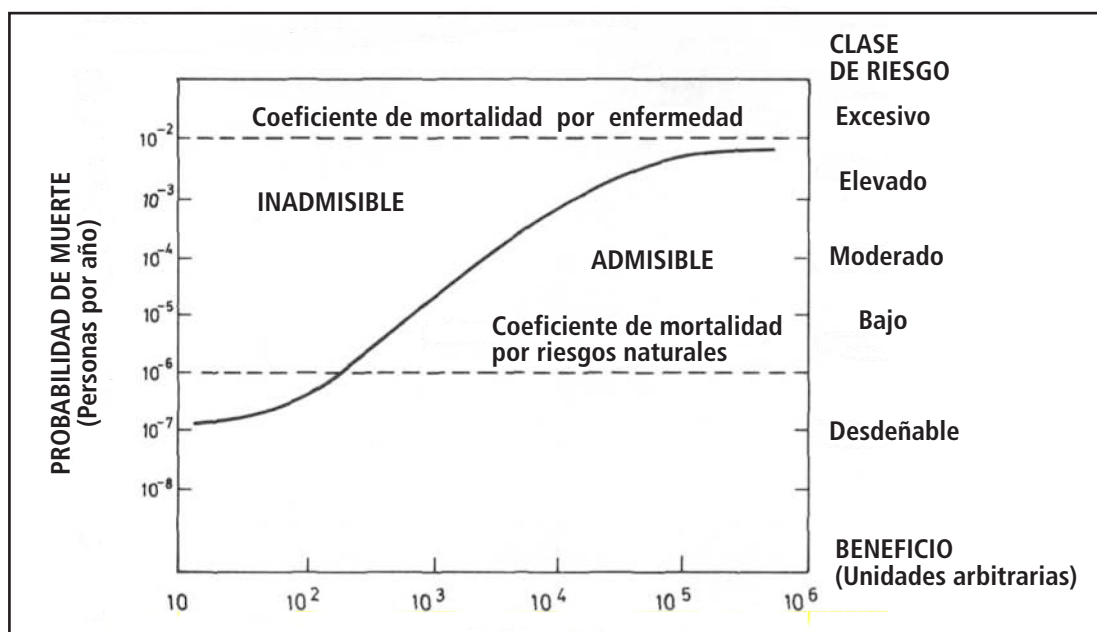


Figura 13: Estructura de la relación beneficio-riesgo por exposición involuntaria. Fuente: Starr *et al*, 1972.

o sociológica que explicara «los misterios de la percepción pública de los riesgos», al decir de Starr en su mencionada autobiografía (Starr, 1995: 39).

Esta propuesta también facilitó una manera de concebir y organizar las actividades de comunicación del riesgo, ofreciendo una clave para superar la oposición del público: si algunos peligros son socialmente aceptados, aunque provoquen altos índices de mortalidad y morbilidad, por qué no habría de serlo el peligro asociado a la energética nuclear, cuyas estadísticas arrojaban ser muy inferior a los demás. Aun así quedaba por comprobar si la comparación numérica entre la casi nula tasa de muerte causada por esa opción energética y los mayores niveles de mortalidad por causas naturales u ordinarias influiría en la conformación de las actitudes públicas. No se percibe de igual manera el riesgo de morir por accidente automovilístico o aéreo, que el riesgo de residir cerca de una central atómica o un repositorio de desechos radiactivos. Mientras los expertos hacían énfasis en la ínfima probabilidad de un accidente nuclear con víctimas mortales, la atención de los legos o profanos se focalizaba en sus posibles consecuencias, preocupándose por su gravedad, duración y posible irreversibilidad, así como por la eventualidad de su aparición diferida en el tiempo, aunque se considerara remota probabilísticamente. Estas cuestiones que hoy son notorias después de Chernobyl y Fukushima Daiichi, no habían sido motivo de indagación sociológica hasta que Starr publicó su polémico artículo.

Además de la voluntariedad de exponerse —el concepto clave de la metodología de preferencias reveladas—, ¿podían existir otros factores igualmente o más influyentes para la aceptabilidad del riesgo tecnológico a escala individual y grupal? Comprender cuáles podían ser esos factores subjetivos con ayuda de la psicología cognitiva convirtió al riesgo tecnológico en objeto de estudio de las ciencias sociales, abriéndose el campo de investigación de la «percepción del riesgo» (*Risk Perception*). Este comenzó con un programa de estudios

para el desarrollo del paradigma psicométrico (*Psychometric Paradigm*), cuyos principales exponentes fueron Baruch Fischhoff, Paul Slovic y otros psicólogos de la Universidad de Oregon (Kasperson y Kates, 1983; Slovic, 1992; Renn, 1998). En contraposición a Starr, ellos propusieron el método de «preferencias expresadas» (*Expressed Preferences Approach*) —llamado así por haber sido recogidas mediante cuestionario— en su artículo «How Safe Is Safe Enough? A Psychometric Study of Attitudes Towards Technological Risks and Benefits» («¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro? Un estudio psicométrico de las actitudes expresadas sobre los riesgos tecnológicos y sus beneficios») (Fischhoff *et al*, 1978).

Sus conclusiones fueron que, si bien existía una correlación entre riesgos y beneficios percibidos, la aceptabilidad de los riesgos no dependía tanto de que fueran voluntarios o involuntarios, sino que existían otros factores como el potencial catastrófico y el miedo que resultaban determinantes en la percepción pública del riesgo asociado a la energía nuclear. En trabajos posteriores, dichos factores fueron mejor definidos cualitativamente hasta identificar un total de 15 características del riesgo, que podían agruparse —a su vez— en dos factores de mayor nivel: el «riesgo temible» (*Dread Risk*), cuando se perciben falta de control, temor, potencial catastrófico, consecuencias fatales..., y el «riesgo desconocido» (*Unknow Risk*), el cual implica otras características como inobservabilidad, desconocimiento, novedad y efecto tardío del daño (Slovic, 1987). Al cuantificar la percepción del riesgo entre los encuestados a raíz de Chernobyl con respecto a 81 tipos de peligros, las armas nucleares y la energética nuclear obtuvieron el mayor puntaje en las características que componen el «riesgo temible», mientras que las tecnologías químicas y biogénicas alcanzaron un puntaje particularmente alto como «riesgo desconocido». Un año después del ataque a las Torres Gemelas (11 de septiembre de 2001), aquellos indicadores del paradigma psicométrico fueron retomados para sugerir que la percepción del riesgo con respecto al terrorismo implicaría un puntaje máximo de ambos factores: temible y desconocido (Slovic y Weber, 2002).

El enfoque psicológico cognitivo comenzó teniendo un carácter realista que asumía la existencia objetiva e independiente del riesgo, aunque reconociéndolo en calidad de «concepto mental» según fuera la percepción subjetiva de cada individuo. Más adelante, esta línea de investigación empírica se vio obligada a tener en consideración que múltiples factores de orden social, cultural y político complejizan la percepción pública del riesgo en general, así como la percepción del riesgo tecnológico en particular, de lo que el accidente de Three Mile Island fue el más claro ejemplo. Aunque no ocurrieron muertes ni se reportaron liberaciones radiactivas significativas, al menos públicamente, TMI-2 provocó una inmensa ola de temor y rechazo a las centrales atómicas que reveló por primera vez las consecuencias del secretismo asociado al dilema regulación/promoción: bastaría un evento que cuestionara la seguridad preconizada para producir un gran impacto social que haría disminuir abruptamente la aceptabilidad pública del riesgo nuclear y radiológico.

Durante el simposio «Societal Risk Assessment: How Safe is Safe Enough?», celebrado en octubre de 1979 —o sea, el mismo año del accidente— en los Laboratorios de Investigación de la General Motors, se discutió el papel de la evaluación de riesgos

en los procesos de políticas públicas en dos dimensiones: certeza *versus* incertidumbre, y objetivo *versus* subjetivo (Schwing y Albers, 1979). En su discurso inaugural, Starr se refiere brevemente a Three Mile Island y, aunque se trata por Slovic y otros ponentes, los debates están muy alejados del discurso crítico sobre la energética nuclear que ya entonces se estaba produciendo en el campo de los estudios sociales sobre Ciencia y Tecnología (STS por sus siglas en inglés, de Science, Technology and Society studies). Mientras los psicólogos se limitaban al análisis psicométrico de la percepción pública del riesgo nuclear y radiológico con respecto a otros tipos de riesgos, los sociólogos de la Ciencia y la Tecnología venían dedicándose desde inicios de la década de 1970 a estudiar las controversias técnicas entre los propios expertos nucleares, así como entre estos y sus oponentes. Su interés era revelar los factores sociales y políticos en la creación, uso y control del conocimiento y de la información durante las audiencias públicas, en especial los debates en el Congreso (Mazur, 1973; Del Sesto, 1983; Nelkin, 1979). Son estos autores los que ofrecen una profunda valoración sobre las causas y consecuencias de TMI-2, cuya repercusión fue definida certeramente por la socióloga Dorothy Nelkin:

El accidente de Three Mile Island de marzo de 1979, por su extraordinaria complejidad y consecuencias de gran alcance, ha servido para enfocar las críticas a la energía nuclear que se habían acumulado durante una década. Las ramificaciones de este evento han demostrado que el concepto de riesgo, a menudo definido en un marco bastante estrecho de salud y seguridad, debe considerarse en términos mucho más amplios. Revelan tanto las dificultades conceptuales para evaluar los riesgos sociales como las dificultades políticas para gestionarlos (Nelkin, 1981: 132).

Bajo el auspicio de la Social Research Council, aparece en 1982 el volumen *Accident and Three Mile Island: The Human Dimensions*, una compilación de trabajos en varias temáticas: percepción del riesgo nuclear (incluye trabajo de Slovic); reacción local a las plantas nucleares; responsabilidades institucionales por la energía nuclear; implicaciones en la política pública, y la interacción de los sistemas sociales y técnicos (Sills *et al*, 1982). Aquí argumenta Charles Perrow su dictamen a la Comisión Kemeny, el grupo presidencial creado por el presidente Jimmy Carter para analizar las causas del accidente. En contra de la tesis del error humano o deficiente actividad reguladora, el sociólogo sostuvo que había sido un evento «inesperado, incomprensible, incontrolable e inevitable» (Perrow, 1982: 173). Para ese momento ya había concebido su teoría de los *Normal Accidents* a partir del concepto de acoplamiento rígido (*tigh coupling*), según el cual la interrelación entre los factores técnicos y humanos en la operación de los sistemas tecnológicos complejos aumenta su vulnerabilidad intrínseca. Resulta significativo que el término *vulnerability*, refiriéndose a la tecnología, es también empleado por Nelkin en su mencionado artículo.

Esa mirada intratécnica desde una perspectiva humanística había logrado iluminar zonas oscuras de la tecnociencia nuclear que los expertos se negaban a reconocer o, teniéndolas en cuenta, solían menospreciarlas sobre la base de que el cálculo de las

probabilidades sería capaz de predecirlas a tiempo, incluyendo el fallo de causa común (*common-cause-failure*). Sin embargo, la sorpresa tecnológica de TMI-2 desconcertó a la comunidad científica y sacó a relucir sus desaveniencias internas, a la par que el clima de incertidumbre técnica favorecía múltiples interpretaciones de los niveles de riesgo (subacápite 2.3). La presencia de una burbuja de hidrógeno dentro del reactor averiado puso en vilo a la sociedad estadounidense, a solo doce días de haberse estrenado el filme *The China Syndrome*, cuyo principal nudo dramático es el encubrimiento de fallas en las soldaduras de un reactor nuclear que podían provocar una catástrofe apocalíptica: el material radioactivo fundido atravesaría la corteza de la Tierra hasta alcanzar las antípodas de los Estados Unidos, popularmente (pero de forma incorrecta) asociadas a China.

Ese guión fantasioso había contado con el asesoramiento de tres ingenieros nucleares que habían renunciado en 1976 a la compañía General Electric y se habían sumado al movimiento antinuclear. Al salir a la palestra, discordando abiertamente entre sí, los científicos y expertos se convirtieron en publicistas y creadores de imagen, en fuentes de información más o menos creíble, pero también en víctimas de la prensa implacable: «Estas disputas públicas crearon una sorprendente paradoja: el conflicto público socavaba la credibilidad científica como base objetiva de la política, pero a la misma vez hacía que aumentara enormemente el rol político de los expertos» (Nelkin, 1981: 139).

Como resultado de esa paradoja comunicativa, la percepción pública del riesgo nuclear y radiológico cambió para siempre. Incluso el propio Starr debió finalmente reconocer: «La aceptabilidad de cualquier riesgo depende más de la confianza pública en la gestión del riesgo, que en las estimaciones cuantitativas de las consecuencias del riesgo, las probabilidades y las magnitudes» (Starr, 1985: 98). Por tanto, los expertos nucleares decidieron centrarse en recobrar o ganarse esa confianza pública, tras concientizar que depende de múltiples factores sociales, económicos, políticos y hasta culturales. Consecuentemente, el paradigma psicométrico tuvo que abrirse al enfoque sociológico y, durante la década de 1980, se fueron creando las bases de la comunicación del riesgo como una disciplina práctica muy apegada en sus inicios a las preocupaciones derivadas de Three Mile Island, la eliminación de los desechos radiactivos y la ubicación de las plantas químicas luego de la tragedia de Bhopal, entre otros temas ambientales (Spiegelhalter, 2017). La expresión *risk communication* parece haberse usado por primera vez en 1984, al menos en círculos académicos (Leiss, 1996).

Un primer tema de interés fueron los «efectos de onda» (*ripple effects*) que había provocado la cobertura informativa de Three Mile Island a escala individual, local y societal. Todo hacía indicar que la informatividad o potencial de señal de un accidente nuclear consiste en ser percibido públicamente como una advertencia o presagio de futuros eventos con mayores consecuencias catastróficas (Slovic *et al*, 1980). Esta idea sería desarrollada por la Teoría de la Amplificación Social del Riesgo (SART por sus siglas en inglés), combinando modelos de la teoría de la comunicación con conceptos psicométricos. Su tesis principal es que un riesgo determinado puede ser percibido

de manera distinta por diferentes individuos o grupos mediante procesos culturales, institucionales, psicológicos y sociales que acentúan o atenúan las percepciones de dicho riesgo y moldean el comportamiento frente al mismo. Ello explicaría la aparente paradoja de que riesgos mínimos se perciben con gran gravedad y preocupación por el público, mientras que otros son olvidados por completo (Kasperson *et al*, 1988).

Por su parte, el enfoque crítico de los STS se extendió a las implicaciones institucionales del accidente, luego de que la imagen pública de la industria nuclear había quedado deteriorada, cundía el descrédito de sus funcionarios públicos y salía a relucir con más fuerza la preocupación social en torno al problema organizacional del sistema regulatorio debido a su dualidad de funciones: controladora y promotora. Con el declarado propósito de separarlas administrativamente, en 1974 había sido promulgada la Ley de Reorganización de la Energía. Entonces fue abolida la Atomic Energy Commission (AEC) y se crearon dos nuevas agencias estatales: la Energy Research and Development Administration (ERDA) y la Nuclear Regulatory Commission (NRC). Mientras la primera quedó a cargo de la promoción y desarrollo de la energía nuclear, así como de la supervisión de las armas atómicas, la segunda comisión debía responder por las actividades relacionadas con la seguridad nuclear, incluida la gestión del combustible fisionable (nuevo y gastado), además de otorgar y renovar las licencias comerciales a los reactores. Sin embargo, el accidente reveló a plenitud que la regulación implicaba razones más profundas que las simplemente administrativas:

La escala y la complejidad de una instalación tecnológica se corresponden con el tamaño y la complejidad del aparato regulador requerido para controlarla. Las tecnologías de escala pueden desdibujar la distinción entre intereses públicos y privados. Dado el tamaño de la empresa nuclear, el gobierno se ha convertido en un socio en el campo nuclear, desarrollando a través de sus contratos y subsidios su participación en la promoción de la energía nuclear. Esta asociación reduce la capacidad del gobierno para ejercer una regulación y control independientes. Las agencias reguladoras que buscan funcionar en ese contexto, son cuestionadas a menudo por su filosofía promocional (...) (Nelkin, 1981: 137).

A partir de Three Mile Island debió tenerse en cuenta que el futuro de la energética nuclear podría estar ya comprometido si volvía a ocurrir otro accidente similar debido al desbalance entre la regulación y el crecimiento de las centrales atómicas; o sea, entre la regulación y la promoción de esa opción energética. Esta posibilidad comenzó a ser sopesada por los científicos e ingenieros de más experiencia que habían estado directamente relacionados con los diseños de los primeros modelos de reactores nucleares. Es el caso de Alvin Weinberg, quien había patentado junto a Eugene Wigner el reactor de agua ligera LWR (de los tipos PWR y BWR). Previsto para propulsar a los submarinos, este modelo terminó imponiéndose a nivel mundial en la rama nucleenergética (Weinberg, 1994).

#### 4.2/ La aceptabilidad del riesgo como problema «transcientífico»

Al enfocar la aceptabilidad del riesgo nuclear y radiológico como «Regulator's Dilemma», Alvin Weinberg comprendió que esta problemática superaba la división entre propiedad pública y propiedad privada, mientras que su repercusión a largo plazo hacía que la cuestión de cuán seguro es lo suficientemente seguro se convirtiera un dilema que trascendía los límites de la ciencia, poniendo a prueba la honestidad de los expertos para reconocerlo (Weinberg *et al*, 1985: 11). Por esta y otras disidencias, aunque nunca dejó de ser un partidario ferviente de la energética nuclear, Weinberg resultaría el experto diametralmente opuesto a Chauncey Starr. Este último seguía defendiendo que el aumento de las centrales atómicas era un riesgo aceptable a pesar de haber ocurrido TMI-2, mientras que el rechazo del público a esa promisoriosa opción energética se debía a la percepción distorsionada, incompresiones e irracionalidad de la gente.

Unos años antes del accidente, en su artículo *Science and Trans-Science* (1972), Weinberg había alertado de que la energética nuclear traía consigo una serie de problemas «transcientíficos», entendiéndolos como «preguntas que se pueden hacer a la ciencia y que la ciencia no puede responder» (Weinberg, 1972a: 209). Este concepto de «transciencia» se ha convertido en una de las nociones claves de los estudios CTS (OIE, 2001), pero suele invocarse sin tener en cuenta su origen contextual: las preocupaciones de un gran ingeniero nuclear sobre cuáles son los límites de su responsabilidad política, al carecer de respuestas a cuestiones bien planteadas por las ciencias sociales y el público en general. De ahí el significado del prefijo «trans», en el sentido de «superior a la ciencia», sabiendo que la cuestión dilemática no consiste solamente en la seguridad tecnológica de los reactores nucleares, sino en cuál sería el efecto a largo plazo de la radiación de bajo nivel en los organismos biológicos. Estas interrogantes se habían agudizado después de TMI-2 y provocaron que Weinberg fundamentara la necesidad de una moratoria de la energética nuclear (Weinberg, 1981).

Sus tempranas preocupaciones sobre el curso de los acontecimientos en la esfera atómica ya aparecían sugeridas en el libro *Reflections on Big Science* (1967), un neologismo que había acuñado en 1961 para definir el auge científico después de la Segunda Guerra Mundial. Por «gran ciencia» se refería a los megaproyectos en laboratorios financiados por el gobierno como el Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Cuando este se encontraba a punto de ser desintegrado para concentrar toda las investigaciones nucleares en la otra institución homóloga: el Argonne National Laboratory, felizmente el ORNL se salvó gracias a que Weinberg fue elegido su director en 1955 y, bajo su mandato, enseguida fructificó uno de esos proyectos de alto significado estratégico: el United States Aircraft Reactor Experiment (ARE).

Consistía en el diseño de un reactor nuclear de combustible líquido para propulsar aviones bombarderos de largo alcance que pudieran estar semanas enteras en el aire. Con ese objetivo, por primera vez fue implementada la tecnología de sales fundidas (fluoruros de uranio-235, sodio y zirconio) que había sido propuesta por Wigner y el radioquímico Harold Hurey en época del Manhattan Project (Gehin, 2015). Una vez logrado que ese prototipo de reactor

funcionara en 1956, aunque tuvo éxito, no llegó a utilizarse porque el ARE fue clausurado por el presidente Kennedy en 1961, cuando los misiles balísticos intercontinentales ya se habían impuesto y se hizo evidente el enorme riesgo ambiental de producirse un accidente nuclear a bordo de un avión en pleno vuelo (Snyder, 1996).

Participante en el Proyecto Manhattan, Weinberg perteneció al grupo de físicos que logró la primera reacción nuclear en cadena bajo la dirección de Enrico Fermi y Leó Szilárd, aunque no estuvo de cuerpo presente cuando se probó por primera vez el Chicago Pile-1 (CP-1), el 22 de diciembre de 1942. Más relevante fue su trabajo junto a Wigner en la concepción del X-10 Pile como planta piloto para la producción de plutonio en Clinton Laboratories, que en 1948 sería renombrado como ORNL (Quist, 2002). A esa etapa de su vida, Weinberg se refiere con vehemencia en el libro autobiográfico *The First Nuclear Era: The Life and Times of a Technological Fixer* (1994), ya que entonces Wigner había tenido la idea de aprovechar el fértil torio-232 para irradiarlo neutrónicamente y convertirlo en el fisible uranio-233. De esta manera, no haría falta el uso de uranio-235 y podría aspirarse a una fuente de energía nuclear teóricamente inagotable, más segura y menos proliferante.

Luego de ser clausurado el proyecto del avión con propulsión nuclear, Weinberg aprovechó para acometer aquella innovación que había compartido con Wigner. Impulsa entonces el proyecto experimental de reactor de sales fundidas MSR (Molten Salt Reactor), cuyo combustible era una mezcla líquida de esos actínidos (torio-232 y uranio-233) con fluoruros de litio y de berilio. Entre otras ventajas, esa mezcla fundida cumplía la triple función de refrigerante, moderador y aislamiento, además de que podía ser filtrada sobre la marcha para extraerle los elementos radiactivos residuales que entorpecen la reacción de fisión en cadena. Llamado «reactor químico» por ser diferente a los demás reactores —basados en el combustible sólido—, el MSR se convirtió para Weinberg en el principal *leiv motiv* de su carrera profesional como ingeniero, luego de haber patentado junto a Wigner el principio de trabajo de los LWR.

Weinberg siempre había estado preocupado por la seguridad de esos reactores nucleares de agua ligera desde que se había decidido aumentarles su potencia y serializarlos aceleradamente para fines comerciales. También desconfiaba de los programas informáticos empleados para evaluar su sistema de enfriamiento (Walker, 2000a). Por demás, se mostraba totalmente contrario al proyecto de reactor reproductor rápido de metal líquido LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor), a cuyo desarrollo la AEC concedió toda prioridad, favoreciéndolo financieramente en detrimento del Molten Salt Reactor, que por este motivo fue clausurado en época del presidente Richard Nixon. Decepcionado por la pérdida de su ensoñado proyecto, Weinberg se lamentaría de tal decisión en carta al eminente radioquímico Glenn Seaborg: «El problema no es que nuestra idea sea mala, sino que es diferente de la línea principal, y tiene un sabor demasiado químico como para que los no químicos puedan apreciarla plenamente» (Gehin, 2015: 32).

Lo cierto es que, a pesar de su consagración al desarrollo de la energética nuclear, los puntos de vista liberales le habían granjeado a Weinberg una reputación de disconforme y polemista.



En osada alusión al proyecto de reactor reproductor rápido, al que se oponía resueltamente, había expresado en conferencia a los miembros de la American Nuclear Society:

Nosotros, el pueblo nuclear, hemos hecho un pacto faústico con la sociedad. Por un lado, ofrecemos —en el horno catalítico nuclear (o sea, el reproductor)— una fuente inagotable de energía. Incluso a corto plazo, cuando usamos los reactores ordinarios, ofrecemos energía más barata que la energía de los combustibles fósiles. Además, cuando se maneja adecuadamente, esa fuente de energía es casi no contaminante. El quemado de combustible fósil tiene que emitir óxido de carbono, nitrógeno y probablemente emitirá siempre dióxido de sulfuro; por el contrario, no hay razón intrínseca por la cual los sistemas nucleares deban emitir elementos contaminantes, excepto calor y restos de radiactividad. Pero el precio que exigimos a la sociedad por esta mágica fuente de energía es tanto una vigilancia como una longevidad de nuestras instituciones sociales, a las que no estamos acostumbrados (Weinberg, 1972b: 27).

A fin de cuentas, su postura irreverente para con los planes del AEC le costó que fuera despedido como director del ORLN en 1973, luego de casi un cuarto de siglo al frente del mismo. Entonces fundó el Institute for Energy Analysis (IEA), donde se hicieron los primeros estudios del calentamiento global por causa del CO<sub>2</sub> y fueron acometidos proyectos para el aprovechamiento de la energía solar. Al ocurrir Three Mile Island en 1979 y cumplirse dramáticamente algunas de sus observaciones críticas como ingeniero, Weinberg se empeñaría en fundamentar la necesidad de una Segunda Era Nuclear. En su opinión, la primera era nuclear debía darse por concluida cuanto antes para, aprovechando una moratoria de diez a quince años, impulsar el renacimiento de esa opción energética sobre nuevas premisas ingenieriles. Con esta postura radical, Weinberg trataba de responder a la problemática del Regulator's Dilemma, a cuyo análisis se dedicó junto a varios investigadores del IEA en el marco de un proyecto auspiciado por MacArthur Foundation y Mellon Foundation.

Ese estudio se proponía dilucidar si realmente la Nuclear Regulatory Commission (NRC) estaba en condiciones de otorgar licencias a la construcción de más reactores, una vez que se decidiera levantar la moratoria temporal a raíz de Three Mile Island<sup>40</sup>. Para ello había que responder a dos grandes interrogantes: «¿Puede gestionarse la regulación si la base científica en la que se basa el régimen regulador es muy incierta en sí misma?», y «¿puede considerarse que la evaluación probabilística del riesgo (PRA) es suficientemente confiable para permitir su empleo de manera eventual en el otorgamiento de licencias?» (Bankerbus *et al*, 1985: 2). Junto al politólogo Jack N. Barkenbus y el ingeniero S. David Freeman, Weinberg encara esas dos problemáticas con vistas a lograr un consenso, aunque los tres expertos difieran en sus conclusiones.

---

<sup>40</sup>Una moratoria no oficial entró en vigencia desde que, por decisión propia, la NRC detuvo la concesión de licencias para nuevos reactores después del accidente, si bien las unidades que ya estaban en construcción fueron completadas a lo largo de los años, la última en 1996. Desde 1978 —un año antes de TMI-2— no se aprobó ningún reactor nuevo hasta 2012, cuando fue autorizada la construcción de cuatro unidades de tipo avanzado (Inman, 2015).

Esgrimiendo el concepto de *trans-science*, el verdadero objetivo de esa investigación es subrayar cuáles desafíos de la energética nuclear no se habían resuelto todavía por ausencia de una ciencia sólida y por insuficiencias de la evaluación técnica de riesgos.

Sin embargo, a diferencia de sus reflexiones críticas en *Science and Trans-Science* (1972), escrito trece años antes, ahora Weinberg se atreve a vaticinar que la ciencia podría solucionar el dilema de la regulación —o lo que es decir, del riesgo aceptable—, salvando a la opción nuclear de la animadversión pública. Para ello propone dos categorías en su trabajo *Science and its limits: the Regulator's Dilemma* (1985): el «arreglo tecnológico» (*technological fix*) y el principio *De minimis*. La primera categoría se refiere a los llamados reactores inherentemente seguros (*inherently-safe reactors*), que debían sentar las bases tecnológicas para iniciar la *Second Nuclear Era*. La segunda categoría se refiere a una propuesta de solución regulatoria para lidiar con el dilema de los efectos de las bajas dosis/tasas de dosis de radiaciones ionizantes sobre el ser humano.

#### 4.2.1/ Arreglo tecnológico (Technological fix) y propuesta De minimis

En *Science and Trans-Science* (1972), Weinberg ya había señalado dos cuestiones ingenieriles de los reactores nucleares como «transcientíficas»:

—la imposibilidad de comprobar directamente que se cumplen las probabilidades de eventos demasiado infrecuentes como la fusión del núcleo con liberación radiactiva. A pesar de que los árboles de accidentes probables tienen en cuenta la mayoría de los fallos posibles, siempre podría quedar alguno sin identificar. Por demás, como la probabilidad de esos accidentes puede ser muy baja ( $10^{-7}$  por reactor/año), resulta imposible corroborar esa predicción en la práctica, pues se necesitaría construir 1000 reactores que operaran 10 000 años cada uno y así poder tabular su historia de operación<sup>41</sup>.

—las imprecisiones relacionadas con el diseño de nuevos prototipos de reactores nucleares cuando estos son llevados finalmente a escala real. En este sentido, Weinberg afirma que los ingenieros siempre trabajan contra tiempo y presupuesto económico, aprovechando los datos a mano, sin poder permitirse el lujo de examinar cada pregunta con el rigor científico que tal vez merezcan. Aunque se haya aplicado la sabiduría o «juicio de ingeniería» al desarrollo de cualquier tecnología de avanzada, siempre contendrá factores de incertidumbre o «transcientíficos», máxime si se trata de un reactor nuclear cuyo prototipo no puede probarse de antemano por ser demasiado grande y costoso (Weinberg, 1972a). La ejemplificación que ya entonces hace Weinberg con el reproductor de plutonio de 1000 MW de potencia es muy significativa, porque se trata precisamente del Clinch River Breeder Reactor Project, al que siempre se opuso y que después fue detenido por el presidente Jimmy Carter en 1977, atendiendo a su posible empleo como productor de plutonio con fines militares (Carter, 1979).

---

<sup>41</sup> A partir del informe Rasmussen (WASH-1400), este valor de la probabilidad de fusión del núcleo se consideró  $10^{-4}$  o  $10^{-5}$ / reactor-año. Dicho informe asignó el valor de  $10^{-9}$ / reactor-año a la probabilidad de muerte debido a un accidente nuclear, equiparándola a la provocada por la caída de un meteorito.

Debido a esas dos cuestiones ingenieriles, Weinsberg sostiene que la evaluación probabilística de riesgos (PRA) solamente podría manejarse para la concesión de licencias a nuevos reactores, si es capaz de disminuir los niveles de incertidumbre hasta lograr que la probabilidad de fusión del núcleo se encuentre en el orden de  $10^{-6}$  o  $10^{-7}$ /año-reactor, en lugar de  $10^{-4}$  o  $10^{-5}$  como establece el informe Rasmussen. El sentido de su propuesta es que la probabilidad de un accidente como TMI-2 termine resultando tan despreciable que pudiera equipararse a los llamados «actos de Dios» (*Acts of God*); o sea, a los sucesos naturales que son inesperados e imprevisibles como los terremotos. De esta manera, la opinión pública quedaría convencida de abstenerse a hacer preguntas que no pueden ser respondidas por la ciencia. Sin embargo, en opinión de Weinberg, esa meta resulta casi imposible a partir de los dos estimados en que debe desglosarse la famosa ecuación del riesgo:  $R(C) = P \times C$ .

El múltiplo **P** es la probabilidad de accidentes por año, mientras que **C** es el monto de los daños; en primer lugar, los efectos perjudiciales de las radiaciones ionizantes sobre la salud humana. En lo que respecta al primer estimado, TMI-2 rompió el pronóstico de Rasmussen sobre fusión del núcleo, ya que ocurrió antes de que los LWR cumplieran 700 años-reactor de explotación; sin embargo, hacia 1985 ya habían pasado 1500 años-reactor sin que ocurriera otro hecho similar. Esta incongruencia ilustra «hasta qué punto la ciencia es incapaz de pronosticar con suficiente exactitud cuándo podría ocurrir otro accidente raro, mientras que el paso del tiempo —por así decirlo— “aniquila” (*annihilate*) la incertidumbre en la medida de que se siga cumpliendo la estimación probabilística» (Weinberg, 1985: 5).

De ahí que Weinberg proponga mantener la moratoria nuclear; o sea, dejar de construir reactores para comprobar si no se repetía otro accidente con fusión de núcleo como TMI-2. Entonces podría saberse si realmente se seguía cumpliendo el pronóstico de Rasmussen: un accidente de ese tipo por 10 000 años-reactor. A la par se aprovecharía para acometer un arreglo tecnológico (*technological fix*): el diseño de reactores inherentemente seguros, totalmente «determinísticos», de modo que el análisis probabilístico PRA resultara innecesario y se anulara la incertidumbre como el factor crucial en la evaluación del riesgo. Weinberg aclara que el concepto de «inherentemente seguro» fue introducido en la industria química en 1974 por el profesor Theodore Kletz de la Loughborough University of Technology, luego de haberse producido ese año el desastre en la planta de ciclohexano en Flixborough, Reino Unido, al que siguió la catástrofe de Bhopal en 1984. Esto explica que en *Science and Trans-Science* (1972) todavía no hubiera manejado esa suerte de arreglo tecnológico como una solución futurista para el dilema de la regulación de la energética nuclear.

Si el riesgo aceptable se torna un problema transcienceífico cuando se trata de eventos raros (*rare events*) como los accidentes de Three Mile Island o Bhopal, aun más controversial es el problema de las consecuencias radiológicas a largo plazo. Al respecto, Weinberg reconoce: «Desafortunadamente, el tiempo no anihila las incertidumbres sobre esas consecuencias [radiológicas] tan inequívocamente como ocurre con la frecuencia de accidentes» (Weinberg, 1985: 5). Arriba entonces a la conclusión de que la «incertidumbre intrínseca» (*intrinsic uncertainty*) resulta el factor determinante que delimita la frontera entre ciencia y transciencia.

Bajo este segundo dominio —o sea, la transciencia— caerían aquellos fenómenos cuya probabilidad de ocurrencia es altamente incierta, ya sea un accidente o una enfermedad:

(...) aunque la posibilidad de que ocurra un evento, o una enfermedad causada por una exposición específica, se presenta como una probabilidad, la probabilidad en sí misma es una demarcación muy incierta entre lo que hemos llamado ciencia y transciencia: el dominio de la ciencia cubre fenómenos que son deterministas o su probabilidad de ocurrencia puede afirmarse con precisión; el dominio de la transciencia, aquellos eventos cuya probabilidad de ocurrencia es en sí misma altamente incierta (Weinberg, 1985: 3).

Para el caso del riesgo radiológico, la solución paliativa sería fijar unos niveles mínimos de exposición a la radiación «más allá del efecto demostrable» (*beyond demonstrable effect*). Así quedaría definido el umbral «transcientífico» por debajo del cual se reconoce que la ciencia no tiene respuestas concisas sobre los posibles daños a la salud. Ese *de minimis* podría ser la media de las fluctuaciones de la radiación natural de fondo por cada país o región, y en caso de accidente nuclear, un por ciento de la dosis que causaría efectos somáticos comprobados (Adler y Weinberg, 1978). Antes de proponer estas cuestiones, Weinberg se cuida de reconocer que el límite entre ciencia y transciencia se torna confuso al mezclarse hechos y valores:

Un científico que cree que la energía nuclear es malvada porque inevitablemente conduce a la proliferación de las armas nucleares (lo cual es una práctica común en la oposición a la energía nuclear) es probable que juzgue los datos sobre inducción de leucemia por exposiciones de bajo nivel en Nagasaki de una manera diferente a un científico cuya carrera se ha dedicado a hacer que la energía nuclear funcione. La disonancia cognitiva es casi inevitable cuando los datos son ambiguos y las apuestas sociales y políticas son altas (Weinberg, 1985: 10).

En resumidas cuentas, el estudio de la IEA sobre el dilema de la regulación concluye que la PRA no resuelve la cuestión de cuán seguro es lo suficientemente seguro, sino que la evaluación probabilística sirve —en todo caso— para establecer los límites numéricos por debajo de los cuales el riesgo aceptable se convierte en un problema transcientífico que debe discutirse políticamente para la toma de decisiones en las instancias democráticas como el Congreso. A esta conclusión llegan Weinberg y Freeman, mientras Barkenbus descarta rotundamente el uso de la PRA para el establecimiento de estándares y licencias, alegando que sus incertidumbres son demasiado grandes para obtener una estimación cuantitativa creíble de la probabilidad de fusión del núcleo. Este experto considera que, sea cual fuere su capacidad predictiva, dicha metodología evaluativa es inescrutable a la luz de las sospechas públicas. En consecuencia, Barkenbus afirma que los futuros reactores deben basarse en los principios de seguridad inherente y demostrable. Si bien Weinberg reconoce que piensa de igual manera, al final opta por una recomendación más comedida, teniendo en cuenta los obstáculos de índole política y práctica que traería consigo la posición extrema de su colega.

#### 4.2.2/ Segunda Era Nuclear

Aunque la idea de una Segunda Era Nuclear fue rechazada en un primer momento por la industria al considerarla poco realista, Weinberg continuó predicándola a través de los años como la única manera de responder a la pregunta *How safe is safe enough?* Bastante alejado de sus criterios anteriores, ya sin hablar de *transciencia* y del principio *De minimis*, su discurso empieza a tener entonces un carácter persuasivo, sin dejar de ser optimista, al interpelar a sus homólogos ingenieros y demás expertos nucleares para que asuman la responsabilidad en cuanto al futuro de la energética nuclear. Evocando su metáfora del «pacto faústico», se dirige a ellos con estas palabras a pocos años de haber ocurrido el desastre de Chernobyl:

¿Llegaremos a una segunda era nuclear, surgida de las cenizas de Chernobyl y Three Mile Island, en la que el público acepte los reactores como seguros, no porque los argumentos cuantitativos pronostican una probabilidad muy baja de un accidente con consecuencias inaceptables, sino porque la seguridad de estos reactores son comprensibles y plausibles? ¿O se alejará la segunda era nuclear en un caos de recriminaciones y protestas, porque el público simplemente no puede ser convencido, incluso, por esos reactores que encarnan la seguridad pasiva e inherente?» (Weinberg, 1989: 57).

Al plantearse el riesgo aceptable como un problema transcienceífico y, al unísono, sostener que el dilema de la regulación puede resolverse, Weinberg termina atrapado dentro de los límites que se ha impuesto a sí mismo como defensor de la energética nuclear en plan futurista. Aunque su postura como ingeniero es radicalmente opuesta a la visión pragmática y utilitaria de Starr, ambos son promotores de esa opción energética como una panacea que salvará el mundo. Es por eso que definimos la existencia del *dilema regulación/promoción*, y no solo de un *Regulator's Dilemma*, entendiendo por «promoción» aquellos esfuerzos del sistema tecnocienceífico nuclear para ofrecer una respuesta favorable a la pregunta *¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?* A fin de cuentas, los expertos nucleares tratan de que el dominio de la fisión atómica no sucumba a la exacerbación de su carácter único como riesgo tecnológico a nivel global. Sin embargo, cada accidente de magnitud catastrófica ha contribuido a dudar sobre la pertinencia de esa interrogante de Starr, acentuando su carácter dilemático y dejándola en vilo, sin una respuesta concisa.

Este planteamiento nuestro del dilema regulación/promoción se entiende mejor cuando se acepta que la diversidad de los puntos de vista relativos a un riesgo determinado no depende solamente del nivel de competencia tecnocienceífica de cada individuo y no se limita, por tanto, a una mera oposición entre expertos y no expertos. Las opiniones y las actitudes hacia el riesgo nuclear y radiológico dependen también de los valores en los que creemos y de la cultura a la que nos adherimos. Este «sesgo cultural» hace inoperantes los argumentos científicos como la evaluación probabilística, porque sitúa el debate en otro nivel que va más allá —incluso— de lo «transcienceífico», al plantear cuestiones difícilmente cuantificables porque son de índole moral y ética.

#### 4.3/ *La aceptabilidad del riesgo desde la antropología cultural*

La visión sociológica más crítica para con los métodos cuantificadores de evaluación del riesgo vino de la antropóloga inglesa Mary Douglas, autora junto al politólogo estadounidense Aaron Wildavsky del libro *Risk and Culture. An Essay on the Selection of Thecnological and Environmental Dangers* (1982). A este seguirá *Risk acceptability according to the social sciences* (1985), en el que Douglas cuestiona severamente tanto el método de preferencias reveladas de Starr como el método psicométrico de Slovic, al considerar que ambos desprecian la dimensión social que subyace al problema de la aceptabilidad y/o tolerabilidad del riesgo. La antropóloga considera que tanto el enfoque ingenieril como el enfoque psicológico cognitivo se supeditan a la teoría de la elección racional, aceptando sus axiomas e hipótesis restrictivas (Douglas, 1985). Junto a la racionalidad económica basada en la maximización de la utilidad o beneficio, en el caso de los ingenieros se pone también de manifiesto su adhesión incondicional a los dictámenes de la racionalidad tecnocientífica:

Cuando una disciplina establecida aborda un campo nuevo, algo acaece de forma inevitable a sus métodos. A veces se transfiere una regla empírica; a veces, solo una metáfora. Los ingenieros dieron un salto atrevido cuando aplicaron su método regular de trabajo a la aceptación pública del riesgo. La mayoría de sus problemas de análisis derivan de no tomar suficiente conciencia de los cambios de metáfora. La “tolerancia” de la fatiga física aplicada a una máquina, significa algo bien diferente de la tolerancia humana de los insultos o adversidades; asimismo, las ideas de “carga de riesgo” y “fatiga”. Pero su ejercicio no es una mera fachada retórica, puesto que permanece fiel a las prácticas normales de la ingeniería, donde se revela que la tolerancia no deja de funcionar. Los ingenieros no establecen diferencia alguna en el método tanto si agregan las fatigas que un puente o un sistema humano revelan que pueden soportar (Douglas, 1996: 55).

Es así que Douglas rechaza tajantemente la extrapolación de los métodos de evaluación probabilística y del análisis coste/beneficio desde el campo técnico hacia un nivel societal para gestionar la aceptabilidad pública del riesgo tecnológico. En su opinión, ese enfoque técnico-formal asume puerilmente que «el público se compone de individuos aislados independientes que se comportan de forma natural como ingenieros» (Douglas, 1996: 47). Si esto se cumpliera, bastaría informar sobre la inocuidad o bajo riesgo de una opción tecnológica para compensar el déficit cognitivo y la comprensión acabaría con el miedo irracional. Sin embargo, lo que está en juego es la propia noción de *racionalidad*, cuya interpretación excesivamente estrecha por los expertos técnicos se restringe al análisis probabilista. ¿Por qué entonces la gente se muestra tan sensible frente al riesgo de un desastre nuclear, aun cuando acepte que su ocurrencia es mínimamente probable, mientras desdeña los riesgos cotidianos como los accidentes domésticos, laborales o de tráfico?

Si bien reconoce que los estudios psicométricos fueron los primeros en reparar que la preferencia o aversión del público profano no se basa exclusivamente en estimaciones cuantitativas, Douglas cuestiona a la psicología cognitiva por abordar al individuo como

un sujeto neutro y libre de toda condición cultural. En oposición a esos dos enfoques (técnico-formal y psicológico cognitivo), que considera subordinados al enfoque del actor racional, el enfoque antropológico cultural preconiza que la percepción pública del riesgo y su aceptabilidad están relacionadas de manera prioritaria con las creencias y juicios de valor, en primer lugar con los ideales de moral y justicia. Sobre esa base, conjetura que la brecha perceptiva entre expertos y no expertos únicamente podría cerrarse mediante una visión cultural integradora:

(...) los términos clave en el debate sobre la tecnología son el riesgo y la aceptabilidad. Al calcular la probabilidad de peligro de la tecnología, uno se concentra en el riesgo que está físicamente “ahí afuera”, en la intervención del hombre en el mundo natural. Al determinar lo que es aceptable, uno se concentra en la incertidumbre que está “aquí”, dentro de la mente de cada persona. Pasar de “allá afuera” a “aquí dentro” requiere una conexión entre los peligros de la tecnología y la percepción de la gente de esos riesgos. Ni un enfoque (que los peligros de la tecnología son objetivamente evidentes) ni el otro (que todas las percepciones son subjetivas) pueden conectar los dos. Solo un enfoque cultural puede integrar los juicios morales sobre cómo vivir, con los juicios empíricos sobre cómo es el mundo ( Douglas y Wildavsky, 1983, 9-10).

La obra de Douglas y Wildavsky se considera precursora del campo de estudios dedicado a la «construcción social del riesgo» (*social construction of risk*): «Las ideas de la percepción pública del riesgo y sus niveles aceptables son construcciones colectivas, un poco como el lenguaje y un poco como el juicio estético» (Douglas y Wildavsky, 1983: 186). Su tesis principal es que las personas eligen o desechan los peligros a partir de sesgos o pautas culturales (*cultural bias*) que han adquirido dentro de un tipo de organización o estructura social: «Elegimos los riesgos en el mismo paquete que elegimos nuestras instituciones sociales» (Douglas y Wildavsky, 1983: 9). Al priorizar el ser colectivo por encima de la psicología individual, el enfoque antropológico cultural descarta que haya irracionalidad por parte del público profano al percibir los riesgos, como tampoco considera un factor determinante que el ser humano tenga «racionalidad limitada» (Simon, 1957) o un pensamiento intuitivo erróneo sobre el azar y las probabilidades (Kahneman y Tversky, 1973). Las ideas de qué constituyen riesgos aceptables e inaceptables dependerán enteramente del nivel de compromiso y responsabilidad compartidos por los miembros de un colectivo en la interacción social: «Cuando se le pregunta por los riesgos que afronta, un individuo tiene que responder partiendo de alguna norma culturalmente establecida de cautela debida» (Douglas, 1996: 106).

A lo largo de la historia de la humanidad han persistido cuatro tipos de organización social o cosmovisiones culturales: *jerarquismo*, *individualismo*, *igualitarismo* y *fatalismo*. El sustrato antropológico de la percepción del riesgo se fundamenta en esta controversial clasificación o «mapa cultural» que Douglas propuso con ayuda de la *grid/group typology* (tipología retícula/grupo). Esta metodología ha resultado muy influyente, pero también muy discutida por reducir la diversidad y heterogeneidad social a ese número limitado de formas

culturales: apenas cuatro, aunque también se manejan cinco por otros autores (Oldroyd, 1986). Asimismo, por su empleo profuso en una amplia gama de disciplinas y campos de estudio, no solo en la percepción del riesgo, esa tipología tiene múltiples interpretaciones que dificultan su entendimiento y ponen en duda su veracidad explicativa (Boholm, 1996). Explicaremos *grosso modo* ese modelo heurístico para relacionarlo con el dilema regulación/promoción de la energética nuclear, si bien este no fue el propósito inmediato de Douglas. Así justipreciamos el enfoque antropológico, aprovechando su idea de constructo cultural para nuestro propósito de fundamentar el carácter único del riesgo nuclear y radiológico también desde una perspectiva socioconstructivista.

El interés de la antropóloga británica por el tema del riesgo tiene como antecedente *Purity and danger: A study of the concepts of pollution and taboo* (1966), el libro que sintetiza sus investigaciones sobre las religiones primitivas, en especial su trabajo de campo con los Lele, una tribu africana que vivía en el Congo Belga. Esos primeros estudios de Douglas se inscriben dentro del funcionalismo estructuralista desarrollado por el sociólogo Émile Durkheim y el etnólogo Marcel Mauss, ambos franceses, así como por el antropólogo inglés Edward E. Evans-Pritchard, de quien ella fue discípula. A través de una lectura compleja y minuciosa del ritual, la religión y el estilo de vida en las comunidades tribales, Douglas sugiere que el miedo a la contaminación (suciedad o impureza) servía en la antigüedad para obtener la sumisión de los miembros al colectivo mediante un sistema de prohibiciones y tabúes religiosos. Ahora bien, teniendo en cuenta que esa práctica cultural se había ejercido durante siglos para garantizar el control social, ¿acaso no podría ocurrir algo semejante en la sociedad contemporánea, cuando las diferentes percepciones de los riesgos tecnológicos y ambientales provocan el antagonismo entre los expertos técnicos y el público lego?

A instancias de Aaron Widalvsky, quien se interesaba en el trasfondo cultural de las preferencias políticas, Douglas se animó a aplicar su «antropología de la contaminación» a los conflictos públicos sobre la energía nuclear y otros problemas ecológicos que protagonizaba el movimiento ambientalista estadounidense en la década de los años 70 del siglo XX. En el prefacio a la reedición de *Purity and Danger* en 2002 por Routledge Classics, ella esclarece cuál es el vínculo entre su enfoque antropológico de las culturas primitivas y la hipótesis principal del ensayo *Risk and Culture*, publicado en 1982 en coautoría con aquel influyente politólogo estadounidense. Aunque sus conclusiones son extremadamente polémicas, esta obra conjunta significó un hito sobre la problemática del riesgo:

Los peligros son múltiples y omnipresentes. La acción se paralizaría si los individuos prestaran atención a todos ellos; la ansiedad debe ser selectiva. Recurrimos a la idea de que el riesgo es como el tabú. Los argumentos sobre el riesgo están muy cargados, moral y políticamente. Poner nombre a un riesgo equivale a una acusación. La elección de qué peligros son aterradores y cuáles pueden ignorarse depende del tipo de comportamiento que los acusadores del riesgo quieran detener. Ni los deportes riesgosos, ni tomar sol, ni cruzar la calle tiene que ver con el peligro nuclear o químico —en resumen, con la gran industria y el gobierno—. Investigaciones



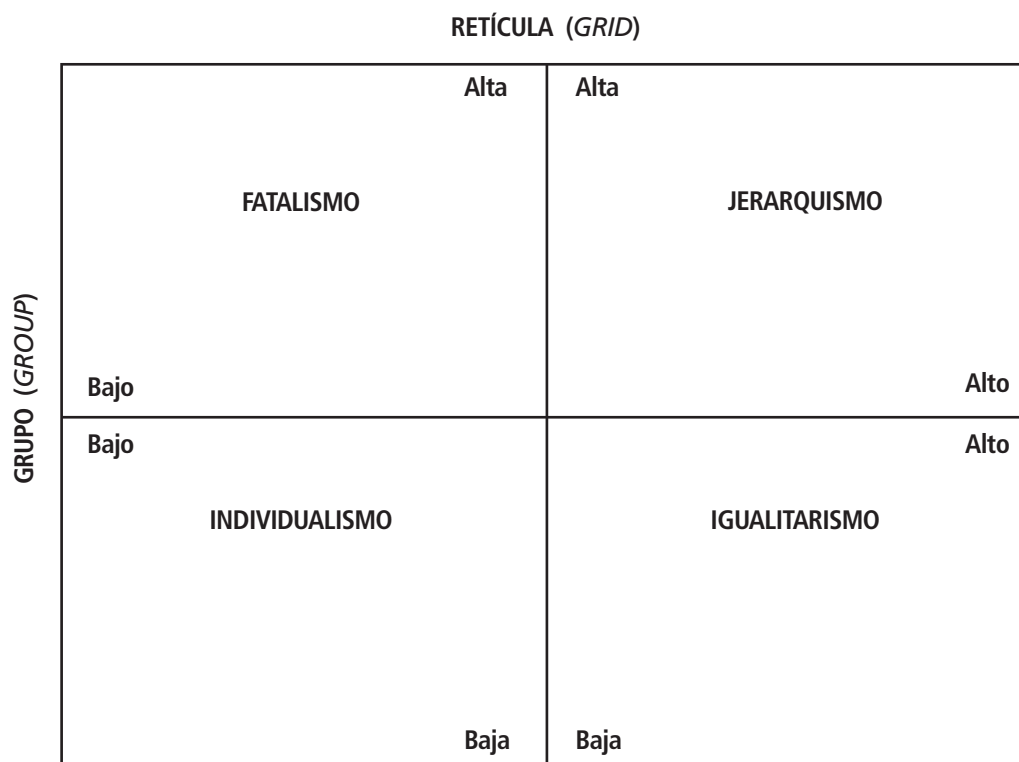
posteriores demostraron que la afiliación política era el mejor indicador de la distribución de actitudes hacia el riesgo (Douglas, 2002: 19).

A partir de *Risk and Culture*, la teoría cultural del riesgo se consolida gracias al ya mencionado modelo *group/grid*, así llamado porque estipula esas dos dimensiones de la sociabilidad: retícula y grupo. La primera versión de esa tipología había sido estrenada por Douglas en *Natural Symbols: Explorations in Cosmology* (1970) para identificar el vínculo entre las estructuras sociales y las visiones de los peligros en la comunidad primitiva, tal y como había sugerido en *Purity and Danger*. Y si bien la antropóloga emplea dicho esquema en obras posteriores, no es hasta después de aplicarlo al estudio de la percepción del riesgo en la sociedad contemporánea que su potencial heurístico comenzó a llamar la atención entre estudiosos de varias disciplinas, cuando estos reparan en que el enfoque antropológico cultural puede enriquecer el análisis sociológico (Fardon, 2002). Desde un inicio, a la par de Douglas, autores como Michael Thompson y Steve Rayner aprovecharon ese método de comparación y clasificación de tipos culturales, introduciéndole ajustes o variaciones para aplicarlo a disímiles temáticas, incluida la percepción de la energía nuclear y la gestión de la radiación en hospitales (Thompson, 1982; Rayner, 1986).

#### 4.3.1/ *La tipología retícula/grupo (grid/group typology)*

La dimensión *group*, como su nombre lo indica, se refiere al grado de incorporación del individuo dentro de un grupo. Este puede definirse como una escala que va de fuerte a débil: el grado fuerte es cuando el grupo presiona sobre el individuo; el débil, cuando está liberado o abandonado de dichas presiones. Por *grid (retícula)* se entiende el conjunto de reglas, normas y valores a los que están sujetas las personas durante sus vidas como ser social. Cuando ese control estructural es alto, significa que el individuo tiene muy limitadas opciones de comportamiento. Cuando es bajo, la persona es libre de actuar y puede negociar sus relaciones sociales. De la combinación de esas dos dimensiones en un eje de coordenadas cartesiano resulta el mapa cultural con cuatro cuadrantes que definen igual número de tipos de organización social, modos de vida o cosmovisiones culturales a las que puede adherirse el individuo (ver figura 14). Cada uno de ellos tiene un patrón cultural de la percepción del riesgo y, por tanto, difieren entre sí hasta el antagonismo.

*Jerarquismo* (grupo y retícula altos): La preferencia de sus miembros es el orden y, en lo posible, siempre tratan de establecer jerarquías y clasificaciones. Los reconocimientos por lealtad dominan este cuadrante y, en los casos extremos, este tipo de organización social tiende a convertirse en un sistema de castas. Se caracteriza por la creencia en teorías o métodos certificados por la ciencia o, más tradicionalmente, por la religión. Adjudica gran importancia a los estándares de seguridad y utiliza los peligros como una oportunidad para reforzar el rigor de las leyes y los reglamentos. Nunca reconocerá algo importante que vaya en detrimento de su sistema jerárquico. El sistema tecnocientífico nuclear es un ejemplo fehaciente por su estructura altamente centralizada, compartimentada y vertical.



**Figura 14: Tipología grid/group de la teoría cultural. Fuente: Stolz, 2014.**

*Individualismo* (grupo y retícula bajos): sus miembros son amantes de la libertad, de talante competitivo y capaces de asumir los riesgos, ya que para ellos las situaciones peligrosas pueden ser un estímulo antes de que un tema de preocupación. Tienden a desdeñar los riesgos medioambientales y tecnológicos porque, dándoles crédito, invitarían a restricciones en el comercio y la industria, dos aspectos de la sociedad moderna que valoran. Un ejemplo serían los jugadores de la Bolsa, para los cuales un peligro importante solamente sería que una recesión rompiera el mercado individualista. Apoyarán la energética nuclear mientras represente el *status quo*.

*Fatalismo* (retícula alta, grupo bajo): los individuos tienen un bajísima filiación grupal y, al mismo tiempo, experimentan un alto nivel de prescripciones y una cantidad significativa de restricciones sociales. Por ser incapaces de iniciar una acción colectiva para cambiar esas convenciones, terminan aislados o marginados. Su sentimiento de un destino abrumador debido a fuerza oscuras o lejanos círculos gobernantes es la característica principal de este tipo de organización social. Los fatalistas tienden a ser indiferentes al riesgo medioambiental. Aquí pudieran clasificarse los inmigrantes refugiados, por ejemplo.

*Igualitarismo* (grupo alto, retícula baja): esta es una de los tipos sociales más controversiales, clasificado también como «enclavismo» (*enclavism*) y «sectarismo» (*sectarism*). La idea básica es que se trata de un tipo de organización social que muestra fuertes afiliaciones entre personas que rechazan la autoridad y cualquier tipo de reglas o convenciones, prefiriendo solo relacionarse con los miembros de su clan o enclave. Esto se traduce en un compromiso duradero con el valor de igualdad, lo que a su vez crea un problema de lealtad: ¿cómo unir a los individuos si no existen otros valores importantes? Según Douglas, el enclavismo

enfatisa en la presencia de peligros externos como una forma de mantener la lealtad. La estructura igualitaria solo se mantiene promoviendo el sectarismo; es decir, manteniendo una fuerte barrera entre miembros y no miembros del grupo. Su percepción de los riesgos es altamente sensible, llegando a hiperbolizar su potencial catastrófico. Sería el caso de las sectas religiosas y los grupos ecologistas como Greenpeace.

De la tipología *grid/group* se colige que los jerárquicos e igualitarios estiman la pertenencia a un grupo, mientras que los individualistas y fatalistas se oponen a la filiación grupal. En lo que refiere al control estructural: jerárquicos y fatalistas coinciden en el reconocimiento del orden y control sociales, mientras que individualistas e igualitarios prefieren sociedades menos estructuradas y menos ordenadas. Paradójicamente, jerárquicos e individualistas defienden el *status quo*, mientras que los igualitarios se oponen y los fatalistas no adoptan ninguna actitud, por estar aislados. Dando por sentado que estos últimos apenas tienen influencia, Douglas y Widalsky tuvieron en cuenta solamente los tres tipos restantes de organización social en su análisis de la sociedad estadounidense: individualismo (adherido al concepto de libertad), jerarquismo (al concepto de orden) y sectarismo (al concepto de pureza). Los autores concluyeron que el movimiento ecologista estaba constituido por ese tercer grupo —o sea, el igualitario, enclavista y/o sectario— que definieron como situado en la periferia de la sociedad, alejado del centro o equilibrio de poder (Douglas y Widalsky, 1982).

La actitud hacia el riesgo de la energía nuclear y la contaminación del aire no significaba que los ecologistas estuviesen convencidos de que una catástrofe ambiental era inminente, sino que era un pretexto para culpar a los jerarquistas e individualistas por su dominio del poder y la economía. Esta es la tesis más controversial de *Risk and Culture*, de la cual podría inferirse que la aceptabilidad del riesgo tecnológico se reduce a un conflicto cultural de naturaleza sociopolítica sobre la confianza o la desconfianza en las instituciones sociales. El libro fue muy criticado en los círculos académicos por su acento político neoconservador y, entre los científicos sociales, el filósofo Ian Hacking cuestionó severamente su «tono alarmantemente irrealista (...) *Risk an Culture* algunas veces discierne en torno a la falacia antropológica de pensar que todo lo que percibimos es un artefacto cultural. De vez en cuando el lector tiene que gritar que algo de contaminación es real» (Hacking, 1983). Ya en calidad de única autora, Douglas responde a esas críticas en *Risk and Blame. Essays in cultural theory* (1992):

Téngase en cuenta que la realidad de los peligros no está en discusión. Los peligros son demasiado terriblemente reales; en ambos casos, modernos y premodernos. Nuestro argumento no trata de la realidad de los peligros, sino de cómo se politizan (...) Es asombroso cómo muchos críticos inteligentes de *Riesgo y Cultura*, incluso antropólogos, cayeron en la trampa de pensar que su argumento pone en duda la realidad de los peligros (Douglas, 1992: 29).

La antropóloga trata de desmarcarse con respecto a las dos categorías extremas en que terminaría dividiéndose la interpretación del riesgo: cuando este se considera «riesgo real» (*real risk*) o «riesgo objetivo» (*objective risk*), mediante el cálculo de probabilidades

y valores esperados, y las definiciones que hacen hincapié en su naturaleza psicológica: «riesgo subjetivo» (*subjective risk*) o «riesgo percibido» (*perceived risk*). Estos dos grupos de adjetivaciones habían conducido a que los enfoques «más técnico» y «más social» se negaran el uno al otro y, aunque se quisiera integrarlos de alguna manera, resultase imposible establecer un concepto o definición unitaria del riesgo. Esto explica en gran medida que se produjera la brecha epistemológica entre los ingenieros nucleares (interpretación realista/positivista del riesgo) y los científicos sociales (interpretación constructivista del riesgo). ¿Pero, cómo zanjar esa brecha? Al respecto, Douglas trata de mediar en tono conciliador:

Lo que parece poner sumamente incómodos a los científicos [entiéndase, físicos nucleares o representantes de otras ciencias de la naturaleza como la biología] es una expresión particular: la “construcción social del riesgo”. Evidentemente existe la idea de que algunos conceptos están libres de toda construcción social y que por ello pueden pretender un grado mayor de realidad. Por el hecho de que hayan aceptado los procesos de construcción social dentro de su campo de estudio, se supone que los especialistas en ciencias sociales consideran que no hay datos irrevocables y que los riesgos no son reales. La palabra “construcción” suena a “fabricación”, es decir, a algo artificial, ficcional, subjetivo: sin embargo, todo concepto posible es una construcción. No existe algo que pueda llamarse una idea no construida. Creo que la expresión “construcción social del riesgo” no debería ofender tantas sensibilidades. Puede haber construcción privada, pero todos los hechos que merecen un examen formal fueron contruidos en un proceso social. Aquellos procesos mediante los cuales se han formado juicios no pueden ignorarse ni barrerse debajo de la alfombra (Douglas, 1998: 175).

A los efectos del dilema regulación/promoción de la energética nuclear, la importancia del enfoque antropológico cultural radica en que contribuyó de manera precursora a descalificar el planteamiento simplista de la aceptabilidad del riesgo como una cuestión supeditada únicamente al contenido técnico y su incomprensión por el público. En su lugar, Mary Douglas reveló la importancia de los sesgos culturales que subyacen a los posicionamiento políticos, si bien su caracterización demasiado radical del riesgo como constructo social se ha considerado un reduccionismo teórico. Este se ha achacado a la debilidad de su fundamentación antropológica que homologa la compleja sociedad moderna con la sociedad primitiva (Rosa, 1998). De ahí que haya sido tildada de profesar un relativismo epistémico en las antípodas del positivismo ingenuo de Chauncey Starr, quien reifica el riesgo objetivo y su cuantificación probabilística (Shrader-Frechette, 1991).

Una aplicación temprana de la teoría cultural del riesgo fue un estudio piloto llevado a cabo en el Laboratorio Nacional Oak Ridge sobre la factibilidad de construir reactores nucleares intrínsecamente seguros durante la década 2000-2010 (Canton y Rayner, 1986). Para ello se necesitaba saber hasta qué punto era posible negociar un consenso entre las distintas partes en conflicto: las empresas energéticas (individualismo) mostraban interés por promover esa nueva tecnología, pero los grupos antinucleares o

locales (igualitarismo) se oponían o exigían compensaciones, mientras las comisiones de servicio público (jerarquismo burocrático) mediaban entre las dos anteriores. Es así que, aplicando la tipología *grid/group* a esos tres entornos organizacionales, se confirmaba que sus diferentes cosmovisiones culturales influían decisivamente al encarar cuál era la necesidad de una planta con ese reactor de nuevo tipo, quién debía pagarla y de qué manera debía ser gestionada tecnológicamente.

El problema de la aceptabilidad del riesgo fue abordado por Cantor y Rayner en términos de «justicia», reformulando la pregunta dilemática *How safe is safe enough?* como *How fair is safe enough?* (¿Cuán justo es lo suficientemente seguro?). Esta interrogante debía ser respondida a través de tres indicadores sociales básicos: atribución de la responsabilidad (*liability*), consentimiento (*consent*) y confianza (*trust*). Reconocidos como factor TLC, estos indicadores fueron añadidos a la ecuación clásica del riesgo tecnológico, quedando la expresión holística  $R = P \times C + TLC$ . De esta manera se expresa que las preocupaciones sociales deben estar al mismo nivel que la evaluación técnica y probabilística, procurándose la participación de los ciudadanos durante las formas más tempranas del proceso de toma de decisiones. La aceptabilidad y/o tolerabilidad del riesgo dependería entonces de que se lograra una comunicación entre las partes involucradas, a pesar de sus diferentes sesgos culturales, para tratar de lograr un consenso político (Rayner, 1984, 1990).

#### 4.4/ *La construcción social del riesgo en la incertidumbre*

Paralelamente a la antropología cultural del riesgo tienen lugar los estudios sociológicos de Brian Wynne en Reino Unido, basándose en sus experiencias como activista durante las audiencias públicas celebradas en 1977 para construir en el condado de Windscale (hoy, Sellafield) una tercera planta de reprocesamiento de combustible nuclear: la Thermal Oxide Reprocessing Plant (THORP). Entre los cometidos de esta instalación estaba suministrar plutonio para el Prototype Fast Reactor (PFR) en Dounreay, norte de Escocia, hasta que este fue clausurado en 1994 (Jensen y Ølgaard, 1996). Las investigaciones empíricas de Wynne se centraron desde un primer momento en las controversias públicas entre las entidades responsables de la THORP y la población local, así como en el análisis de las dimensiones técnica e institucional de la regulación aplicada a los residuos radiactivos. Desde entonces, inicios de la década de 1980, este sociólogo británico se distinguió por su abordaje crítico de los aspectos sociales vinculados a la energética nuclear.

En su libro *Rationality and Ritual: Participation and Exclusion in Nuclear Decision-Making* (1982), Wynne arremete contra la pretendida neutralidad de los expertos nucleares, cuya apelación a la racionalidad tecnocientífica define como «forma ritual de autoridad pública con fines políticos» (Wynne, 1982: 20). Con ello se refiere a que, si bien los ingenieros y otros partidarios de la opción atómica preconizaban una epistemología neutral en los debates sobre la factibilidad económica y ambiental de la THORP, en realidad imponían su discurso racional para mantenerse como protagonistas en la toma de decisiones, velando porque los valores y puntos de vista de los ciudadanos

quedaran excluidos de las deliberaciones. Esto incluía impugnar o desatender aquellos conocimientos locales que resultaban cruciales para la percepción del riesgo por el público laico, tachándolos como «irracionales» o «emotivos» (Wynne, 1987: 285).

Reconociéndose filosóficamente un deudor de Thomas Kuhn y su enfoque historicista de la ciencia, Wynne sostiene que «la tecnología es un proceso histórico, y los riesgos están enraizados en ese proceso» (Wynne, 1987: 53). Por tanto, no existe un riesgo real u objetivo que sea independiente del contexto social: «La base de la percepción relacionada con la aceptabilidad de un “riesgo” es, racionalmente, la experiencia social básica, y no solo el riesgo físico como tal, ni tampoco la tecnología liberada de su contexto. Es la tecnología como está incrustada en una red institucional de control, vista como un proceso organizativo social» (Wynne, 1987: 359). A partir de este presupuesto, sus puntos de vista evolucionarán dentro de la vertiente más representativa del constructivismo social en los estudios CTS. Tributando también a la sociología del conocimiento científico<sup>42</sup>, Wynne ha sido ampliamente reconocido por sus aportaciones —entre otros temas— al esclarecimiento de la distinción entre saber experto y saber laico (Zinn, 2004).

En un inicio, Wynne se inspiró en los trabajos precedentes de su homóloga estadounidense Dorothy Nelkin sobre el manejo político de los argumentos científicos en las controversias públicas acerca de la energía nuclear, enfocándolas como resultado de los divergentes «enquadres» (*framing*) del peligro por los expertos y por los no expertos, respectivamente (Nelkin, 1979; Wynne, 1982). Pero tomando un rumbo propio, el sociólogo británico profundiza en la problemática de la construcción social del riesgo y su relación con las tipologías de incertidumbre, ampliando su campo de miras al enjuiciamiento del «modelo de déficit cognitivo o público» (*public deficit model*). Este término fue acuñado por Wynne hacia 1988 para referirse al esquema explicativo que adoptan los representantes de la comunidad científica con tal de señalar las carencias cognitivas del público laico como el principal motivo de su rechazo a la energía nuclear y otras tecnologías problemáticas (Wynne, 1993). Con el título *The Public Understanding of Science*, el documento más representativo de ese enfoque deficitario es el informe de la Royal Society de Gran Bretaña en 1985, también conocido como informe Bodmer. Una de sus conclusiones más significativas es que, dada la ignorancia del público en lo relativo a cuestiones como el riesgo y la incertidumbre, la «alfabetización científica es un requisito esencial para la vida cotidiana» (Bodmer, 1986: 10).

Oponiéndose radicalmente a que el amplio público sea considerado como un ente pasivo, ignorante y desprovisto de capacidad crítica, Wynne insiste en la importancia de la reflexividad para abordar la comprensión pública de la ciencia (Wynne, 1993). En su opinión, todo conocimiento se vuelve operativo en dependencia del contexto social; o lo que es decir: las fronteras entre la ciencia y la no-ciencia son socialmente construidas, además de que el conocimiento científico incorpora culturas y valores particulares que no siempre son fiables.

<sup>42</sup> La denominada sociología del conocimiento científico (Sociology of Scientific Knowledge, SSK) se desarrolla a partir de la década de 1970, combinando diversos enfoques de la filosofía de la ciencia y de la etnometodología. Dentro de la SSK se destacan el Programa Fuerte de la Escuela de Edimburgo (David Bloor y Barry Barnes, entre otros); el Programa Empírico del Relativismo (Harry Collins); los estudios de laboratorio (Karin Knorr-Cetina y Bruno Latour) y la teoría del actor-red (Bruno Latour). La obra de Wynne se inscribe dentro del enfoque constructivista etnográfico.

De ahí que la experticia profesional no sea el único saber en juego, ni el más valioso de por sí, ya que los ciudadanos también cuentan con su propia dotación de saberes, habilidades, valores y criterios no científicos —pero no por ello menos valiosos— que les permiten jugar un papel activo en su relación con los expertos, y no de mera aprobación de sus afirmaciones. Esto explicaría el carácter conflictual de la percepción del riesgo por el público laico o profano, quien está consciente de su dependencia de las instituciones reguladoras, aunque esto no significa que confíe en ellas (Wynne, 1987, 1993, 1996).

A partir de sus indagaciones sociológicas sobre la gestión de desechos nucleares y el reciclaje del combustible atómico en la región de Cumbria, Wynne sugirió tempranamente la hipótesis de que esa desconfianza pública hacia la credibilidad regulatoria se debe a que la experticia técnica ha sido reacia o incapaz de reconocer en sus modelos científicos a la «incertidumbre social» (*social uncertainty*). A la «incertidumbre técnica o epistémica», relacionada con la ausencia o imprecisión de datos científicos, el sociólogo añade la «incertidumbre estructural o institucional» que es resultado del propio marco analítico (*framework*) que imponen los expertos técnicos, obviando múltiples factores de orden social y cultural. En última instancia, con el objetivo de alcanzar la credibilidad y aceptación públicas, la experticia técnica incluye algunos de esos factores extratécnics dentro de la incertidumbre técnica o epistémica para, supuestamente, evaluarlos con ayuda del análisis probabilístico.

Este «procesamiento burocrático de la incertidumbre» (Wynne, 1987: 8) termina siendo contraproducente, ya que problemas muy serios son encubiertos, ignorados o distorsionados por la interpretación experta, pero su omisión no pasa desapercibida para los demás actores sociales, aunque carezcan de formación científica. Ejemplifica con el aumento de la leucemia infantil alrededor de la planta de reprocesamiento nuclear en Sellafield, cuya incidencia fue detectada en la década de 1980 por gente lego que debió soportar el rechazo de los expertos y el bloqueo al acceso de los datos sanitarios, sin que jamás fuera reconocida la veracidad de sus denuncias luego de corroborarse por la propia experticia (Wynne, 1992a).

Aunque reconozca la validez del concepto de *transciencia* de Weinberg, el significado otorgado a la(s) incertidumbre(s) por Wynne se contrapone a la «incertidumbre intrínseca» de carácter epistémico, solamente técnica, que maneja ese ingeniero nuclear estadounidense para consensuar la aceptabilidad del riesgo tecnológico (ver subacápite 4.1.2). Al respecto, el sociólogo británico insiste en la importancia de distinguir a las tecnologías por su relación con el entramado social. La gestión de desechos radiactivos, cuyo ciclo es mucho más abierto, no puede abordarse de la misma manera que las plantas nucleares y químicas, más susceptibles de ser analizadas como artefactos tecnológicos o sistemas cerrados ajenos al contexto (*free-context*). Por este motivo —explica Wynne—, Weinberg incurre en el error de sobrevalorar el control científico sobre los datos empíricos, obviando la importancia del componente social:

El original concepto de Weinberg de *transciencia* describe muchos problemas del análisis de riesgos que pueden formularse como preguntas científicas y que jamás serán contestadas debido a la imposibilidad de recopilar datos definitivos y controlados. Sin embargo, tiene una

consecuencia desafortunada: implica que el consenso científico está determinado solo por datos empíricos, o dicho de otra manera, que la falta de consenso se debe únicamente a la falta de datos empíricos (Wynne, 1987: 219).

Físico de profesión en ciencias de los materiales, una vez reorientado hacia la sociología del conocimiento científico, Wynne apela a su formación técnica para cuestionar las limitaciones del análisis de riesgo que no solamente rehúye abordar las relaciones sociales, sino que evita manifestarse sobre los procesos ignorados o desconocidos. Esto se manifiesta cuando la evaluación técnica del riesgo omite aquellas contingencias que no pueden interpretarse en el sentido de una relación entre causa y efecto. Únicamente son evaluados, gestionados y regulados aquellos riesgos que pueden ser distinguidos dentro de ciertos modelos científicos. Y aunque, en ocasiones, se vaya más allá del cálculo probabilístico para describir incertidumbres, estas son clasificadas como «incertidumbres epistémicas» y, por tanto, «consagran la noción de que el control inadecuado de los riesgos ambientales se debe solamente a un conocimiento científico inadecuado, y la atención exclusiva se centra en intensificar ese conocimiento para hacerlo más preciso» (Wynne, 1992b, p. 118).

El constructivismo social de Wynne se radicaliza luego de Chernobyl, cuando acomete una profunda investigación sobre las reacciones de los pastores de ovejas en la región de Cumbria frente a las restricciones impuestas a su actividad ganadera debido a la presencia de radiocesio supuestamente procedente de aquella catástrofe (Wynne, 1989, 1992a, 1992b, 1996, 2007). El gobierno británico había decretado la prohibición del movimiento y venta del ganado ovino, una medida potencialmente ruinosa para ese sector marginal de la economía agraria, cuyos ingresos se verían afectados en forma drástica, además de que tampoco podría garantizarse la alimentación de los rebaños inmovilizados debido a la escasez de pastos. El sacrificio al por mayor de esas reses estaba previsto, lo que conllevaría a la ruina de los pastores y su cultura distintiva en esa zona montañosa del noroeste de Inglaterra.

En sucesivos artículos, Wynne teoriza sobre la controversia entre dichos granjeros y los científicos responsabilizados con las versiones oficiales sobre el comportamiento de la radiactividad y la probable duración de las restricciones. Estas fueron variando a lo largo de los años por culpa de las decisiones erráticas de la propia experticia profesional. Seremos exhaustivos en la descripción de este estudio de caso por ser un referente insoslayable de cómo la sociología del riesgo evoluciona después de Chernobyl, incorporando a la *incertidumbre* como categoría social. A partir de este momento priorizamos esta problemática por su alta significación para la comprensión del carácter único del riesgo nuclear y radiológico.

#### 4.4.1/ *Taxonomía de la incertidumbre*

La controversia entre los pastores de Cumbria y los expertos técnicos tuvo como motivo el comportamiento del cesio-137 y el cesio-134 liberados en el ambiente. De acuerdo con una primera opinión de la experticia, esos radioisótopos serían lavados de la vegetación que las ovejas consumían y, arrastrados por el agua de lluvia hacia el suelo, terminarían



absorbidos y sujetados químicamente por el terreno arcilloso alcalino. Dado que no retornaría a la cadena alimentaria, bastaría esperar que el radiocesio consumido por el ganado desapareciera de acuerdo a su vida media biológica en las ovejas, calculada en unos 20 días, después de lo cual su carne sería apropiada para consumo humano. Sin embargo, contrariamente a las suposiciones científicas, los niveles medidos de cesio-137 no mostraron ningún descenso, sino por el contrario. Solo al cabo de los años llegó a conocerse la causa de que errara la predicción científica: en lugar de suelos arcillosos alcalinos, que sí retenían ese elemento radiactivo, los expertos no habían reparado en que aquellas áreas montañosas tenían suelos ácidos de turba, donde ese radioisótopo seguía siendo químicamente móvil. Por tanto, era absorbido nuevamente por las raíces de la vegetación que consumían las ovejas, manteniéndose en la cadena alimentaria.

En el fragor de la crisis en torno a las consecuencias de Chernobyl, salió a relucir la sospecha de que esa contaminación radiactiva se debía realmente a los residuos del complejo de reprocesamiento nuclear de Sellafield, así como al accidente de Windscale en 1957, cuando el famoso incendio del reactor aire-grafito produjo una gran liberación radiactiva en esa misma zona (ver subacápite 2.1). Comenzó a conjeturarse que, desde hacía muchos años, los científicos y el gobierno habían mantenido escondidos esos datos sobre la existencia de altos niveles de radiocesio a favor del viento proveniente de aquella planta. Como prueba de ello, un grupo de ecologistas críticos se remitió a un artículo de la revista *Nature* que, publicado en 1964, notificaba la movilidad del radiocesio en los suelos ácidos y su presencia a distintos niveles de profundidad. Aunque ese trabajo se había limitado a evaluar el riesgo de exposición externa a la radiación gamma para personas de pie sobre el terreno, esas evidencias cobraron un nuevo significado en el debate sobre la presencia de ese radioisótopo en la cadena alimentaria del ganado ovino.

Los científicos dieron por infundadas tales conjeturas, basándose en la proporción del cesio-137 con respecto al cesio-134, cuyas vidas medias son 30 años y un año, respectivamente. Bastaba tener en cuenta la desintegración gamma de ambos elementos por sus diferentes huellas radiactivas para detectar que esa proporción era aproximadamente 2:1 en los recientes depósitos a causa de Chernobyl, mientras que hubiera sido 12:1 si se tratara de las emisiones del viejo accidente y del combustible almacenado durante muchos años en espera de su reprocesamiento. Sin embargo, esta explicación no convenció a los pastores, quienes estaban prejuiciados por la experiencia histórica de secretismo y desinformación de las instituciones nucleares. Esa desconfianza se había intensificado en la medida de que los expertos manejaban supuestos irreales y ponían de manifiesto su incomprensión de las condiciones ambientales y del comportamiento típico de las ovejas en las áreas montañosas de Cumbria.

Los granjeros estaban muy irritados porque habían sido totalmente ignorados sus conocimientos empíricos acerca de las peculiaridades del terreno, la influencia del régimen de lluvias, los espacios más relevantes hacia donde dirigir los controles de radiación y el tratamiento que debía darse al ganado ovino, teniendo en cuenta sus características especiales. Por ejemplo: a los expertos se les ocurrió la idea de esparcir bentonita (arcilla de grano muy

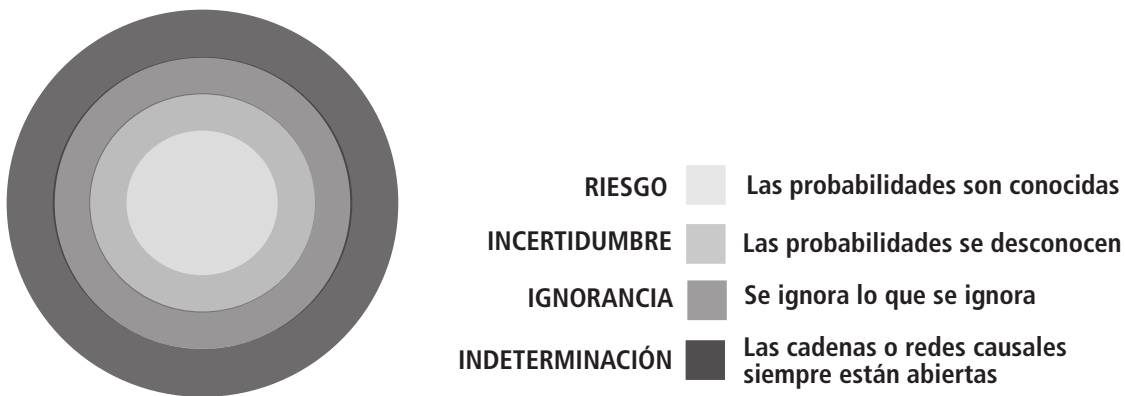


Figura 15: Taxonomía de la incertidumbre según Brian Wynne. Fuente: elaboración propia

fino) sobre los pastos contaminados. Para ello diseñaron un experimento en el cual las ovejas eran encerradas en unos corrales, sobre cuyo suelo había sido previamente esparcido ese tipo de elemento alcalino. El objetivo era medir el grado de absorción del radiocesio por los animales que pastaban en esos encierros, y así estimar la eventual eficacia de la bentonita como inmovilizador de dicho isótopo. Pero desde el comienzo, los pastores señalaron que ese proceder sería inútil, ya que el ganado de montaña no estaba acostumbrado a vivir en cautiverio y, al verse afectado su metabolismo, se obtendrían resultados inconsistentes y contradictorios. Luego de unos pocos meses, dicho experimento fue abandonado, aunque las críticas de los pastores nunca fueron reconocidas. Este y otros percances contribuyeron a exacerbar la desconfianza de los granjeros hacia la credibilidad de los asesores científicos y a generar sospechas sobre su manipulación de los datos. En tanto, las restricciones al movimiento de ovejas se dilataron en el tiempo y provocaron serias pérdidas económicas.

Bajo el prisma del modelo de déficit cognitivo, este episodio se manejaría como una típica controversia entre los expertos profesionales —cuya intervención se limitó a la aplicación de ciertos procedimientos e instrumentos considerados válidos— y un público profano (los pastores) sin competencias científicas para comprender esos métodos y sus resultados, por lo que estarían siempre proclives a desarrollar actitudes irracionales de temor y desconfianza. El enfoque socioconstructivista de Wynne subvierte esta explicación, al defender que el conocimiento lego puede tener en cuenta factores decisivos y sutilezas locales que le permiten imponerse sobre la experticia institucionalizada. Esta última no solo resultó insuficiente, sino que fue ignorante e irreflexiva al ser incapaz de admitir evidencias generadas y justificadas en un marco epistémico diferente del propio. Para Wynne, esta conducta es un ejemplo contundente de que, lejos de su pretendida objetividad o naturalismo, los expertos se aferran a modelos preconcebidos que chocan con la vida del público profano: «A través de sus discursos racionalistas, las instituciones expertas modernas y sus respuestas culturales “naturales” a los riesgos en el idioma de la gestión científica del riesgo, tácita y furtivamente imponen modelos prescriptivos de lo humano y lo social sobre el público lego, pero estos son implícitamente deficientes en términos humanos» (Wynne, 2004: 125).

Pero más que la diferencia entre ambos tipos de conocimientos (lego y experto), o si uno supera al otro, lo que interesa a Wynne es denunciar que el propio modelo de déficit cognitivo contribuye a mantener y expandir la brecha epistémica entre la experticia profesional y el amplio público con respecto a la aceptabilidad del riesgo. Y es que dicho modelo no tiene en cuenta las condiciones y limitaciones del propio conocimiento tecnocientífico con respecto a la esfera social, cultural y moral. A partir de esta preocupación, el sociólogo británico reformula sus concepciones teóricas sobre la taxonomía de la incertidumbre, incorporando dos nuevos estados: «ignorancia» (*ignorance*) e «indeterminación» (*indeterminacy*). Esta última —o sea, la indeterminación— «subyace a la construcción del conocimiento científico, así como al mundo social sobre el que provocamos efectos ambientales» (Wynne, 1992b: 112). Entonces distingue cuatro tipos de incertezas que puede enfrentar cualquier decisión política basada en el saber científico (ver figura 15):

*Riesgo:* El comportamiento y los parámetros del sistema se conocen bien, por lo que las posibilidades de que existan diferentes resultados pueden definirse y cuantificarse mediante distribución de probabilidades.

*Incertidumbre:* Aunque se conocen los principales parámetros del sistema, se desconoce la distribución de probabilidades. Por tanto, el comportamiento del sistema no podrá predecirse ni mensurarse, si bien la incertidumbre puede ser identificada en algunos casos y conjeturarse su influencia sobre los resultados. Aunque la incertidumbre podría ser reducida a conveniencia, esto llevará aparejado un aumento de la ignorancia.

*Ignorancia:* Se desconoce lo que se desconoce. La ignorancia se incrementa a medida que aumentan los compromisos sociales adquiridos sobre la base de un conocimiento dado.

*Indeterminación:* Las cadenas o redes causales siempre están abiertas.

Esta taxonomía de la incertidumbre solamente puede entenderse abrazando el fuerte constructivismo social de Wynne. Partiendo de la noción de «encuadre» (*framework*) como la categoría sociológica clave de su pensamiento, pudiera establecerse que su concepción de la *incertidumbre* se equipara a la «incertidumbre técnica o epistémica» que él manejara antes, mientras que la *ignorancia* y la *indeterminación* obedecerían ambas a una resignificación de su noción de «incertidumbre estructural o institucional» para enfatizarla como «incertidumbre social». Sobre esa base, nosotros interpretamos que las dos primeras categorías (*riesgo* e *incertidumbre*) son «más técnicas», y la *indeterminación* es «más social», mientras que la *ignorancia* enlaza esas dos facetas (técnica y social), al tratarse de la incapacidad humana para preguntarse sobre lo desconocido. Así, cuanto más definitoria sea la conclusión basada en el conocimiento disponible en situaciones de incertidumbre, más invisibles devienen «las incógnitas desconocidas» («*unknown unknowns*»). La concentración en «lo que se sabe» (*what it known*) da lugar a que se descuide la dimensión de «lo que no sabemos ahora» («*what we don't know*»). A fin de cuentas, de acuerdo siempre con Wynne, la incertidumbre y la ignorancia son consustanciales al conocimiento científico:

El conocimiento científico procede *exogenizando* algunas incertidumbres significativas, que entonces se hacen invisibles [... y] proporciona preeminencia a una *agenda restringida de incertidumbres definidas* —aquellas que son tratables—, haciendo invisibles otras incertidumbres, especialmente las que se refieren a las condiciones límites de aplicabilidad del encuadre existente de conocimiento a nuevas situaciones. Así, pues, la ignorancia es endémica en el conocimiento científico, al tener este que reducir el encuadre de lo conocido a lo que es manejable por sus propios modelos y métodos parroquiales (Wynne, 1992b: 115).

El problema surge cuando, en aras de cumplir con los compromisos sociales contraídos, se olvidan esas limitaciones del encuadre (*framework*), llegándose a «la exageración institucionalizada del ámbito y poder del conocimiento científico» (Wynne, 1992b: 115). Para explicar esto, Wynne ejemplifica con el error cometido por los científicos al pronosticar que el radiocesio desaparecería a los pocos días de la cadena alimentaria de las ovejas, pues sería inmovilizado químicamente por el propio suelo de Cumbria. En principio, esta pifia ocurrió como una consecuencia de la práctica habitual de la ciencia: hipótesis, contrastación, nuevas hipótesis..., y hubiera pasado inadvertida si no es por la trascendencia política que tuvo el caso. El descrédito de los expertos se puso de manifiesto al airearse públicamente la ignorancia que subyacía a su modelo científico sobre el comportamiento del radiocesio.

Como es habitual cuando se comete un error de predicción, la experticia tendió a centrarse en la mejora del modelo científico para reducir la incertidumbre. Y aunque esto es importante, tenía que haber examinado también el compromiso social que dio pie a la falla predictiva. La *indeterminación* estriba en la disyuntiva de si los expertos se decidirían a cambiar su modelo preconcebido para readecuarlo a la realidad de la situación, o si la cuestión del pastoreo de las ovejas sería reformulada para «validar» nuevamente el conocimiento científico ya existente. Tratándose de la contaminación de la carne de ovino por el cesio-134 y cesio-137, había que replantearse si las tierras altas donde pastaban las ovejas eran iguales o diferentes al suelo previsto por el modelo científico. Entonces resultó que era un suelo ácido de turba, y no un suelo arcilloso alcalino. A partir de los mismos datos científicos disponibles, esa diferenciación hubiera sido irrelevante si el compromiso social hubiera sido otro; por ejemplo: valorar el riesgo de exposición externa de las personas a los rayos gamma emitidos por esos radioisótopos. Pero esa distinción resultó decisiva para el caso del pastoreo.

La principal enseñanza del episodio de Cumbria es que siempre habrá algún componente ineludible de *indeterminación* para decidir si una situación de riesgo e incertidumbre puede enmarcarse bajo una teoría o modelo científicos, ya que esto depende del compromiso social adquirido. O a la inversa: dados determinados hechos, elementos de juicio o evidencias empíricas, es siempre posible modelar distintas clases de riesgo e incertidumbre, incluidas las provocadas por el propio comportamiento social contingente. De ahí que las cadenas o redes causales siempre están abiertas. La evaluación de los riesgos ambientales (radiológico, en este caso) debe tenerlo en cuenta, de lo contrario la lógica del encuadre quedaría incompleta:

El conocimiento científico no está completamente determinado por los hechos (...) Es necesario que operen mecanismos sociales de clausura en torno a determinadas construcciones lógicas para completar la propia construcción lógica, que de otro modo quedaría incompleta. Este es el sentido adicional, más sutil y permanente, de la existencia de indeterminaciones en los cimientos del conocimiento natural acerca de los riesgos ambientales (Wynne, 1992b: 126).

Aun cuando la experticia técnica entienda que su modelo científico encuadra bien el comportamiento de un sistema natural o tecnológico, correspondiendo a la realidad, pueden existir compromisos sociales que entrañan una gran indeterminación y deben ser contemplados desde un inicio para la evaluación del riesgo de cara a la toma de decisiones. Esta acotación de Wynne es crucial porque evita que su taxonomía de la incertidumbre sea entendida como una cuestión de niveles o grados de complejidad que se excluyen entre sí, cuando la idea es que se imbrican o se superponen, teniendo a la indeterminación en el trasfondo: «Existe una indeterminación del conocimiento científico subyacente, incluso cuando la incertidumbre sea pequeña» (Wynne, 1992b: 116). Por eso deben tratarse la «ignorancia y la indeterminación como posibles fuentes de riesgo en sí mismas e introducirlas en un debate más amplio acerca de las implicaciones del compromiso social» (Wynne, 1992b: 123)<sup>43</sup>.

Las reflexiones sociológicas de Wynne se extienden a que la percepción de la ciencia por el público profano y sus respuestas a los riesgos no se basan en su capacidad para asimilar la información científica, sino en sus juicios sobre la confianza y credibilidad en la experticia institucionalizada. Y lo que es muy importante: esos juicios públicos tienen un carácter contingente al depender de redes, relaciones e identidades sociales en constante transformación (Wynne, 1992a). Así, contrariamente a la representación romántica de los pastores de ovejas, el sociólogo reveló que estos se encontraban inmersos en un complejo y contradictorio entramado social, dado que tenían familiares trabajando en la planta de reprocesamiento nuclear. Este factor social hacía que los granjeros escondieran su creencia generalizada sobre la responsabilidad —al menos, parcial— de dicha planta en la contaminación con radiocésio. O sea: aunque no lo dieran a entender, en el fondo los pastores se oponían a la versión oficial (científica y política) que atribuía ese impacto ambiental solamente a la precipitación radiactiva de Chernobyl (Wynne, 2007).

Aunque la confianza del público lego en la credibilidad de los expertos resulta el factor primordial para la aceptabilidad del riesgo, Wynne subraya que los profanos pueden esconder sus desacuerdos, prefiriendo mantenerse ignorantes con respecto a las interpretaciones de la

---

<sup>43</sup>La taxonomía de la incertidumbre propuesta por Wynne difiere radicalmente de la tendencia epistemológica conocida como «ciencia postnormal» (Postnormal Science), el concepto desarrollado por Silvio Funtowicz y Jerome R. Ravetz, ambos filósofos con formación matemática, quienes desde mediados de los años 80 del siglo pasado comenzaron a cuestionarse la manera en que los expertos hacían las evaluaciones de riesgo (Funtowicz y Ravetz, 1990, 1992, 2000). Ellos establecen tres escenarios según sean los niveles de incertidumbre y los valores implicados en la toma de decisión: ciencia aplicada, consultoría profesional y ciencia postnormal. A la definición de las tipologías de incertidumbre con fines heurísticos se dedica el método PRIMA (Pluralistic Framework of Integrated Uncertainty Management and Risk Analysis). A partir de dos grandes fuentes son identificadas la incertidumbre debido a la *variabilidad* (atributo ontológico o «incertidumbre objetiva»), y la incertidumbre debida a un *conocimiento limitado* (incertidumbre epistémica o «incertidumbre subjetiva») (Asselt, 2000; Sluijs *et al.*, 2004).

experticia técnica. Ahora bien, si las personas sienten que su identidad cultural se encuentra amenazada, suelen ser reflexivas y racionales como fueron los pastores británicos. Ellos siempre estuvieron convencidos de que sus conocimientos sobre la agricultura de montaña, aunque no fueran cualificados, serían relevantes para reducir el impacto ambiental de la contaminación radiactiva. Para Wynne existe una epistemología lega del riesgo basada en la legitimidad de la experiencia empírica, la interacción social y el dominio del conocimiento local. En cambio, los expertos técnicos suelen atenerse a su propio *framework*, rechazando de antemano cualquier otra forma de conocimiento ajena a su marco normativo. El episodio de las ovejas de Cumbria ejemplifica que la controversia entre expertos y legos se debe a la colisión entre diferentes epistemologías hermenéutico-culturales:

Los granjeros asumieron que la capacidad de predicción, propia del sistema experto, era un presupuesto intrínsecamente no confiable, y por lo tanto aquellos valoraban la adaptabilidad y la flexibilidad como una parte central de su identidad cultural y de su conocimiento práctico. Los científicos expertos ignoraban o malentendían la complejidad multidimensional del dominio del problema, propio de ese público lego, y por lo tanto adoptaban presupuestos distintos sobre el control del problema. En otras palabras, las dos culturas de conocimiento expresaban diferentes concepciones sobre la agencia y el control, y había en ello tanto una dimensión empírica como una dimensión normativa (Wynne, 2004: 175).

#### 4.4.2/ Conocimiento lego y participación pública

El llamado de Wynne a la inclusión del «conocimiento lego» (*lay knowledge*) o «experticia lega» (*lay expertise*) en la evaluación del riesgo ha sido muy influyente en los ECTS y los círculos académicos a favor de la democracia deliberativa (Grundmann, 2017). Sus investigaciones sobre los pastores de Cumbria fue tomada como un referente por la socióloga Sheila Jasanoff en su libro *Design of Nature* (2005) para insistir sobre la necesidad de modelos de participación pública que permitan la negociación de hechos y juicios de valor, teniendo en cuenta los puntos de vista de los diferentes implicados, sin ninguna exclusión; o lo que es decir: una extensión democrática de la toma de decisiones. Dado que el «enquadre» (*framework*) no es solamente una tarea técnica, sino social, debe ser democráticamente justificable. Esto podría intentarse sobre la base de una verdad relevante que Jasanoff define como «epistemologías cívicas» (*civics epistemologies*), en el sentido de que son «formas de conocimiento público culturalmente específicas, históricas y políticamente fundadas» (Jasanoff, 2005: 249). De atenerse a ese marco, se borran los límites entre legos y expertos como depositarios de la ignorancia, unos, y del conocimiento, los otros.

A Jasanoff se debe también el concepto de «ciencia reguladora» (*regulatory science*) para referirse críticamente a la ciencia que es empleada en la elaboración de políticas y regulaciones públicas (Jasanoff, 1995: 280). A diferencia de la ciencia académica, cuyo ideal es la neutralidad valorativa, se trata del conocimiento científico que practican las instituciones y agencias creadas con el propósito explícito de resolver controversias relacionadas con la ciencia y la tecnología en temas sanitarios, medioambientales, etc. Puede ser un comité de

expertos internacionales que haya sido organizado como si fuera una comunidad científica independiente, considerándola una fuente fiable de información. En principio, la participación de esa experticia debiera incrementar tanto la calidad como la objetividad de las resoluciones políticas en situaciones de incertidumbre. Con ese propósito, la idea subyacente a la ciencia reguladora es que la evaluación del riesgo debe mantenerse separada de la gestión del riesgo.

Sin embargo, Jasanoff considera que ese proceder para dilucidar las controversias públicas comete un error de fondo, ya que la apelación a la ciencia durante los procedimientos valorativos termina influyendo sobre la ciencia misma; es decir, las dos esferas (evaluación y gestión) interactúan y se modifican una a la otra durante el proceso de regulación. Esto se manifiesta cuando los resultados son conveniados entre científicos y políticos con tal de priorizar acciones regulativas que, a la postre, favorecen a unos grupos sociales o instituciones, mientras que perjudican a otros. Con ese fin, los políticos ejercen una presión considerable sobre los expertos para que minimicen aquellas partes de sus informes sujetas a mayor «indeterminación», cumpliéndose lo señalado por Wynne en su estudio sobre los pastores de ovejas en Cumbria.

No obstante, A Wynne se le ha criticado duramente por haber construido una «narrativa romántica» del saber lego (Kerr, 2004; Kusch, 2007), reprochándole que su tratamiento asimétrico de los laicos y expertos convierte a los primeros en «demócratas reflexivos» y a los segundos en «dictadores irreflexivos» (Durant, 2008). También ha sido cuestionado por representantes de una más reciente tendencia de los ECTS —autodenominada «tercera ola»<sup>44</sup>— que pretende reivindicar el papel del experto y la experiencia en la arena política para la resolución de las controversias públicas (Collins y Evans, 2002, 2007). Mediante una redefinición del propio concepto de «experticia», esta pareja de autores plantea que debe tratar de resolverse el «problema de la extensión» con respecto al «problema de la legitimidad».

Por «legitimidad» se entiende la necesidad de abrir los procesos de decisión sobre cuestiones científico-tecnológicas a la participación del público lego y, por tanto, hacerlos más democráticos y transparentes. A esta aspiración se habría dedicado con creces la «segunda ola» de los ECTS, específicamente Wynne y Jasanoff. Pero mientras no se haya definido claramente a qué se llama participación pública —quiénes participan, cuándo y cómo—, Collins y Evans consideran que urge plantearse el problema de la «extensión»: «¿Debe maximizarse la legitimidad política de las decisiones técnicas al dominio público sometiénolas a procesos democráticos los más amplios posibles, o deben basarse tales decisiones en el mejor consejo experto disponible?» (Collins y Evans, 2002: 235).

Esta interrogante se agudiza cuando existe la voluntad de involucrar a los llamados *stakeholders* en las decisiones que los afectan, pero al mismo tiempo se impone la necesidad de tomar decisiones de trascendencia política basadas en conocimientos tecnocientíficos, antes de que los expertos mismos hayan alcanzado un consenso sólido. Si la participación

---

<sup>44</sup> En su libro *Why democracies need science* (2017), Collins y Evans dividen los ECTS en tres etapas: primera ola o edad de la autoridad (1900-1960); segunda ola o edad de la democracia (1960-2000), y tercera ola o edad del experto (2000 en adelante). Estos autores pertenecen a la segunda etapa, pero ellos mismos se reivindican como los fundadores de la tercera ola a partir de su artículo «The Third Wave of Science Studies: Studies of Expertise and Experience» (Collins y Evans, 2002).

se extiende al máximo, involucrando a gente con escasa formación o con información poco confiable, podría obstaculizarse la toma de decisión. Si esta última se deja solo al criterio de los expertos de la ciencia reguladora, la oposición social crecerá y provocará seguramente un conflicto. Para tratar de resolver este dilema, en su libro *Rethinking Expertise* (2007), Collins y Evans elaboran una teoría normativa que distingue entre diferentes niveles y tipos de pericia a modo de «tabla periódica de la experticia».

Ellos definen dos modos de conocimiento tácito especializado: la competencia interactiva de quienes pueden opinar y discutir competentemente sobre diversas cuestiones de un área específica (*interactional expertise*), y la competencia de quienes, a pesar de su limitada competencia interaccional, pueden realizar contribuciones sustantivas al campo de investigación (*contributory expertise*). Este último sería el caso de los pastores de Cumbria, «quienes poseían una relevante experticia contributiva, pero carecían de una suficiente experticia interaccional para lograr el reconocimiento» (Collins y Evans, 2007: 72).

Considerando que la noción de *lay expertise* propuesta por Wynne resulta desafortunada y confusa (un profano no puede ser experto a la misma vez), Collins y Evans plantean sustituirla por *experience-based experts*, en el sentido de que los pastores adquirieron saberes expertos en la práctica cotidiana, aunque no fuesen reconocidos por una institución profesional o académica. La ausencia de diálogo sobre el destino de las ovejas se debió entonces a que no existió una experticia interactiva que facilitara la comunicación entre ambos tipos de expertos: certificados y no certificados. Los expertos no certificados —o sea, los granjeros— no recurrieron a mediadores que pudieran haber traducido sus conocimientos locales al lenguaje técnico de los expertos certificados. Que estos últimos no hubieran recurrido tampoco a la experticia interactiva para tratar de dialogar con los pastores parece intrascendente para Collins y Evans. De ahí que su abordaje de la extensión frente a la legitimidad termine privilegiando a los expertos certificados como poseedores del conocimiento relevante.

A esta contradicción se refiere Wynne cuando fustiga a sus críticos por no haber entendido que el punto clave de su estudio sobre los criadores de ovejas de Cumbria es precisamente que el *framework* para determinar qué constituye un conocimiento relevante se hace de antemano por las instituciones y sus expertos certificados, quienes de esta manera privilegian sus visiones científicas del mundo por encima de las preocupaciones públicas (Wynne, 2003). Por tanto, el marco normativo propuesto por Collins y Evans para identificar a los expertos no certificados quedaría supeditado inevitablemente a esa previa demarcación del problema por el sistema institucional de la experticia certificada. Dicho en otras palabras: los expertos reconocidos oficialmente seguirían subestimando a los considerados legos o laicos.

Ejemplificando ahora nosotros, esto explica que no existiera ninguna contrapartida a la rotunda aseveración de los científicos sobre la rápida absorción del radiocesio por el suelo arcilloso. Aunque errónea, esta hipótesis certificada difícilmente podría haber sido rebatida por alguna forma de saber empírico. Mas si el problema se hubiera «encontrado» como la necesidad de alimentar a las ovejas —que era la verdadera preocupación de los pastores—, entonces sí hubiera tenido inmediata validez su experticia contributiva. También otra



hubiera sido la situación si el encuadre estuviera del lado de los consumidores; o sea, de los afectados: ¿Cuán segura es la seguridad adoptada para que la carne de oveja procedente de Cumbria no esté contaminada con radiocesio? Y así sucesivamente, cada encuadre dependería de cuáles son los compromisos sociales contraídos, abriéndose cada vez más las redes causales. Este es, a nuestro entender, el sentido de la *indeterminación* como categoría social más profunda que abarca el riesgo, la incertidumbre y la ignorancia<sup>45</sup>.

A los embates de la autoproclamada «tercera ola» en contra de sus ideas sobre el conocimiento lego y la participación pública, Wynne repone que el objetivo principal de sus estudios sobre la relación entre ciencia, política y sociedad ha sido el reconocimiento de las capacidades hermenéuticas colectivas e independientes de los ciudadanos, así como de sus preocupaciones legítimas desde un punto de vista cívico. En su opinión, Collins y Evans son portavoces de una nueva versión del modelo de déficit cognitivo que contribuye a la imposición dictatorial de un encuadre falsamente «apolítico» de la ciencia y del riesgo:

Es una contradicción hablar en términos de democracia con respecto a la ciencia, y, al mismo tiempo, subsumir a la ciudadanía en la aceptación colectiva de los significados públicos impuestos externamente, en forma dictatorial, en nombre de la ciencia y del “riesgo”. Si así fuera, la condición implícita para el reconocimiento de los ciudadanos por parte de las instituciones políticas instruidas por la ciencia sería que ellos abrazaran la estructuración reduccionista de los problemas y significados, tal y como son impuestos por esas instituciones políticas y sus expertos. Esto significaría, por ejemplo, aceptar lo que Collins y Evans (2002) afirman en el sentido de que una cuestión pública como la energía nuclear es “apenas” una cuestión de si es segura (y, por lo tanto, aceptar la absurda proposición de que el parlamento ya ha decidido democráticamente todas las demás cuestiones no técnicas, así como la definición misma de las cuestiones técnicas). Lo mismo se aplica a las plantaciones modificadas genéticamente que han sido insistentemente definidas por las instituciones políticas especializadas como apenas una cuestión científica de riesgo (Wynne, 2003: 175).

Con su implacable crítica al modelo de déficit cognitivo, Wynne logra descalificar la separación entre el *risk assessment*, visto como dominio exclusivo de las valoraciones tecnocientíficas supuestamente realistas, apolíticas y neutrales, y el *risk management*, entendido como la toma de decisiones que son influenciadas por juicios de valor y mediaciones subjetivas. Al fundamentar que ambos ámbitos (evaluación y gestión) nunca pueden separarse porque se retroalimentan debido a los compromisos sociales, su enfoque crítico obliga a replantearse la pregunta *How safe is safe enough?* en términos inclusivos para la negociación del riesgo aceptable entre expertos y no expertos, decisores y afectados. Es así que las aportaciones teóricas de Wynne son insoslayables, aun cuando se haya considerado que peca de reduccionismo al no distinguir entre el riesgo y la percepción del riesgo, significando para él lo mismo bajo el prisma de su fuerte constructivismo social (Rosa, 1998).

<sup>45</sup>Una loable aplicación del enfoque epistemológico socioconstructivista de Wynne y su taxonomía de la incertidumbre es, sin dudas, el trabajo de investigación *Políticas del bosque. Expertos, políticos y ciudadanos en la polémica del eucalipto en Asturias* (López Cerezo y González García, 2002).

#### 4.5/ *La politización del riesgo aceptable: antes y después de Three Mile Island*

Las investigaciones sociológicas para comprender la percepción pública del riesgo tecnológico comenzaron a principios de la década de 1970 en Estados Unidos, cuando ya la seguridad nuclear se había constituido en una disciplina autónoma, a fin de que fuera identificada la mayor cantidad de averías posibles y no se repitieran los accidentes conocidos por los expertos. Su magnitud y gravedad habían permanecido ocultas de la opinión pública, pero cada vez se hacía más difícil mantener el secretismo sobre la real posibilidad de esos percances por ínfima que pareciera. Al proponer la noción de *acceptable risk*, extrapolándola desde la práctica ingenieril hasta nivel societal, Chauncey Starr protagoniza el debut de los ingenieros nucleares como «sociólogos empíricos» que responden al paradigma del actor racional, según el cual todas las acciones humanas pueden ser descritas como un problema de maximización de la utilidad o de optimización. Sobre esa base, el *riesgo aceptable* fue conceptualizado a partir de un presupuesto de matriz economicista: la sociedad acepta voluntariamente los riesgos a cambio de beneficios económicos, teniendo que establecerse un precio razonable para ese intercambio. Así, mediante su método de preferencias reveladas, Starr se propuso demostrar que la energética nuclear constituía un riesgo aceptable, atendiendo a que ya había alcanzado un nivel de seguridad satisfactorio y prometía mayores beneficios que la energética convencional.

A partir de ese logro académico, el *Risk Analysis* se convierte en una herramienta del sistema tecnocientífico nuclear para su interacción con el sistema político, de modo que facilite la argumentación de los expertos técnicos en los debates públicos y estos puedan enfrentar el embate de los movimientos sociales preocupados por temas como la lluvia ácida, las armas nucleares, los depósitos de desechos radiactivos y el auge de las centrales atómicas. Al subrayar la importancia del nivel de seguridad alcanzado, la propuesta sociológica de Starr tiene como principal objetivo que la política regulatoria gubernamental no asfixie a las empresas privadas involucradas en la energética nuclear. La aceptabilidad del riesgo se maneja como un problema de racionalidad y, dado que el público profano tiende a ser irracional y emotivo, este debe ser convencido de que sus inquietudes son exageradas y, en última instancia, erróneas. Es así que la politización del *riesgo aceptable* resulta inherente al surgimiento del *Risk Analysis* y la teorización sociológica que se desarrolla en el interregno entre Ciencia, Tecnología y Sociedad, teniendo a los ingenieros nucleares de un lado y a los científicos sociales del otro. Esta bipolaridad se acrecienta a partir de Three Mile Island, cuando se pone de manifiesto que bastaría un evento cuestionador de la seguridad preconizada por Starr para producir un gran impacto social que haría disminuir abruptamente la aceptabilidad pública del riesgo nuclear y radiológico.

Si hasta ese momento la psicología cognitiva había priorizado la investigación psicométrica sobre las percepciones individuales de los riesgos tecnológicos en comparación con los riesgos naturales, a partir de la enorme repercusión social de Three Mile Island se agudizan las dificultades conceptuales para diferenciar entre riesgo objetivo (real) y riesgo subjetivo (percibido). Mientras los ingenieros nucleares se aferran a que el riesgo es objetivo

y puede cuantificarse mediante cálculos probabilísticos, aun cuando haya cierto margen de incertidumbre, los científicos sociales se enfrentan a la dificultad no ya de medir, sino de entender la percepción subjetiva del riesgo y su amplificación social. Este conflicto insalvable se transformará en el conflicto metateórico «realismo *versus* constructivismo social» que, aunque pareciera solamente una cuestión filosófica, tendrá en lo adelante una influencia decisiva en la conciliación sociopolítica del *riesgo aceptable*.

Fueron la antropóloga Mary Douglas y el politólogo Aaron Wildavsky quienes primero «politizaron» el asunto de la aceptabilidad del riesgo en las ciencias sociales, al catalogarlo como un constructo social, rechazando toda disquisición tecnocientífica. De ahí que la antropología cultural sea considerada en las antípodas de la propuesta técnico-formal de Chauncey Starr, siendo identificadas estas dos corrientes como los polos extremos de la antinomia «positivismo *versus* relativismo» (Shrader-Frechette, 1991) y de la antinomia «probabilista *versus* contextualista» (Thompson y Dean, 1996). Nosotros consideramos que la antinomia «realismo *versus* constructivismo social» es ontológica y, por tanto, incluye a estas otras dos antinomias, que son epistemológicas (Rosa, 1998).

Una vez ocurrido el accidente de Three Mile Island, los ingenieros nucleares tuvieron que intentar otras respuestas a la interrogante *How safe is safe enough?* A las preferencias reveladas superpusieron el criterio de que el umbral probabilista sería una condición suficiente para juzgar la aceptabilidad social del riesgo tecnológico. Para esto se apoyaban en que el informe Rasmussen (WASH-1400) había demostrado un alto valor predictivo al contemplar la posibilidad de un accidente semejante al ocurrido con fusión del núcleo en TMI-2. Sin embargo, en tanto fueron superadas por primera vez las bases de diseño de los reactores LWR, el problema de la *incertidumbre* se convierte en el factor crucial para que el ingeniero Alvin Weinberg expusiera la necesidad de una moratoria nuclear.

Que un de los propios creadores de esa tecnología haya catalogado la aceptabilidad del riesgo nuclear y radiológico como *Regulator's Dilemma*, considerándolo un problema transcienceífico asociado a la incertidumbre intrínseca de la ingeniería de reactores, es una prueba histórica a favor de nuestra perspectiva intratécnica, necesariamente realista, para entender el trasfondo dilemático que entraña el empleo de la fisión atómica como fuente de energía. A la vez, sostenemos la necesidad de un enfoque socioconstructivista para abordar los otros niveles y tipos de incertidumbre (moral, social, política...) en relación con los efectos de las bajas dosis de radiaciones ionizantes artificialmente inducidas sobre la salud humana, también señalados por Weinberg como un problema transcienceífico.

Uno de los principales exponentes del constructivismo social es Brian Wynne, altamente reconocido por los estudios CTS gracias a su investigación etnográfica sobre el pastoreo de ovejas en las tierras contaminadas de su natal Cumbria con el radiocesio procedente de Chernobyl. Allí mismo, casi diez años antes, había sido partícipe como activista político de las controversias públicas entre la experticia técnica y la población local sobre la gestión de residuos radiactivos en las plantas reprocesadoras de combustible nuclear. Al ser un ciclo abierto o sistema extensivo que involucra a múltiples actores en tiempo y espacio,

incluyendo la transportación de esos desechos a grandes distancias, el proceso tecnológico del *nuclear waste* comporta una experiencia social muy diferente a la que se produce en el marco cerrado o sistema intensivo de una central electronuclear. Por eso este sociólogo británico desarrolló una visión muy temprana sobre cómo los expertos técnicos imponen su encuadre (*framework*) de los problemas ambientales, descartando o encubriendo aquellas cuestiones que no encajan dentro de los modelos científicos dominantes. Al introducir las nociones de *ignorancia e indeterminación*, relacionándolas con los compromisos sociales, Wynne propuso su propia taxonomía de la incertidumbre que difiere de la noción de incertidumbre epistémica, solamente técnica, manejada por los ingenieros nucleares como Weinberg.

Lo cierto es que, luego de Three Mile Island, pero sobre todo después de Chernobyl, resulta imposible hablar del riesgo sin tener en cuenta a la incertidumbre, aunque no quedase claro en cuánto se diferencian ambas nociones, si una conlleva a la otra o representan lo mismo. ¿Cómo tratar las incertidumbres que las probabilidades no reflejan adecuadamente?, se convirtió en el principal problema para los ingenieros nucleares, mientras que los científicos sociales tuvieron que preguntarse: si el riesgo es un constructo social, ¿entonces debe entenderse la incertidumbre en sí misma como socialmente construida? De acuerdo con Wynne, podría responderse afirmativamente a esta segunda interrogante, si atendemos a la ignorancia (desconocemos lo que desconocemos) y la indeterminación: siempre habrá compromisos sociales que trascienden al conocimiento científico, por lo que las redes causales estarán abiertas.

Estamos tan limitados en nuestras capacidades cognitivas que nuestra propia naturaleza biológica se torna inescrutable cuando queda expuesta a radioisótopos artificialmente producidos, cuya presencia escapa a los mecanismos fisiológicos de la sensación. La ciencia es ignorante al no poder responder todavía si la información genética del ser humano puede ser afectada por bajas dosis de radiactividad superiores al fondo natural, tal y como sucede con los ratones de laboratorio y la mosca de la fruta. De ahí que el compromiso social contraído con la salud de niños y mujeres embarazadas represente siempre un alto grado de indeterminación durante un escenario de contaminación radiactiva. Por este solo motivo, la tragedia de Chernobyl significó un punto de inflexión en la comprensión del vínculo ontológico entre el riesgo y la incertidumbre. Sea desde una perspectiva realista o socioconstructivista, a partir de entonces de lo que sí no hay dudas es que la ausencia de certeza devino condición *sine qua non* para la negociación de la aceptabilidad del riesgo nuclear y radiológico.

CAPÍTULO 5.

DE CHERNOBYL A FUKUSHIMA DAIICHI:  
LA ENERGÉTICA NUCLEAR EN EL TRÁNSITO  
HACIA LA SOCIEDAD DEL RIESGO GLOBAL

El dilema regulación/promoción de la energética nuclear se complejiza a su más alto grado con el desastre de Chernobyl en 1986, cuando se hizo realidad la posibilidad de una catástrofe sociorradioecológica de magnitud global y se advierte que esta ha desatado una crisis política sin precedentes, contribuyendo a la desintegración de la Unión Soviética: «De hecho, la catástrofe de Chernobyl fue un punto de inflexión histórica que marcó una era anterior y una posterior al desastre» (Gorbachev, 2006). Como nunca antes, la estrecha relación entre Ciencia, Tecnología y Sociedad se hizo más consciente, poniendo en tensión epistemológica no solo a la ingeniería y a las ciencias físicas y biológicas, sino a las ciencias sociales y humanidades en general. Los metaestudios del riesgo se convirtieron en un tema preferencial, estimulando múltiples y complicadas conexiones entre las distintas disciplinas: filosofía, sociología, psicología, politología, antropología cultural... hasta devenir campo de investigación con carácter independiente, aunque no exento de polémicas, contradicciones y vacíos epistémicos (López Cerezo y Luján, 2000; Bechmann, 2009).

Aunque se tratara de enmarcar ese desastre dentro del concepto de *normal accident* introducido por Charles Perrow luego de Three Mile Island, sucede con Chernobyl que su dimensión catastrófica desborda el marco de la causalidad tecnológica y organizacional, al quedar millones de personas expuestas a las radiaciones ionizantes artificiales. La ecuación ingenieril **Riesgo (C)= P x C** perdió para siempre su pretendida validez previsor, además de que resultó inservible para evaluar retroactivamente ese accidente superior a la base de diseño. Así, nunca podrá saberse cuál es la probabilidad **P** de que hubiese estallado el RMBK-1000, porque existen dos versiones técnicas contrapuestas igualmente válidas sobre sus causas tecnológicas, además de otras versiones más especulativas (ver subcapítulo 2.4). En cuanto a la magnitud de las consecuencias **C**, no hay manera de establecer un vaticinio a largo plazo, porque ni siquiera los radioepidemiólogos han sido capaces de ponerse de acuerdo sobre cuál sería la diferencia de los efectos nocivos para la salud entre 1 mSv, 5 mSv y 20 mSv de dosis efectivas recibidas anualmente por encima del fondo natural acostumbrado (ver capítulo 3).

A partir de Chernobyl, la cuestión de la aceptabilidad social del riesgo —tecnológico, en particular— fue suplantada por la problemática de la estructuración del riesgo a escala societal, convirtiéndose en objeto de estudio de las ciencias sociales desde una perspectiva mucho más teórica y abarcadora; macrosociológica, podría decirse. Uno de sus mayores exponentes es la obra de Ulrich Beck, quien vaticinó que la sociedad contemporánea se encuentra inmersa en el tránsito desde la primera modernidad (industrial) a la segunda modernidad (reflexiva); o lo que es decir: desde la sociedad de clases a la sociedad del riesgo, a la cual redefinió en 1992 como «Sociedad del Riesgo Global» (*Weltrisikogesellschaft*). Cuando ocurrió el desastre de Chernobyl, este sociólogo alemán daba a la imprenta su primer libro sobre el

tema: *Risikogesellschaft. Aufdem Weg in eine andere Modern* (1986) [*La sociedad del riesgo. Hacia una nueva modernidad* (1998)], por lo que solo pudo referirse a Chernobyl en una nota introductoria con el título «Dadas las circunstancias». Ningún riesgo le resultaría más representativo que la energía nuclear para ejemplificar su teoría sobre ese futuro de la humanidad que no sería de clases sociales, como hubieran esperado los teóricos de corte marxista, sino de peligros autogenerados por el propio progreso científico y tecnológico:

Este destino se asemeja más al destino estamental de la Edad Media que a las situaciones de clase del siglo XIX. Sin embargo, ya no tiene la desigualdad de los estamentos (ni grupos marginales, ni diferencias entre la ciudad y el campo, entre las naciones o etnias, etc.). Al contrario que los estamentos o las clases, este destino tampoco se encuentra bajo el signo de la miseria, sino bajo el signo del miedo, y no es precisamente una “reliquia tradicional”, sino un producto de la modernidad, y además en su estado máximo de desarrollo. Las centrales nucleares (que son la cumbre de las fuerzas productivas y creativas humanas) se han convertido a partir de Chernobyl en signos de una *Edad Media moderna del peligro*, en signos de amenazas que, al mismo tiempo que impulsan al máximo el individualismo de la modernidad, lo convierten en su contrario (Beck, [1986]1998: 12)<sup>46</sup>.

En un segundo texto, publicado en 1987 por *Berkeley Journal of Sociology*, aunque también escrito en mayo del año anterior, Beck cataloga a Chernobyl como «conmoción antropológica» (*anthropological shock*). Tres factores habían causado ese enorme impacto social, el primero de los cuales fue la «expropiación de los sentidos» (Beck, 1987: 155). A diferencia de los residuos químicos, que generalmente huelen, y el smog que irrita los ojos y los bronquios, la radiactividad no puede ser percibida por los órganos sensoriales ni crea primeros síntomas como un contagio viral. Hay que depender obligatoriamente del dictamen de los expertos y, por tanto, los ciudadanos pierden la soberanía para emitir juicios sobre el riesgo mismo. El segundo factor se refiere a la toma de conciencia sobre la enorme limitación de los recursos humanos disponibles para anticipar desastres: «Los bastiones de racionalidad sobre los cuales las ciencias técnicas solían operar han colapsado» (Beck, 1987: 158). El tercer y último elemento es el derrumbe de las fronteras entre el «yo» y los «otros». Efectivamente, Chernobyl había anticipado lo que podría acontecer durante una hecatombe nuclear, cuando desaparecen todos los límites y no hay posibilidad alguna de evadir el peligro atómico:

(...) que no es selectivo, sino global, y que no conoce ninguna de las distinciones que hasta ahora nuestro mundo ha construido: comunistas y capitalistas, mujeres y hombres, pobres y ricos, las oposiciones entre cultura, naciones y bloques militares. Su universalismo es el resultado de una mezcla peculiar de naturaleza y sociedad —la contaminación— y su régimen procede de una manera adscriptiva, de modo que todos nuestros conceptos de poder —acción, dirección, decisión— colapsan (Beck, 1987: 158).

---

<sup>46</sup>Cuando las citas textuales de Beck han sido tomadas de las ediciones de sus obras traducidas al español o el inglés, se notifica también entre corchetes el año de su edición original en alemán si resulta indispensable. Así, *Risikogesellschaft. Aufdem Weg in eine andere Moderne* apareció en 1986, pero no fue hasta seis años después que se publicó por primera vez en inglés: *Risk Society: Towards a New Modernity* (1992). Apareció en español en 1998, tal y como se identifica en la cita.

Con el título «The Anthropological Shock: Chernobyl and The Contours Of The Risk Society», ese segundo ensayo fue escrito por Beck justamente cuando sonaba la alarma en la República Federal de Alemania tras confirmarse la llegada del radiocesio liberado por aquel desastre a los pocos días de haber ocurrido. La información era altamente contradictoria debido al desacuerdo entre los propios expertos sobre cuáles eran los niveles de radiación por encima del fondo natural. En el sur de Bavaria, a partir del primero de mayo se registraron alarmantes concentraciones de cesio-137 y cesio-134 que superaban en seis veces su valor habitual a nivel del terreno (Peters *et al*, 1990). Las autoridades germanas no estaban preparadas para ese escenario, mientras cundía el pánico entre la población al desconocerse cuáles eran las dosis permisibles de exposición a las radiaciones ionizantes. Coincidentemente, Beck había sido muy crítico en su libro para con los valores límites de tolerancia como criterio de regulación; en especial, para los contaminantes químicos. En su opinión, esos umbrales de aceptabilidad solamente sirven para admitir y legitimar los riesgos que imponen los expertos:

Los valores límite de tolerancia cumplen seguramente la función de una desintoxicación simbólica. Son, por así decirlo, tranquilizantes simbólicos contra las noticias que se van acumulando acerca de las toxinas. Anuncian que hay alguien que se ocupa de ello haciendo un esfuerzo y prestando atención. De hecho tienen el efecto de elevar un poco más allá los límites para los experimentos con humanos. No hay circunvalación alternativa, *solamente cuando la sustancia es puesta en circulación es cuando pueden descubrirse cuáles son sus efectos* (Beck, [1986] 1998: 77).

A diferencia de los tóxicos y patógenos presentes en la vida cotidiana, la amenaza inminente de contaminación radiactiva desató una enorme ansiedad y preocupación en toda Europa. Al reflexionar sobre ese fenómeno sin precedentes, Beck se pregunta qué habría sucedido si las autoridades soviéticas hubiesen logrado desinformar a los demás países; si no se hubiera detectado a tiempo la deposición de elementos radiactivos en los territorios nórdicos; si los expertos no polemizaran públicamente..., o lo que es peor: si a fin de cuentas hubiera sido declarada de manera oficial una contaminación agudamente peligrosa del aire, el agua, los animales y los seres humanos. «¿Habríamos dejado de vivir (de respirar, de comer, de vivir) por orden del gobierno?» (Beck, 1998: 77). Es así que Chernobyl sería el ejemplo por antonomasia del nuevo tipo de riesgos civilizatorios que había descrito en su libro de marras. Su novedad radica en que, al ser resultado de una simultánea construcción científica y social, la propia definición de esos riesgos implica un posicionamiento sociopolítico:

Los riesgos que se generan en el nivel más avanzado del desarrollo de las fuerzas productivas (con ello me refiero sobre todo a la radiactividad, que se sustrae por completo a la percepción humana inmediata, pero también a las sustancias nocivas y tóxicas presentes en el aire, en el agua y en los alimentos, con sus consecuencias a corto y largo plazo para las plantas, los animales y los seres humanos) se diferencian esencialmente de las riquezas. Estos riesgos causan daños sistemáticos y a menudo *irreversibles*, suelen permanecer *invisibles*, se basan en *interpretaciones causales*, por lo que solo se

establecen en el saber (científico o anticientífico) de ellos, y en el saber pueden ser transformados, ampliados o reducidos, dramatizados o minimizados, por lo que están abiertos en una medida especial a los *procesos sociales de definición*. Con ello, los medios y las posiciones de la definición del riesgo se convierten en posiciones sociopolíticas clave» (Beck, [1986] 1998: 28).

Al verse favorecidas las tesis de Beck por la primera explosión de un reactor nucleogenético en la historia, esta coincidencia otorgó carta de legitimidad a su teoría de la sociedad del riesgo (Zinn, 2008). Mientras que el sistema tecnocientífico nuclear a nivel internacional politizó inmediatamente ese desastre, restringiéndolo a un accidente grave debido a la incuria del régimen soviético, el sociólogo alemán no vaciló en otorgarle el rango de catástrofe global, desmarcándose de la retórica típica de la Guerra Fría. Con ayuda de su aparato conceptual y teórico, puede sostenerse que el empleo de la energía nuclear entraña en sí mismo su indefectible politización debido al carácter único de la contaminación radiactiva. Dado que no hay ninguna referencia en su libro a que el capitalismo fuera más exitoso que el socialismo —o viceversa—, de acuerdo con Beck cabría afirmar que Chernobyl inauguró el tránsito hacia la sociedad del riesgo global, entendiéndola como una nueva etapa en el proceso histórico de la modernización. A partir de entonces, se tomó conciencia de que la sociedad industrial basada en el Estado-nación (fuese capitalista o comunista) tenía que responder a las consecuencias imprevistas y no deseadas de sus propios éxitos.

A ese proceso de radicalización de la primera modernidad es lo que Beck cataloga como *modernización reflexiva*. Este es el sustrato medular de su teoría y, como contrapartida a las corrientes «posmodernistas» (Zygmunt Bauman, Jean-François Lyotard, Jean Baudrillard...), fue compartido también por los científicos sociales Anthony Giddens y Scott Lash, aunque estos últimos difieran en muchas cuestiones con respecto al sociólogo alemán. Por modernización reflexiva, Beck se refiere a que la modernidad se encuentra obligada a enfrentarse a sí misma debido a «la posibilidad de una (auto) destrucción creativa de toda época: la de la sociedad industrial. El sujeto de esta destrucción creativa no es la revolución, ni la crisis, sino la victoria de la modernización occidental» (Beck *et al.*: 1997: 14). En pocas palabras: significa que los bienes y los males (*goods and bads*) se producen de manera simultánea, inevitablemente unidos unos y otros. La ciencia y la tecnología benefician al hombre, pero terminan perjudicándolo; o sea, paradójicamente, son causa y antídoto de los riesgos civilizatorios. Inmersa en ese círculo angustioso, la sociedad moderna tardía está condenada a la deliberación constante, a ponderar beneficios y daños por doquier, cuidándose hasta de la racionalidad tecnocientífica: «Las ciencias, tal como están concebidas (...) no están en situación de reaccionar adecuadamente ante los riesgos de la civilización, ya que se forman y participan de manera notable en el crecimiento de estos riesgos» (Beck, [1986] 1998: 66).

En su siguiente libro en inglés *World Risk Society* (1999), traducido al español como *La sociedad del riesgo global* (2002a), Beck reúne siete trabajos que fueron publicados en revistas alemanas durante la década de 1990, cuando ya se ha producido el colapso de la Unión Soviética. Entonces el mundo bipolar se desvanece y «pasamos de un mundo de enemigos



a un mundo de peligros y riesgos», al decir del propio autor en su *Manifiesto cosmopolita*, una versión revisada del cual sirve de introducción a ese compendio de ensayos. Concebido como un llamado a la experimentación política, parafraseando incluso al *Manifiesto comunista* de Carlos Marx («¡Ciudadanos del mundo, uníos!», en lugar de «¡Proletarios del mundo, uníos!»), ese documento exhorta a crear partidos y comunidades no territoriales de riesgo compartido a nivel transnacional (Beck, [1999] 2002a: 28). A este tipo de politización desde abajo o «subpolítica» (*sub-politics*) concede Beck una gran importancia en el tránsito hacia la segunda modernidad, ya que significa la irrupción de nuevas formas y actores sociales en el debate público sobre las consecuencias indeseadas del progreso tecnocientífico.

Al constituir un resumen de sus tesis más importantes hasta ese momento, el *Manifiesto cosmopolita* deviene alegato epistemológico con el que Beck responde a sus críticos, instándolos a encarar los procesos de cambio generados por la globalización en el contexto de la postguerra fría. Luego de Chernobyl se habían producido otros fenómenos inéditos a favor de su teoría del riesgo global como la crisis de la EBS (Encefalopatía bovina espongiforme), llamada de las «vacas locas», así como el desplome del mercado financiero mundial, que el sociólogo ilustra «mediante la experiencia de la crisis asiática, igual que en 1986 podían ilustrarse los aspectos básicos de la sociedad del riesgo tecnológico y ecológico global mediante la conmoción antropológica de Chernobyl» (Beck, [1999] 2002a: 11). Estos acontecimientos corroboraban que los riesgos tecnológicos, políticos, económicos, sociales... tienden cada vez más a escapar del control que ejercen las instituciones formadas en la sociedad industrial.

La evolución del pensamiento beckiano es un ejemplo de esa propia *reflexividad*, en el sentido de proceso «reflejo» o de autoconfrontación que la sociedad moderna se impone a sí misma durante el difícil tránsito hacia un futuro imprevisible. En consonancia, hasta su muerte en 2015, Beck nunca dejaría de reflexionar sobre cada transformación o suceso que cupiera dentro de su noción de sociedad del riesgo global, incluida la catástrofe 11/9: « Los ataques terroristas en Estados Unidos fueron el Chernobyl de la globalización. Así como el desastre ruso minó nuestra fe en la energía nuclear, el 11 de septiembre puso al desnudo la falsa promesa del neoliberalismo» (Beck, [1999] 2002b: 47). Su vocación reflexiva también se expresó en la disposición a mantener un contrapunteo con otros autores concurrentes —Niklas Luhmann, en primer lugar—, además de los encontronazos con las perspectivas cultural y postmodernista que también abordan el riesgo como producto de la modernidad, augurando las peores consecuencias para la sociedad postindustrial. Es el caso del polaco Zygmunt Bauman (1992) y su tesis de la *modernidad líquida*, con la cual critica a Beck por «no haber abandonado la esperanza (algunos dirían la ilusión) de que ‘la reflexividad’ logrará lo que la racionalidad no ha sido capaz de lograr». Citándolo textualmente, Beck le replica imputándole un «pesimismo lineal», ya que «ha extremado aún más y con sobrecogedora sencillez el argumento que anima a todo el mundo a cruzarse de brazos y no hacer nada» (Beck, [2007] 2008: 163).

Ese rechazo frontal de Beck al pesimismo postmoderno se radicaliza en las postrimerías de su vida cuando introduce la noción de «catastrofismo emancipatorio» (*emancipatory catastrophism*) en alusión a los que considera son efectos secundarios beneficiosos del cambio

climático en el orden político y social (Beck, 2015). A explicar esta nueva propuesta suya dedicó un solo artículo que fue el adelanto de su libro inconcluso *The Metamorphosis of the World how Climate Change is Transforming our Concept of the World* (2016), publicado póstumamente. Reconociendo la incapacidad de expresar la confusión del mundo con las nociones de *cambio* de que dispone la sociología: *evolución, revolución y transformación*, Beck se decanta finalmente por el concepto de *metamorfosis* (*Verwandlung*), en tanto significa una transformación mucho más radical y espontánea. El cambio climático sería un agente de esa metamorfosis, al provocar nuevos fenómenos —como la subida del nivel del mar— que obligarían a reconceptualizar la realidad. A partir de este razonamiento, el sociólogo alemán acometía una revisión de sus anteriores ideas sobre la modernización reflexiva, aunque sin renunciar a los presupuestos básicos de su teoría de la sociedad del riesgo global.

Si bajo la influencia de Chernobyl y otros desastres catastróficos, Beck había enfatizado en las consecuencias negativas de la próspera modernización como el factor catalizador del tránsito hacia una segunda modernidad, ahora sostiene que «hablar sobre los males produce bienes comunes (*common goods*)», como es que las discusiones sobre el cambio climático podrían alentar nuevas formas de cooperación y solidaridad más allá de las fronteras del Estado-nación (Beck, 2015: 75). En su opinión, por sus características singulares, ese megapeligro sería un agente capaz de modificar las expectativas de la humanidad, de poner a prueba la capacidad que tienen las sociedades para controlar la habitabilidad del planeta y la fundamental razón de la supervivencia humana. En comparación con el tono alarmista del *Manifiesto cosmopolita* (1998), a casi veinte años de haber escrito ese alegato epistemológico, la teoría de la metamorfosis es mucho más conciliadora y prudente:

La metamorfosis del mundo no dice nada respecto a si una transformación dada es para mejor o para peor. Como concepto, no expresa optimismo ni pesimismo con relación al curso de la historia. No describe la decadencia de Occidente ni insinúa que todo será para mejor. Lo deja todo abierto y subraya la importancia de las decisiones políticas. Hace hincapié en los peligros a los que se enfrenta la sociedad, que podrían conducirla a una catástrofe, pero también en el alcance de un “catastrofismo emancipador” (Beck, 2015: 33).

Al relacionar el riesgo tecnológico y el conocimiento tecnocientífico con otras problemáticas más habitualmente tratadas por el *mainstream* de la teoría social (el cosmopolitismo, el neoliberalismo, la globalización...), el enfoque macrosociológico de Beck influyó grandemente sobre los estudios CTS, potenciando su dimensión axiológica (Lash, 2015). Pero ha sido muy criticado desde el lado del *Risk Analysis*, achacándole poca comprensión del cálculo de probabilidades y del sistema de seguros (Campbell y Currie, 2006). También se le ha reprochado indistintamente su ambigüedad conceptual, ausencia de investigación empírica, demasiado apego al realismo y falta de visión cultural (Alexander, y Smith, 2000; Aven, 2012). Sin embargo, considerando que su teoría de la sociedad del riesgo global sigue ganando en validez explicativa, aprovechamos sus nociones de «incertidumbre manufacturada» (*manufactured uncertainty*), «riesgo manufacturado» (*manufactured risk*) y «no saber»

(*Nichtwissen* en alemán; traducido en inglés como *non-knowledge*) para fundamentar el carácter único del riesgo nuclear y radiológico, ahora desde una perspectiva macrosociológica. Ejemplificaremos con la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES, por sus siglas en inglés: International Nuclear and Radiological Event Scale), analizándola críticamente como expresión resultante del dilema regulación/promoción luego de las catástrofes sociorradioecológicas de Chernobyl y Fukushima Daiichi.

### 5.1/ *El dilema regulación/promoción como «incertidumbre manufacturada»*

Aunque también tienen en cuenta el calentamiento global, el daño a la capa de ozono y las tecnologías química y genética, las reflexiones de Ulrich Beck durante la década posterior a Chernobyl apuntan a que la modernidad tardía tendrá que vérselas en gran medida con los desastres nucleares. Una de sus líneas de pensamiento, que resulta especialmente inquietante para los ECTS, es la cuestión de cómo el desarrollo del conocimiento tecnocientífico en la llamada «sociedad del saber» trae consigo paralelamente el aumento de la ignorancia o «no saber» (*Nichtwissen*), contribuyendo a fomentar nuevos peligros que son incalculables, incontrollables y, por lo tanto, ingobernables (Beck, [1999] 2002a). A modo de ejemplo representativo, sus diatribas contra la energética nuclear subrayan el infortunado papel de las ciencias de la ingeniería en el tránsito hacia la sociedad del riesgo global:

Este monopolio de los científicos e ingenieros en el diagnóstico de los peligros, está siendo puesto en tela de juicio por la “crisis de realidad” de las ciencias naturales y de la ingeniería en su trato con los detalles de los peligros que producen. Esto no ha ocurrido únicamente después de Chernobyl, pero sí fue entonces cuando se hizo evidente por primera vez para un público amplio: la seguridad y la seguridad probable aparentemente tan cercanas son mundos distintos. Las ciencias de la ingeniería pueden determinar únicamente la seguridad probable. Por tanto, incluso aunque mañana vuelen dos o tres reactores nucleares, sus enunciados seguirán siendo válidos (Beck, [1999] 2002a: 93-94).

A esta gran paradoja de que los riesgos catastróficos como la energética nuclear sean consecuencia indeseadas de los propios esfuerzos científicos y políticos para controlarlos o minimizarlos se refiere Beck mediante el concepto de «incertidumbre manufacturada» (Beck, [1999] 2002a). Basándonos en esta aportación teórica suya, podemos esclarecer un poco más nuestra propia postura ontológica y epistemológica con respecto a las nociones de riesgo e incertidumbre. De hecho, el sistema de categorías beckiano ha sido muy cuestionado por confundir ambos conceptos hasta convertirlos en una metonimia, sobre todo cuando alude indistintamente a la «manufacturación»: riesgo manufacturado e incertidumbre manufacturada. Pero lo cierto es que el aparato conceptual de su teoría sobre la sociedad del riesgo global responde a un calado macrosociológico y para nada pretende tener un propósito heurístico. El propio autor reconoce que «los conceptos de riesgo y sociedad global del riesgo son conceptos ambivalentes, lo que supone que anulan distinciones y conectan antítesis» (Beck, 2000: 19).

La primera de esas antinomias es la dualidad ontológica entre *realismo* y *constructivismo social*, de la cual se derivan todas las demás. De igual modo que existe la creencia en que la naturaleza y la realidad simplemente existen como las vemos (realismo ingenuo o positivismo), en el extremo opuesto existe la creencia de que todo es sociedad (constructivismo ingenuo). Partidario de un «realismo constructivista» —o «realismo reflexivo», como también le dice—, Beck se pronuncia por superar ese antagonismo sobre la base de que «la ontología del riesgo como tal no garantiza el acceso privilegiado a ninguna forma de conocimiento» (Beck, [2007] 2008: 8). Ni la materialidad de las amenazas, susceptibles de ser descritas por las ciencias naturales y la ingeniería, ni la construcción discursiva del riesgo por las ciencias sociales, pueden responder por sí solas a los desafíos de la sociedad postindustrial, cuando ya no existe una distinción clara entre naturaleza y sociedad, entre naturaleza y cultura. Al respecto, Beck se acoge a la idea de un «mundo híbrido» propuesta por Bruno Latour: «Así pues, “riesgo” no es solo una noción que es utilizada como tema central por diferentes disciplinas; es la forma en que la “sociedad híbrida” observa, describe, valora, critica su propia hibridez» (Beck, [2007] 2008, 19).

Una vez aceptado que la naturaleza ha sido integrada por el hombre a la sociedad, ya no es posible externalizar ningún riesgo porque las nuevas fuentes de peligro con potencial catastrófico son el resultado de las propias decisiones humanas: construir centrales atómicas en una zona sísmica o altamente ciclónica, por ejemplo. Ambas formas de conocimiento (realista y social constructivista) deben combinarse para distinguir entre «peligro» (*hazard*) y «riesgo» (*risk*) con arreglo a la capacidad de control y la toma de decisiones. Como veremos en el próximo subacápite (5.2), esta importante distinción *riesgo/peligro* fue introducida por Niklas Luhmann (1991), relacionándola con la distinción *decisores/afectados*. Solo entonces fue asimilada por Beck con el ánimo de contradecirla, al igual que interiorizó otras críticas de sus contemporáneos cuando le convencían o resultaban convenientes. Asimismo, el discurso beckiano fue variando para readecuarse a las nuevas formas de amenazas autogeneradas que también clasificarían dentro de su concepción de la sociedad del riesgo global: el terrorismo transnacional, por ejemplo (Beck, 2002b).

Por todo lo anterior, de acuerdo con Beck, la incertidumbre debe entenderse en el horizonte de referencia de la civilización humana, dado que ya no existe algo como una «naturaleza pura» que pueda contraponerse a la tecnología y a la sociedad. De ahí su concepto de «incertidumbre manufacturada», a la que se supeditan tanto los riesgos calculables (peligros controlables) como los riesgos incalculables (peligros no controlables). Mientras los peligros controlables pueden ser mensurados probabilísticamente (accidentes automovilísticos, por ejemplo), los peligros no controlables serían de tan baja probabilidad de frecuencia y de tan elevado potencial catastrófico que precisarían de cálculos muchos más complicados y precisos. No obstante, el conocimiento tecnocientífico se encuentra incapacitado para desarrollar ese tipo de cálculos, o lo que es más desconcertante: aunque pudieran lograrlo en un futuro, esos mismos cálculos revelarían otras causas y consecuencias indeseadas que no se conocían o aún quedarían por conocer. A esto último es lo que Beck denomina «no-saber» (*Nichtwissen*),

en el doble sentido de incapacidad (no puedo) y falta de voluntad (no quiero) para lidiar cognitivamente con esos megapeligros legitimados por las propias instituciones de la sociedad industrial, ya que presuntamente reportan grandes beneficios y su posibilidad de daño es extremadamente improbable (Beck, 2002a).

Sin embargo, aunque tengan bajísima probabilidad de ocurrencia, pareciendo «riesgos residuales» prácticamente nulos, estos adquieren un significado decisivo durante el tránsito hacia la sociedad del riesgo global porque desafían la gestión convencional de la «seguridad probable». Al escapar de todo control, esos *riesgos manufacturados* se convierten en *incertidumbre manufacturada*, entendiéndola como una «mezcla de riesgos, más conocimiento, más desconocimiento y reflexividad, y por tanto un nuevo tipo de riesgo» (Beck, [1999] 2002a: 177). Tres principios caracterizarían a la incertidumbre manufacturada:

1) deslocalización (*de-localisation*): Sus riesgos son omnipresentes y no pueden ser delimitados espacial, temporal ni socialmente.

2) incalculabilidad (*incalculableness*): Las consecuencias de esos riesgos son indeterminables, al depender o ser productos de los disensos normativos y el no-saber de la ciencia. Por añadidura, sus causas no pueden ser imputables a alguien (persona o institución) conforme a las actuales normas de causalidad, culpa y responsabilidad legal.

3) no-compensabilidad (*non-compensability*): Los daños de esos riesgos son irreversibles e irreparables, por lo que no son compensables ni asegurables en términos monetarios.

Es así que los conceptos beckianos de *riesgo manufacturado* e *incertidumbre manufacturada*, inextricablemente relacionados, aluden a una peculiar síntesis de conocimiento y no-conocimiento a nivel societal. Bajo estas condiciones, muchos intentos de controlar determinados peligros provocan una exacerbación de la incertidumbre y la aparición de nuevos riesgos. Por ejemplo: al facilitar que cada vez más enfermedades congénitas sean diagnosticadas, los avances en genética humana desdibujan los límites entre enfermos y sanos, «enfermando» a una cantidad de personas que no se consideraban a sí mismas como tales (Beck, 2000). La incertidumbre manufacturada también se explica por la incapacidad y falta de voluntad para reconocer las consecuencias perjudiciales de los riesgos incalculables ya identificados como tales. Sería el caso de la contaminación radiactiva y la exposición a bajas dosis de radiaciones ionizantes prolongadas en el tiempo. De hecho, la noción *no-saber* de Beck se inspira en la experiencia de Chernobyl:

El 26 de abril de 1986 un reactor de la central nuclear de Chernobyl explotó y la catástrofe no solo destruyó el sistema inmunitario y la estructura genética de las células humanas, sino que contaminó el suelo, los ríos y las plantas. Igualmente, contaminó con diversas formas de no-saber, más o menos controvertido, la vida social, la actividad política y casi todas las instituciones estatales: sistemas expertos, hospitales, asistencia pública, partidos políticos e identidad nacional. Con la explosión del reactor explotó el no-saber, y esta inseparabilidad de contaminación nuclear y no-saber constituye el carácter remarcablemente sintomático, totalmente kafkiano del mundo después de Chernobyl (Beck, [2007] 2008:165).

Esta incisiva declaración de Beck sobre la «inseparabilidad de contaminación nuclear y no-saber» remite al estudio de la antropóloga Adriana Petryna *Life Exposed: Biological Citizens After Tschernobyl*. Elaborado en 1996 y publicado en 2002, dicho trabajo analiza cómo las disputas en torno a la cuantificación del riesgo radiológico modelaron la naturaleza del régimen político y legal posterior al desastre nuclear en la Ucrania postsoviética. Luego de ser manipuladas por las autoridades soviéticas para minimizar el impacto de la tragedia, las ambigüedades científicas sobre los daños radiológicos fueron igualmente manipuladas —pero en sentido contrario— por los políticos nacionalistas ucranianos para legitimar el proceso independentista y, de paso, mantener el control de la ciudadanía en el difícil tránsito hacia la sociedad de mercado: «Lo indeterminado del conocimiento científico acerca de los sufrimientos que las personas enfrentan, y acerca de la naturaleza de las catástrofes nucleares, se materializa aquí como una maldición y una fuente de ventaja» (Petrina, 2016: 101).

Por «fuente de ventaja» Petrina se refiere a que, sobre la base de ese «desconocimiento construido» —en el mismo sentido señalado por Beck— fueron adoptadas las leyes de compensación para liquidadores, población relocalizada y otros damnificados. Esa misma condición de padecer alguna enfermedad atribuible a la radiación se convirtió en carta de «ciudadanía biológica» que garantizaba una fuente de ingreso monetario para la subsistencia en tiempos de gran desempleo y pobreza. Esto provocó el auge de la corrupción y la proliferación de prácticas informales para la provisión o venta del acceso a esa suerte de privilegios y protecciones estatales. Como resultado, los propios políticos demócratas y nacionalistas que habían diseñado ese sistema compensatorio terminaron calificándolo como «un terrible error que “accidentalmente” reprodujo una población similar a la socialista» (Petryna, 2016: 105)<sup>47</sup>.

Precisamente, Beck considera a la denegación de cobertura de seguros privados o no-compensabilidad pecuniaria como la principal norma operativa para distinguir entre los riesgos calculables (peligros controlables) y riesgos incalculables (peligros no controlables). A este tema dedicó su texto *Ecological Politics in an Age of Risk* (1995), de imprescindible lectura para entender el significado de la «manufacturación». En contraste con los riesgos naturales y los primeros riesgos industriales en el siglo XIX y primeras décadas del siglo XX, los riesgos manufacturados de alto potencial catastrófico como la energética nuclear superan el límite de lo asegurable en términos de racionalidad económica. Aunque su probabilidad de ocurrencia tienda técnicamente a cero, su impacto económico puede tornarse inconmensurable dada la magnitud irreversible de los daños. Estos riesgos manufacturados no pueden individualizarse a personas u organizaciones particulares mediante contratos de seguros, ya que conciernen a toda la sociedad, a regiones enteras del mundo y, en último término, incluso

---

<sup>47</sup>Aunque con semejanzas, un proceso diferente ocurrió en Bielorrusia, según explica la socióloga Olga Kuchínskaya en su libro *The Politics of Invisibility. Public Knowledge about Radiation Health Effects after Chernobyl* (2014). Su tesis es que la experiencia de las amenazas imperceptibles está mediada necesariamente por dispositivos tecnológicos, mapas y otras formas de visualización, pero también por narrativas. Así, en dependencia de cómo se represente Chernobyl, se puede hacer que sus consecuencias radiológicas sean visibles públicamente, o bien minimizarlas o volverlas invisibles; o sea: políticamente inexistentes. A la narrativa testimonial de la escritora Svetlana Alexiévich, Premio Nobel 2015, se debe una de las visualizaciones más dramáticas del enorme impacto de la catástrofe en esa antigua república soviética.

a generaciones aún no natas. Ni la aseguración privada ni la estatal están a la altura de esa apocalíptica dimensión de los riesgos globales, tal y como se manifiestan en las consecuencias del cambio climático, los alimentos genéticamente modificados y la contaminación radiactiva: «O para expresarlo por referencia a un único ejemplo: hoy todavía no han nacido todos los afectados por Chernobyl, años después del accidente» (Beck, 2002a: 120).

A fin de cuentas, Beck estipula una noción de *riesgo* que no es ni peligro (*hazard*) ni riesgo (*risk*) en el sentido tradicional, sino que alude a un tipo de megapeligros en estado latente con alto potencial destructivo: «Riesgo no es sinónimo de catástrofe. Riesgo significa anticipación de la catástrofe» (Beck, [2007] 2008: 27). Este es el pilar de su teoría macrosociológica: la admonición o advertencia de eventos catastróficos que son producidos involuntariamente por el ser humano y que pudieran llevarlo a su autodestrucción (Mythen, 2004). Si en una primera etapa, el cálculo de los riesgos manufacturados pareciera todavía posible, a medida que la modernización continúa apropiándose de la naturaleza aparecen nuevos tipos de incalculabilidad. Se pasa entonces a una segunda etapa durante la cual impera ya la incertidumbre manufacturada, borrándose la diferencia entre riesgo anticipado y catástrofe efectiva. Quiere decir: la existencia de un megapeligro desconocido solamente se sabrá cuando haya ocurrido el desastre. Al aumentar el «no-conocimiento manufacturado» (*manufactured non-knowledge*), la sociedad postindustrial tendrá que ir aprendiendo a vivir con «las reglas del no-saber» y terminará produciéndose la «explosividad social del riesgo» (Beck, 2009: 115).

Aunque nunca llega a precisar en qué medida la sociedad actual ya se encuentra sumida en esa segunda etapa, Beck asevera que la regulación de los riesgos manufacturados se ha convertido en una «irresponsabilidad organizada» (*organized irresponsibility*), ya que las instituciones parecen reconocer la realidad de las catástrofes, pero al mismo tiempo siguen refutando su existencia, encubriendo sus orígenes y evitando la compensación de los afectados (Beck, 1995, 2009). Esta situación se mantendrá mientras subsista la disparidad entre el carácter de esos nuevos megapeligros y las *relaciones de definición*, entendidas como el conjunto todavía vigente de reglas, instituciones y capacidades que estructuran la identificación, estimación, evaluación y gestión de los riesgos en la sociedad industrial<sup>48</sup>. Mientras persista esa matriz legal, epistemológica y cultural de la política del riesgo, sucederá que la incertidumbre manufacturada será manejada por las instancias de poder mediante un conjunto de mediaciones —«desintoxicaciones simbólicas», al decir de Beck— que minimizan o encubren el potencial catastrófico de los megapeligros (Beck, 1995: 84).

Al referirse a la catástrofe de Fukushima-Daicchi como un «caso muy simbólico de los riesgos en los nuevos tiempos» (Beck y Ohno, 2011), Beck retoma sus diatribas contra la energética nuclear, cuyo renacimiento ya era avizorado como una solución al cambio climático, aprovechando que habían pasado más de dos décadas después de

---

<sup>48</sup>Beck explica sus nociones de «irresponsabilidad organizada» y «relaciones de definición del riesgo» en su libro *Ecological Politics in an Age of Risk* (1995), concibiendo a estas últimas de manera análoga a las «relaciones de producción» según estipuló Karl Marx al dividir la sociedad por sus relaciones de definición en clases: burguesía y proletariado.

Chernobyl. El sociólogo es enfático al rechazar que esa opción energética se maneje como una alternativa futurista a los emisores de CO<sub>2</sub>, ya que la conjunción de ambos megapeligros (nuclear y climatológico) incrementaría la incertidumbre manufacturada. La catástrofe de la electronuclear japonesa le permite subrayar la vigencia de su concepto de «irresponsabilidad organizada», resumiéndolo en estos términos metafóricos:

Estos potenciales de peligro son generados industrialmente, externalizados económicamente, jurídicamente individualizados, técnicamente legitimados y políticamente minimizados. Dicho de otro modo: entre el sistema normativo de control “racional” y los potenciales de autodestrucción desencadenados existe la misma relación que entre los frenos de una bicicleta y un avión intercontinental (Beck, 2011).

Aceptar abiertamente la responsabilidad por la manufacturación de esos riesgos incalculables («avión continental») y, al unísono, tener que admitir la incapacidad para contener su potencial catastrófico («frenos de una bicicleta») conduciría a una enorme crisis de legitimidad de las instituciones responsables, sea cuales fueren. Esto explicaría la enorme reticencia del sistema tecnocientífico nuclear —entiéndase el OIEA— a definir los grandes accidentes históricos de Chernobyl y Fukushima Daiichi como «catástrofes», limitándose a clasificarlos como «accidentes graves». Nos referimos a la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES por sus siglas en inglés), cuyos máximos niveles se adjudican solamente por la cantidad de material radiactivo emitida, sin precisar los efectos perjudiciales —reales o potenciales— por dosis recibida sobre la salud humana y el medio ambiente. Esta herramienta pudiera analizarse como una expresión tácita de «irresponsabilidad organizada», ya que de esta manera la experticia internacional rehúye toda implicación política y moral, negándose a reconocer oficialmente el potencial catastrófico de la energética nuclear.

Mediante un enfoque intratécnico —necesariamente realista— hemos sostenido que el carácter único del riesgo nuclear y radiológico se debe a la existencia de tres dilemas irresolubles: doble uso, ubicación/seguridad y sociorradioecológico. Ahora fundamentaremos esa singularidad desde una perspectiva extratécnica, adoptando el «realismo constructivista o reflexivo» de Beck; o sea, un enfoque más realista que socioconstructivista. Esta doble perspectiva (intratécnica y extratécnica) nos permitirá fundamentar que el dilema regulación/promoción de la energética nuclear se manifiesta como «incertidumbre manufacturada» que se ha acrecentado con cada accidentes histórico superior a la base de diseño. Para ello nos basamos en el sistema de categorías beckiano: deslocalización (*de-localisation*); incalculabilidad (*incalculableness*) y no-compensabilidad (*non-compensability*). Con su ayuda probaremos que la aplicación de la INES fracasará inevitablemente en su objetivo de comunicar al público la magnitud real de los accidentes nucleares de extremadamente baja probabilidad y altas consecuencias (*extremely low-probability/high-consequence disaster*). Como resultado, un «desastre sociorradioecológico» pudiera devenir también «desastre informativo».



### 5.1.1/ *Disfuncionalidad de la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos*

Elaborada por expertos internacionales convocados por el OIEA y la OCDE/AEN<sup>49</sup>, la International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) fue estrenada en 1990 como una de las principales medidas en respuesta al desastre de Chernobyl. Esta herramienta debutó como un registro histórico de los sucesos nucleares en el pasado, incluido el accidente de Kyshtim, hasta entonces mantenido en absoluto secreto por las autoridades soviéticas (ver subacápite 2.1). En adelante, la INES se proponía alertar a la opinión pública sobre los fallos de seguridad en las centrales atómicas. Es así que, por primera vez, se creaba un mecanismo de uso mundial para facilitar la comunicación y la comprensión entre la comunidad técnica, los medios y el público sobre la importancia de los eventos para la seguridad (IAEA y OECD/NEA, 1992, 2001, 2009, 2013; IAEA, 2014).

Para diseñar ese sistema evaluativo se aprovechó la experiencia obtenida con escalas parecidas en Francia, Japón y otros países, así como las escalas internacionales para terremotos: la escala de magnitud local (escala Richter) y la escala de magnitud de momento, así como la escala de intensidad (escala de Mercalli). Cada uno de los siete niveles de la INES por encima del nivel cero representa un incremento de gravedad en aproximadamente un orden de magnitud; es decir, se trata de una escala logarítmica que, a la vez, es discreta (ver infografía 16):

—los niveles altos (4 a 7) se denominan «accidentes» y se clasifican en: accidente con consecuencias de alcance local (nivel 4); accidente con consecuencias de mayor alcance (nivel 5); accidente importante (nivel 6) y accidente grave (nivel 7);

—los niveles bajos (1 a 3) se denominan «incidentes»: anomalía (nivel 1), incidente (nivel 2) e incidente importante (nivel 3);

—los sucesos sin significación para la seguridad están clasificados como «debajo de la escala /nivel 0».

Retrospectivamente, los accidentes de Windscale (Reino Unido) y Three Mile Island (Estados Unidos) fueron evaluados con 5, y el de Kyshtym con 6, mientras que el único con nivel 7 fue Chernobyl, sellando el debut de dicha escala. A partir de 1992, la INES fue ampliada y adaptada para aplicarla a toda instalación relacionada con la industria nuclear civil, incluyendo el transporte, almacenamiento y uso de fuentes y materiales radiactivos (IAEA y OECD/NEA, 1992). Luego de sucesivas revisiones para adecuarlo a las demás prácticas, ese sistema evaluativo de siete niveles quedó establecido de tal manera que todos los sucesos nucleares y radiológicos se clasifican con referencia a tres áreas de impacto:

—defensa en profundidad (desde los niveles 1 al 3);

—barreras y controles radiológicos en las instalaciones (desde los niveles 1 al 5);

—efectos sobre la población y el medio ambiente (desde los niveles 1 al 7).

La clasificación de un suceso, ya sea en instalaciones nucleares o relacionado con fuentes de radiación y su transporte, depende del nivel más alto que se asigne al considerar cada una de esas áreas de impacto. Por ejemplo: atendiendo a los efectos perjudiciales so-

---

<sup>49</sup>Agencia para la Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE/NEA por sus siglas en inglés).

bre la población y el medio ambiente, se clasificó con el nivel 5 el caso de Goiânia (Brasil) en 1987, cuando cuatro personas murieron y otras seis recibieron dosis de varios Gy emitidas por una fuente de Cs-137 con alta radiactividad, abandonada y rota. Un suceso que produzca una única muerte por radiación se considera de nivel 4. En los casos no letales se tiene en cuenta la dosis recibida, y se asigna un nivel 3 cuando los efectos hayan sido reacciones tisulares nocivas (deterministas): quemaduras, por ejemplo.

En especial para las centrales atómicas, tratándose de eventos relacionados con su defensa en profundidad, el nivel 3 (incidente importante) se adjudica cuando se haya confirmado la pérdida de enfriamiento del reactor nuclear. En dependencia de cuáles sean los percances con las barreras y controles radiológicos, el nivel 4 (accidente con consecuencias de alcance local) y el nivel 5 (accidente con consecuencias de mayor alcance) deben asignarse cuando se ha constatado el deterioro del núcleo del reactor, mientras no haya sido reportada una emisión considerable de material radiactivo hacia el exterior (Three Mile Island, por ejemplo). De producirse escapes radiactivos fuera de la instalación y confirmarse la posibilidad de efectos nocivos sobre la población y el medio ambiente, el rango de accidente se adjudica también desde el nivel 4, pero puede llegar hasta el nivel 7 en dependencia de cuál sea la magnitud de actividad emitida, estableciendo su equivalencia radiológica a un cierto número de terabequerelios (TBq) de yodo-131. La distinción entre los niveles se establece por factores de diez, de acuerdo con el carácter logarítmico de la escala, a partir del nivel máximo:

*«Nivel 7: Suceso que tiene como resultado una emisión medioambiental correspondiente a una cantidad de radiactividad equivalente a una emisión a la atmósfera de más de varias decenas de miles de terabequerelios de yodo-131»* (dado que  $1 \text{ TBq} = 10^{12} \text{ Bq}$ , sería  $>10^{16} \text{ Bq}$ ).

A continuación, el mismo texto se mantiene para los niveles inferiores, sustituyendo la cantidad liberada por las expresiones:

*«Nivel 6... del orden de miles a decenas de miles...»* (entre  $10^{15}$  y  $10^{16} \text{ Bq}$ )

*«Nivel 5... del orden de cientos a miles de...»* (entre  $10^{14}$  y  $10^{15} \text{ Bq}$ )

*«Nivel 4... del orden de decenas a cientos de...»* (entre  $10^{13}$  y  $10^{14} \text{ Bq}$ )

Para facilitar esa cuantificación de las liberaciones radiactivas desde un reactor u otra instalación nuclear, se sugiere que los límites entre los niveles sean 500, 5 000 y 50 000 TBq de yodo-131, respectivamente. O sea, hasta 500 TBq se trata de un nivel 4; desde 500 hasta 5 000 TBq, un nivel 5, y desde 5 000 hasta 50 000 TBq, un nivel 6. Por encima de esta última cifra, ya sería un nivel 7, considerando a Chernobyl como el máximo referente de una «emisión grave de materiales radiactivos con amplios efectos en la salud y el medio ambiente» (OIEA y NEA/OECD, 2010: 3). Es así que el tope superior de la INES se basa en la actividad emitida luego de la explosión del RBMK-1000, la cual fue valorada en más de 50 000 TBq de nucleidos volátiles (yodo-131 y cesio-137), medidos en yodo-131 equivalente. Tal cifra fue suministrada al OIEA por las autoridades soviéticas en 1986 y, diez años después, quedó confirmada por un análisis de la Agencia de Energía Nuclear de la OECD. Sin embargo, como ya se ha explicado antes, ese estimado de liberación radiactiva es todavía motivo de grandes discrepancias, ya que solamente pudo ser deducido mediante modelos matemáticos.

Estos han divergido en sus resultados al cotejar las mediciones radiológicas en el terreno con el estimado de la cantidad de combustible y su composición isotópica dentro de aquel reactor nuclear, antes y después de ocurrir su explosión (ver subacápite 2.4.5).

#### *Aplicación de la INES a los sucesos de Fukushima Daiichi*

Al aplicarse por primera vez a la evolución en tiempo real de un accidente superior a la base de diseño (BDBA) durante los sucesos de Fukushima Daiichi, la confusa asignación de los niveles de la INES por la Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) fue totalmente contraproducente. El 11 de marzo de 2011, el mismo día del terremoto y maremoto, las autoridades reguladoras niponas comenzaron adjudicándole el nivel 3 a los eventos en esa central nuclear. Al día siguiente, 12 de marzo, ese dictamen fue cambiado a nivel 4 luego de producirse la primera de las tres explosiones de hidrógeno. Una vez que ocurrieron las otras dos detonaciones (14 y 15 de marzo, respectivamente), el 18 de marzo fue elevado a nivel 5. Por último, no fue hasta el 4 de abril que se reconoció tardíamente su extrema gravedad con el nivel 7 (Tanaka y Yamazaki, 2012). La comunicación al amplio público, el 12 de abril, añadió más confusión al establecerse el siguiente paralelo: «Aunque el nivel 7 es el más alto nivel de la INES, se estima que la cantidad de materiales radiactivos liberados al medioambiente durante esta etapa es aproximadamente el 10 por ciento del accidente de Chernobyl, que fue evaluado con este mismo nivel en el pasado» (NISA, 2011). O sea, se asignaba el máximo nivel 7, aunque la actividad supuestamente emitida correspondiera a un nivel 5 o 6<sup>50</sup>.

Cuando se analiza esa asignación de niveles, es notorio que las autoridades reguladoras japonesas trataron de ajustarse infructuosamente a las normativas por las tres áreas de impacto. Así, el nivel 3 fue enseguida declarado al constatarse la degradación de la defensa en profundidad luego de la pérdida de todo suministro eléctrico. Sin embargo, la asignación de los niveles 4 y 5 resultó ya harto confusa, atendiendo a que los daños de las barreras y controles radiológicos se produjeron por explosiones de hidrógeno en tres unidades sucesivamente (ver infografía 16, subacápite 2.5). Tras haberse expulsado una cantidad de radionucleidos volátiles superior al 0,1 % del inventario, significaba que ese BDBA era muy superior a Three Mile Island (nivel 5), que también fue un LOCA, pero con fusión del núcleo de un solo reactor, además de que el material radiactivo quedó dentro de la contención (ver subacápite 2.3). Durante más de veinte días, se produjo un preocupante silencio por parte de NISA. Esto hizo que aumentaran las especulaciones sobre cuál sería la magnitud de la liberación radiactiva al medio ambiente, tanto por aire como por mar. Hasta que, obviando el nivel 6, los reguladores japoneses decidieron reconocer públicamente el nivel 7, aunque no se hubiera alcanzado la magnitud de actividad emitida para otorgarle ese rango de «accidente grave».

A partir de esa experiencia se ha planteado que la INES no cumple con los requisitos para la comunicación global en los casos de accidentes prolongados en el tiempo

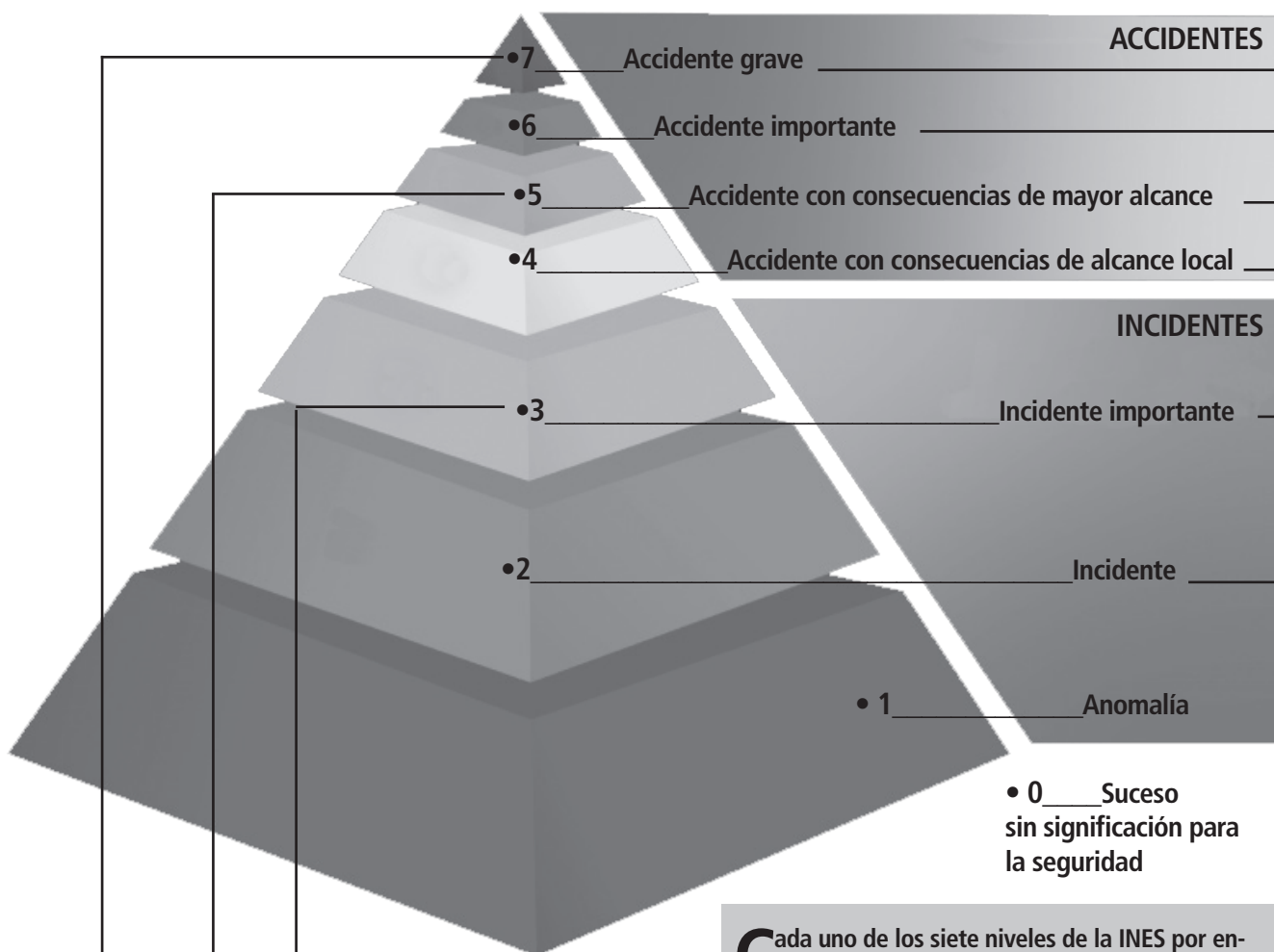
---

<sup>50</sup>Los cálculos de la actividad emitida fueron corregidos en varias ocasiones y, al superar los 10<sup>16</sup> Bq, correspondieron finalmente a un nivel 7 (Tanaka y Yamazaki, 2012).

La International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) fue estrenada en 1990 como una de las principales medidas para afrontar el dilema regulación/promoción en respuesta al desastre de Chernobyl. Su objetivo es facilitar la comunicación y la comprensión entre la comunidad técnica, los medios y el público sobre la importancia de los eventos para la seguridad (IAEA y OECD/NEA, 1992, 2001, 2009, 2013; IAEA, 2014). Sin embargo, al aplicarse por primera vez a la evolución en tiempo real de un accidente superior a la base de diseño (BDBA) durante los sucesos de Fukushima Daiichi, la confusa asignación de sus niveles

por la Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), entidad reguladora japonesa, fue totalmente contraproducente.

A partir de entonces se ha criticado la inoperancia de esa escala logarítmica de siete niveles para evaluar un accidente que se prolongue en el tiempo o tenga varios sucesos iniciadores, llegando a plantearse que dicha herramienta no cumple con los requisitos para la comunicación global. Asumiendo cierta cuota de responsabilidad, el OIEA reconoció en 2014 que «la información relacionada con algunos de los criterios de calificación de INES es limitada o contiene incertidumbres» (OIEA y AEN/OECD, 2014: 21).



Cada uno de los siete niveles de la INES por encima del nivel 0 corresponde a un incremento de gravedad en aproximadamente un orden de magnitud. A partir de 1992, esta escala logarítmica fue ampliada y adaptada para aplicarla a toda instalación relacionada con la industria nuclear civil, incluyendo el transporte, almacenamiento y uso de fuentes y materiales radiactivos (IAEA y OECD/NEA, 1992). La clasificación de un suceso depende del nivel más alto que se asigne en cualquiera de las siguientes tres áreas de impacto: defensa en profundidad (desde los niveles 1 al 3); barreras y controles radiológicos en las instalaciones (desde los niveles 1 al 5), y efectos sobre la población y el medio ambiente (desde los niveles 1 al 7).

## NIVELES ASIGNADOS DE LA INES A SUCESOS EN CENTRALES NUCLEARES (ANTES DE FUKUSHIMA DAIICHI)

DEFENSA EN PROFUNDIDAD	BARRERAS Y CONTROLES RADIOLÓGICOS	PERSONAS Y MEDIO AMBIENTE
Su nivel más alto es 3 (incidente importante) y se adjudica cuando se ha constatado la degradación de la defensa en profundidad (DiD), sin que haya implicado peligro de emisión radiactiva. Por ejemplo: pérdida de refrigeración de elementos de combustible, incendio u otro fallo de los sistemas de seguridad que pudo ser controlado.	Su nivel máximo es 5 (accidente con consecuencias de mayor alcance) y debe aplicarse cuando se constaten daños en las barreras y controles radiológicos, pero sin consecuencias importantes para las personas y el medio ambiente. Por ejemplo: fusión del núcleo del reactor por pérdida de refrigeración (LOCA), pero el material radiactivo ha quedado dentro de la contención.	Su nivel máximo es 7, el tope superior de la INES, y se debe asignar cuando las liberaciones radiactivas al exterior superen los 50 000 TBq de yodo-131. Esta categoría de accidente grave se basó en la experiencia de Chernobyl, cuando se reconoció la posibilidad de efectos dañinos generalizados sobre la salud y el medio ambiente.
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 7</li> <li>Chernobyl (URSS, 1986)</li> <li>• nivel 6</li> <li>Kyshtym (URSS, 1957)</li> <li>• nivel 5</li> <li>Windscale (R. Unido, 1957)</li> <li>• nivel 4</li> <li>Tokaimura (Japón, 1999)</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 5</li> <li>Three Mile Island (1979, EUA)</li> <li>• nivel 4</li> <li>Saint Laurent des Eaux (Francia, 1980)</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 3</li> <li>Vandellós (España, 1989)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 3</li> <li>Sellafield (Reino Unido, 2005)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 3</li> <li>No hay asignación</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 2</li> <li>Forsmark (Suecia, 2006)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 2</li> <li>Cadarache (Francia, 1993)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 2</li> <li>Atucha (Argentina, 2005)</li> </ul>

## ASIGNACIÓN DE NIVELES DE LA INES DURANTE LOS SUCESOS DE FUKUSHIMA DAIICHI

<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 3</li> <li>11 de marzo de 2011 (inicio)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 4</li> <li>12 de marzo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 5</li> <li>18 de marzo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nivel 7</li> <li>4 de abril (12 de abril, anuncio público)</li> </ul>
<p>***</p> <p>tres explosiones de hidrógeno: los días 12, 14 y 15 de marzo, respectivamente</p>			

Cuando se evalúa la asignación de los niveles de la INES durante los sucesos de Fukushima Daiichi, es notorio que las autoridades reguladoras japonesas (NISA) trataron de ajustarse infructuosamente a las normativas por las tres áreas de impacto. Así, el nivel 3 fue enseguida declarado al constatarse la degradación de la defensa en profundidad (DiD) por pérdida de todo suministro eléctrico. Sin embargo, la asignación de los niveles 4 y 5 resultó ya bastante confusa, atendiendo a que los daños de las barreras y controles radiológicos se produjeron por explosiones de hidrógeno en tres unidades sucesivamente. Significaba que ese BDBA ya era muy superior a Three Mile Island (nivel 5), que también fue un LOCA, pero con

fusión del núcleo de un solo reactor, además de que el material radiactivo quedó dentro de la contención.

Pero aun más preocupante fue el silencio de la experticia japonesa por más de veinte días hasta que NISA, obviando el nivel 6, decidió reconocer el nivel 7, aunque no se hubiera alcanzado la magnitud de actividad emitida para otorgarle ese rango de «accidente grave» (Tanaka y Yamazaki, 2012). A partir de esta experiencia puede afirmarse que la disfuncionalidad de la INES resultaría un riesgo en sí misma que podría agravar la gestión de un BDBA, máxime si se produce una contaminación transfronteriza. En este caso, un «desastre sociorradioecológico» pudiera devenir también «desastre informativo».

y que tengan varios sucesos iniciadores (Kermisch, 2011). Asumiendo cierta cuota de responsabilidad, el OIEA reconoció en 2014 que «la información relacionada con algunos de los criterios de calificación de INES es limitada o contiene incertidumbres» (INES, 2014: 21). Sin embargo, no se ha efectuado una revisión profunda de las graves implicaciones que podría tener la aplicación disfuncional de esa herramienta durante una contaminación transfronteriza, por ejemplo. Una vez que sea irreversible una liberación radiactiva al medio ambiente y se propague a otros territorios de una manera impredecible —tal y como ocurrió en Chernobyl—, la asignación de los niveles por magnitud de actividad emitida sería irreal y confusa. ¿Cuál sería la diferencia para el público afectado entre 50 000 TBq, que sería el tope para asignar el nivel 6, y algo más de 50 000 TBq, que ya obligaría de inmediato a asignar el máximo nivel 7?

A la INES se ha contrapuesto la NAMS (Nuclear Accident Magnitude Scale), que también está basada en la actividad emitida o radiactividad liberada (R), pero mediante una clasificación continua cuantificada sin tope superior:  $M = \log_{10}(20R)$ , donde R se expresa en TBq. Este proceder sería un equivalente más parecido a la escala continua de Richter, cuyo sistema clasificatorio se basa en el logaritmo de la energía física liberada por los terremotos, que para el caso de los accidentes nucleares correspondería a la magnitud de actividad emitida. De esta manera se evita restringir el grado de gravedad a un tope de siete niveles como hace la INES. Esta también se basa en la escala discreta de Mercalli, que mide la intensidad del impacto sismológico, asignando cada nivel en función de los daños: desde nivel I (no se sintió) hasta nivel XII (destrucción total). En el caso de los accidentes nucleares serían las tres áreas de impacto, como ya se ha visto: defensa en profundidad (desde los niveles 1 al 3); barreras y controles radiológicos en las instalaciones (desde los niveles 1 al 5), y efectos sobre la población y el medio ambiente (desde los niveles 1 al 7).

Luego de cuestionar desde el punto de vista técnico a la INES por mezclar confusamente los criterios de ambas escalas sismológicas (Richter y Mercalli), el autor de la NAMS descalifica esa escala oficial del OIEA por constituir «más una herramienta de relaciones públicas que una medida científica objetiva» (Smythe, 2011). Mientras que la INES otorga su máximo nivel 7 de «accidente grave» solamente a Chernobyl y Fukushima Daiichi, la NAMS reconoce cuatro «accidentes catastróficos», cada uno de los cuales se diferencia en 2-3 órdenes de magnitud con respecto al que le sigue en jerarquía decreciente: Chernobyl ( $M=8$ ), Three Mile Island (7,9), Fukushima Daiichi (7,5) y Kyshtim (7,3). Esta asignación es muy controversial, ya que jerarquiza a TMI-2 en segundo lugar, considerando altas cifras de emisiones radiactivas no informadas oficialmente. También los partidarios de la NAMS critican que la INES no haya reconocido múltiples accidentes de carácter militar y civil, sobre los cuales se ha tenido conocimiento a lo largo de los años (Smythe, 2011).

Ambas escalas (INES y NAMS) fueron confrontadas para proponer una tercera clasificación de los sucesos nucleares por su daño financiero en dólares (Wheatley *et al*, 2015). Según este criterio monetario, Fukushima Daiichi pasa al primer lugar, seguido por Chernobyl, y

le sigue el incidente en la electronuclear japonesa de Tsuruga en 1995<sup>51</sup>. Esta tercera escala también descalifica a la INES por sus imprecisiones metodológicas, aprovechando para alertar sobre el comportamiento de los accidentes catastróficos como fenómenos «rey dragón» (*dragon-kings* o DKs), en el sentido de que son eventos raros e imprevisibles, cuyo aumento de frecuencia y severidad parecen responder a un peculiar comportamiento matemático. Mediante un sofisticado análisis estadístico de sus consecuencias, se vaticina que esos DKs podrían repetirse antes de los próximos cincuenta años, dado que responden a una conjunción de combinaciones o circunstancias hasta ahora desconocidas que escapan por su alto grado de complejidad a los actuales análisis probabilísticos de seguridad (Wheatley *et al*, 2015).

Pero la principal insuficiencia de esas tres escalas numéricas, tanto de la oficial INES como de la alternativa NAMS y de la predictiva DKs, es que ninguna se propuso evaluar la densidad poblacional, las condiciones meteorológicas y las distintas formas de propagación, entre otros tantos factores imprescindibles para la toma de decisiones en caso de una gran liberación radiactiva. Aunque fuese solamente con carácter retroactivo, el comportamiento de estos factores medioambientales debiera tenerse en cuenta para evaluar los accidentes nucleares, de lo contrario primaría solamente la valoración cuantitativa de la liberación radiactiva, altamente dudosa e incierta. Por este y otros motivos, aunque fue diseñada por el OIEA con fines mediáticos y/o comunicativos, la INES resultaría un alto riesgo en sí misma al ser aplicada en tiempo real a un accidente nuclear superior a la base de diseño (BDBA), máxime si se produce una contaminación transfronteriza.

#### 5.1.2/ Posibilidad de catástrofe sociorradiecológica por implosión informativa

Si bien no se considera un sistema de notificación oficial, la INES fue implementada con el propósito de que sus comunicaciones tuvieran lugar sin demora, «de lo contrario, se producirán interpretaciones confusas del suceso debido a la especulación de los medios de comunicación y de la población» (OIEA y AEN/OCDE, 2010: 9). Al respecto se tenía la experiencia de Three Mile Island, cuando la amplificación de la percepción del riesgo pareció comportarse a manera de «efectos de onda» (*ripple effects*) por la cobertura informativa a escala individual, local y societal, sobre todo debido a la influencia de los *mass media*, incluyendo el estreno de la película *El síndrome de China* (ver subacápite 2.3). Otra fue la experiencia de Chernobyl, cuando la sociedad mundial estuvo en vilo hasta que las autoridades soviéticas decidieron romper el secretismo y, cediendo a la presión internacional, se decidieron a revelar lo ocurrido por boca del académico Valeri A. Legásov a fines de agosto de 1986 (ver subacápite 2.4).

Al ocurrir la explosión de un reactor electronuclear por primera vez en la historia, se hizo mucho más evidente que puede producirse un vacío de información debido a la renuencia de los científicos, ingenieros y demás expertos a ofrecerla de manera expedita. Sucede cuando se trata de una sorpresa tecnológica para la cual no hay una explicación plausible, mientras

---

<sup>51</sup>Se trata del incidente con Monju, el reactor de neutrones rápidos japonés refrigerado con sodio. Una fuga de ese refrigerante causó un incendio y, tras revelarse un encubrimiento del alcance del accidente, la instalación estuvo detenida hasta mayo de 2010 (Mikami *et al*, 1996). Luego de varios incidentes, una vez ocurrida la tragedia de Fukushima Daiichi, el proyecto Monju fue clausurado finalmente en 2016. Trabajó solamente 250 días durante sus 22 años de existencia (Takubo, 2017).

comienzan a sufrirse las consecuencias inevitables del accidente. Hasta que los máximos representantes de la comunidad nuclear son obligados a responsabilizarse con lo sucedido, así como a identificar cuanto antes a los posibles culpables, aunque esto implique sacrificar a varios de sus miembros. El alto precio a pagar es que el secretismo histórico de la privilegiada esfera atómica queda expuesto al escrutinio público como abierta caja de Pandora. Sucede también que el sistema tecnocientífico nuclear puede reaccionar autoclausurándose, al sentirse demasiado presionado por los demás sistemas sociales: el político, en primera instancia.

Así ocurrió después de Chernobyl, cuando las autoridades gubernamentales soviéticas tuvieron que emplear a fondo sus servicios de inteligencia para averiguar cuáles podían ser las verdaderas causas de la explosión del RBMK-1000 (Karpan, 2005). Es famosa la anécdota de Mijail Gorbachev, inculcando al académico Anatoli P. Alexándrov por haberle asegurado que esos reactores no podían explotar y hasta podían exhibirse en la Plaza Roja como un samovar. La más reciente biografía de este reputado científico evita el tema y, al reivindicarlo como uno de los fundadores del proyecto atómico soviético, toca muy sucintamente el dramático final de su carrera, luego de haberse reconocido culpable por las insuficiencias tecnológicas del RBMK-1000 durante una reunión del Politburó (Bodrijin, 2018: 423)<sup>52</sup>. A las enormes presiones ejercidas sobre la comunidad nuclear dedica una parte importante de su testimonio Leonid A. Ilin, máximo responsable de la protección radiológica en la URSS. Este relata cómo fue emplazado por la máxima autoridad partidista ucraniana para que, junto al también reconocido académico Yuri Izrael, dieran su veredicto *ipso facto* sobre si era necesario evacuar urgentemente a los cerca de tres millones de habitantes de Kíev; o, al menos, a los niños y mujeres embarazadas. Al conocerse años después que ambos científicos estimaron innecesaria dicha evacuación, fueron estigmatizados políticamente (ver subacápite 3.4.3)<sup>53</sup>.

Más adelante se retomará por qué esa renuencia de los expertos nucleares a ofrecer una explicación expedita durante los grandes accidentes históricos hasta que son emplazados socialmente (ver subacápite 5.2.1). Por este motivo, aunque se resista a reconocerlo, la propia experticia ha contribuido con su silencio a la propagación del *no saber* por los medios masivos de comunicación y las redes sociales. Como resultado, termina «implosionando» la credibilidad científica y se instaura la desconfianza a nivel societal durante la comunicación del riesgo nuclear y radiológico. Así ocurrió durante los sucesos de Fukushima Daiichi desde el primer momento en que fue mal aplicada la INES en tiempo real. Con arreglo a esta experiencia, comparándola con Chernobyl, reflexionamos en lo adelante sobre la posibilidad de una «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa». Nos basamos por ahora en las tres características señaladas

---

<sup>52</sup>Todo hace indicar que fue en esa reunión partidista, celebrada en julio de 1986, cuando Alexándrov pidió su liberación como presidente de la Academia de Ciencias de la URSS. No se puede comprender su drama personal, así como el de su subordinado Valeri A. Legásov (ver acápite 2.4.5), sin tener en cuenta el aspecto moral relacionado con la membresía comunista de ambos. No fue el caso de Nikolai A. Dollezhal, proyectista del RBMK-1000, quien no era militante del PCUS y siempre negó su responsabilidad por lo acaecido, atribuyéndoselo al dislate de los operadores. Aunque suelen menospreciarse estos factores morales, son muy importantes para percibir el contexto soviético.

<sup>53</sup>Documentos desclasificados de la KGB en 2019 arrojan mucho más información sensible sobre aquellos acontecimientos, sobre todo lo relacionado a los altísimos niveles de cesio en la ciudad de Kíev. Estos datos contradicen en gran medida los testimonios de Ilin e Izrael (Pripyat-city, 2021).



por Ulrich Beck para caracterizar a la «inseparabilidad de contaminación nuclear y no-saber» como epítome de la incertidumbre manufacturada (Beck, [2007] 2008: 165).

### *Deslocalización (espacial, temporal y social)*

Al trascender las fronteras nacionales (deslocalización espacial), así como el presente y futuro previsibles (deslocalización temporal), la contaminación radiactiva se hace omnipresente y sus efectos perjudiciales no pueden circunscribirse a poblaciones determinadas (deslocalización social). Aunque la deslocalización espacial pareciera haberse cumplido en mayor grado para Chernobyl que para Fukushima Daiichi, en este segundo caso se pusieron de manifiesto nuevos peligros desconocidos. Por ejemplo: debido al enfriamiento emergente de los reactores con agua de mar, fue vertida una gran cantidad de emisiones líquidas al océano (Von Hippel, 2011). La cuantificación de esta actividad emitida requería de nuevos modelos matemáticos y, por tanto, no fue reportada inicialmente por las autoridades japonesas. La INES tampoco preveía esa posibilidad, ya que su asignación de niveles habla solamente de «emisión a la atmósfera». Aunque se ha tratado de minimizar esta omisión, se evidenció que dicha escala internacional resulta insuficiente para evaluar otros escenarios de deslocalización espacial que no sean los históricamente conocidos (Alonso, 2011; Kermisch, 2011).

La deslocalización temporal comienza con la incapacidad humana para saber cómo evolucionará secuencialmente un accidente con fusión del núcleo, luego de haber perdido la refrigeración, ya que se trataría de un accidente superior a la base de diseño (BDBA); o sea, un accidente no previsto. A partir de ese momento (nivel 5 de la INES), el escenario irá cambiando rápidamente en dependencia de cuáles sean las acciones de mitigación para salvaguardar la contención radiactiva (si se logra o no evitar la explosión del hidrógeno), así como la efectividad de los planes de emergencia para proteger a las personas, cuando ya resulta inminente que habrá alguna liberación de radioisótopos artificiales al medio ambiente. Aunque se trate de seguir la evolución en tiempo real, la aplicación de cualquier escala evaluativa a un BDBA se retardaría siempre debido a la enorme variabilidad de la situación accidental. Esto explica que se haya pasado directamente de un nivel 5 a un nivel 7 en el caso de Fukushima Daiichi.

Por tanto, la única función de la INES —así como de su alternativa NAMS— sería tratar de alertar a la comunidad internacional sobre el desenlace parcial de los acontecimientos, restringiéndose a constatar los hechos más importantes con tal de efectuar su clasificación aproximada *a posteriori*. Tal es así que, después de la experiencia japonesa, la OIEA insiste en que la INES nunca deberá interferir en la adopción de medidas proactivas como las evacuaciones masivas (IAEA, 2014). Asimismo, recomienda que sus niveles se asignen de la siguiente manera:

—para el «criterio de impacto sobre la defensa en profundidad», el nivel 3 deberá adjudicarse como calificación más alta cuando se haya confirmado la pérdida de enfriamiento del reactor nuclear. Mientras no se confirme la fusión del núcleo, debe alertarse: «El evento

es al menos un nivel 3. Puede haber ocurrido una liberación de material radiactivo y estamos buscando establecer la magnitud para proporcionar una calificación INES más precisa. Mientras tanto, se están tomando las medidas adecuadas para mitigar las consecuencias del accidente y proteger al público» (IAEA, 2014: 21).

—teniendo en cuenta el «criterio de impacto en barreras y controles radiológicos», su máximo nivel 5 se asignará únicamente cuando haya ocurrido la fusión del núcleo. Mientras no se confirme alguna emisión radiactiva hacia el exterior, debe usarse el mismo tipo de mensaje precautorio, pero ya reconociendo que «al menos hay un nivel 5».

—el «criterio de impacto sobre las personas y el medio ambiente» se aplicará solamente cuando se compruebe liberación radiactiva fuera de la instalación. Su clasificación desde el nivel 3 se asignará según la magnitud de actividad emitida, pudiendo llegar a alcanzar los toques máximos 6 y 7.

De atenerse a ese procedimiento secuencial, se plantea que la asignación de niveles *in crescendo* tiene la ventaja de evitar un pánico social innecesario, pero también la desventaja de incrementar la ansiedad ante la inminencia de la liberación radiactiva (Alonso, 2011). En cuanto a la situación inversa, comenzando con un nivel estimado superior que pudiera ser disminuido, tendría la desventaja de haber desatado ese pánico si la gravedad del accidente es menor que la inicialmente asignada. Como quiera que sea, en uno y otro caso, las autoridades regulatorias del país propietario de la central atómica accidentada se enfrentarían al enorme conflicto de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico en condiciones de incertidumbre prácticamente invaluable, máxime cuando el escenario accidental ya puede ser seguido a nivel global en tiempo real gracias a internet. No se trataría solamente de la cobertura informativa por los *mass media*, sino que las propias personas podrían estar al tanto de lo que ocurre, como sucedió con las tres explosiones de Fukushima Daiichi.

Esta incertidumbre se radicalizaría si la liberación radiactiva, ya evaluada por la INES, afectara más severamente a los países vecinos que al propio responsable del accidente. Esta deslocalización espacial y social dependería de factores imprevisibles como las condiciones meteorológicas y la celeridad de las medidas de liquidación que se adoptaran. Así ocurrió en la Unión Soviética cuando, desde el 26 de abril hasta el 5 de mayo, se produjo la emisión continua de radiactividad artificial desde el RBMK-1000 en ascuas, mientras se trataba de sepultarlo con la mezcla de boro, plomo, dolomita, arena y arcilla. «La nube de Chernobyl, antes de diluirse en la estratosfera por los siglos, al menos dos veces le dio la vuelta a la Tierra, dejando huellas sobre todo en el cono norte» (Yablokov, 2016: 17).

### *Incalculabilidad del riesgo nuclear y radiológico*

Al igual que sucedió con Chernobyl, la probabilidad de Fukushima Daiichi era prácticamente nula, al punto de ser considerado por los expertos nucleares un suceso imprevisible o «cisne negro» (ver acápite 2.5). En realidad, ese triple desastre (terremoto-tsunami-crisis nuclear) plantea un nuevo tipo de *incalculabilidad*, dado que los sucesos

iniciadores del accidente no se producen en el interior de la central atómica, pero destacan vulnerabilidades intrínsecas de su diseño; en especial, de su defensa en profundidad (DiD). La evaluación del riesgo nuclear y radiológico deja de ser una cuestión solamente técnica para garantizar la seguridad tecnológica (control de las causas), estando obligada a incorporar también las reclamaciones sociales sobre las consecuencias por la pérdida de ese control. Los expertos nucleares no pueden limitarse a responder la interrogante: ¿cuán suficientemente seguros son los reactores nucleares para resistir el impacto de un terremoto seguido de tsunami? También deben prever que se produzca el peor escenario: ¿cómo enfrentar los efectos nocivos de una liberación radiactiva sobre el ser humano y el medio ambiente a corto, mediano y largo plazos?

Al tener que agenciárselas con la incertidumbre manufacturada de haber construido centrales atómicas en una zona altamente sísmica (dilema ubicación/seguridad), una vez que se desató el potencial catastrófico de esa fatídica decisión humana (dilema socio-radioecológico), las autoridades japonesas ya no pueden garantizar que la energética nuclear sea suficientemente segura (dilema regulación/promoción). De hecho, luego de la catástrofe llegaron a estar detenidos de manera permanente los 54 reactores nucleares que producían el 30% de la electricidad en ese país (Méndez, 2012; International Energy Agency, 2019). Esta reducción dramática de la capacidad energética obligó a plantearse una reestructuración de la industria nuclear japonesa, toda en manos de capital privado, proponiendo la creación de un órgano de seguridad con carácter independiente, además de otros cambios estructurales más complejos, como pasar de una «organización horizontal» a una «organización modular» que garantizara la maniobrabilidad en casos de *shock* por terremoto o tsunami (Aoki, 2011).

Sin embargo, cualquier solución de seguridad se enfrentaría a la incalculabilidad del *umbral de catástrofe socioradioecológica*, como analizaremos más adelante (ver subcapítulo 5.2.1). Bajo este prisma también se explicaría el problema irresoluble de la conmensurabilidad, cuando el sistema internacional de protección radiológica es incapaz de comunicar francamente sus propias dudas e incertidumbres irreductibles sobre la necesidad de aplicar el criterio ALARA (ver subcapítulo 3.4). La gran disfuncionalidad comunicacional de la INES es que su máxima asignación del nivel 7 termina allí cuando ya se ha iniciado el mayor escenario de potencial catastrófico: la inminencia de evacuaciones masivas que podrían resultar incontrolables y generar un altísimo grado de conflictividad social. Mientras que durante los sucesos de Chernobyl estuvo a punto de ser evacuado Kíev (ver subcapítulo 3.4.3), igualmente durante los sucesos de Fukushima Daiichi estuvo a punto de ser evacuado Tokio (Greenpeace, 2012). En ambos casos se trata de ciudades con millones de habitantes.

#### *No-compensabilidad pecuniaria*

Dadas las características anteriores (deslocalización e incalculabilidad), el riesgo nuclear y radiológico no es compensable ni asegurable en términos monetarios. Esto ya era sabido desde un inicio, cuando se adoptaron regímenes jurídicos de responsabilidad civil

totalmente favorables al desarrollo de la energética nuclear<sup>54</sup>. Estos convenios internacionales tuvieron que ser readecuados luego de Chernobyl y, todo hace indicar, tendrán que revisarse después de Fukushima Daiichi (Nutall *et al*, 2017). Principios tales como la canalización de la responsabilidad por los daños nucleares hacia el explotador únicamente<sup>55</sup>, y la limitación de dicha responsabilidad en cuantía monetaria, comienzan a ser muy cuestionados cuando se trata de los desastres *NaTech* que involucran factores naturales y tecnogénicos. El dilema regulación/promoción se expresa en su más alto grado cuando la legislación nuclear, tanto nacional como internacional, se enfrasca en proteger a la empresa privada, eximiéndola de cargas financieras que podrían suponer su quiebra y la de las aseguradoras. Esta actitud protectora se hizo más explícita en el primer manual de derecho nuclear, publicado por el OIEA en 2006, teniendo ya en cuenta la experiencia de Chernobyl:

La limitación de la responsabilidad en su cuantía es claramente una ventaja para el explotador. Los legisladores consideran que una responsabilidad ilimitada o de una cuantía muy elevada disuadiría a las personas de dedicarse a actividades nucleares. Los explotadores no deberían estar expuestos a cargas financieras que podrían suponer su quiebra inmediata. La cuantía de la responsabilidad ha sido siempre el principal problema del debate internacional sobre la responsabilidad nuclear. Cualquier cifra que establezca el legislador parecerá arbitraria, aunque, en caso de catástrofe nuclear, el Estado intervendrá necesariamente y pagará indemnizaciones suplementarias. El derecho civil no está concebido para hacer frente a catástrofes; estas requieren medidas especiales (Stoiber *et al*, 2006: 124).

Resulta paradójico que, a efectos legales, se reconozca la posibilidad de «catástrofe nuclear» por la OIEA, mientras que la INES no comprende esa categoría al clasificar la importancia de los sucesos nucleares. Reducir el *3.11 disaster* a un «accidente grave» termina siendo contraproducente hasta para la propia legislación nuclear, que en el

---

<sup>54</sup> El primer régimen de responsabilidad nuclear fue desarrollado en los Estados Unidos cuando se aprobó la Ley Prince-Anderson en 1957 para proporcionar un fondo de compensación federal en caso de accidente nuclear (US. NRC, 2016). Poco después se establecieron dos regímenes jurídicos de convenios internacionales (universal y regional), los cuales fueron revisados a través de los años, pero sobre todo después de Chernobyl (Stoiber *et al*, 2006., 2006):

—Convenio sobre Responsabilidad Civil en Materia de Energía Nuclear (Convenio de París), suscrito en 1960 bajo los auspicios de la OCDE y, con carácter regional, abierto a los Estados miembros de esa organización, así como a otros Estados si gozan del consentimiento de todas las partes firmantes. A este se añadió el Convenio Suplementario de Bruselas (1963).

—Convención sobre Responsabilidad Civil por Accidentes Nucleares (Convención de Viena), suscrito en 1963 bajo los auspicios de la OIEA y con carácter universal (abierto a todos los Estados).

La Convención de Viena y el Convenio de París establecen regímenes amplios y casi idénticos de responsabilidad civil por daños nucleares. Luego de Chernobyl, ambos regímenes jurídicos se vincularon mediante el Protocolo Común de 1988. A ellos se sumó la Convención sobre Indemnización Suplementaria por Daños Nucleares (1997), de carácter universal, también bajo los auspicios del OIEA.

<sup>55</sup> Al considerarse responsable, sea o no culpable de los daños infligidos, el explotador de la instalación nuclear está sujeto a lo que se denomina responsabilidad objetiva, absoluta o no culposa; incluso si el incidente se debe a fuerza mayor: una catástrofe natural, por ejemplo (Stoiber *et al*, 2006: 2006). Este principio se instrumenta por la legislación internacional para reducir el carácter contencioso de los litigios, ya que el demandante es liberado de demostrar que se ha actuado con negligencia. Por otra parte, al concentrar la demanda únicamente contra el explotador de la central electronuclear, se evita que otras entidades involucradas tengan que asegurarse frente a esa clase de riesgos. Aunque esto beneficia la concentración de la capacidad aseguradora disponible en el explotador, países como la India se resisten a aceptar este principio porque consideran injusto eximir de toda responsabilidad por un accidente al proveedor de la tecnología (Nutall *et al*, 2017).

caso de Japón ha terminado sucumbiendo al dilema ubicación/seguridad. Siendo uno de los pocos Estados que aplica la «responsabilidad ilimitada» del explotador<sup>56</sup>, sucede que su cobertura de seguros no comprende el riesgo de terremoto y tsunami, aunque las centrales atómicas estén ubicadas en una zona altamente sísmica, ya que los daños económicos podrían superar las capacidades financieras de las aseguradoras. Por tanto, el gobierno japonés tuvo que acudir a sus fondos públicos para tratar de satisfacer las reclamaciones de los damnificados por el triple desastre y, de paso, evitar la quiebra del explotador; o sea, de TEPCO. Esta empresa privada hubiera podido acogerse a la cláusula legislativa que exime de la responsabilidad nuclear solamente si se trata de un «evento catastrófico de carácter excepcional» (OECD, 2012). Esto si el terremoto de Tōhoku ChihōTaiheiyō-oki hubiese sido clasificado como tal<sup>57</sup>.

Una de las grandes dificultades desde el punto de vista político ha sido distinguir a las víctimas reales del *3.11. disaster*, separándolas de los afectados únicamente por el terremoto y tsunami, ya que estos últimos no tienen derecho legal a reclamar ningún tipo de compensación, salvo la mínima dispuesta para catástrofes naturales. Esta problemática se extiende al cuestionamiento de cuáles daños o pérdidas deben ser o no indemnizados, incluyendo el estrés y otras penurias como resultado de las evacuaciones y demás acciones de emergencia relacionadas con la liberación radiactiva (Nutall *et al*, 2017). Esta situación dilemática hizo que Japón se acogiera desde 2014 a la Convención sobre Indemnización Suplementaria por Daños Nucleares, aprovechando que «limita la cantidad de compensación que reciben las víctimas de un accidente nuclear, al igual que limita la responsabilidad en caso de que la lluvia radiactiva traspase fronteras nacionales, como ocurrió en Chernobyl» (Greenpeace, 2015).

¿Pero cómo actuar si de veras un accidente nuclear provoca radiaciones trasfronterizas y los damnificados pertenezcan a países diferentes: de la Unión Europea, pongamos por caso? Aunque los citados convenios internacionales sobre responsabilidad civil previeron desde un inicio la posibilidad de tales escenarios, las lecciones de Chernobyl y Fukushima Daiichi alertan sobre la complejidad que entrañaría un escenario de tamaño envergadura en relación con las consecuencias radiológicas a corto, mediano y largo plazos. Independientemente de la magnitud de actividad emitida, la gravedad del accidente dependerá de cómo sean evaluados los daños y/o pérdidas en cada uno de los países afectados. Teniendo en cuenta que las evacuaciones y los reasentamientos temporal y permanente de poblaciones son las consecuencias radiológicas más importantes, ambas experiencias históricas demuestran que los costos económicos y sociales de dichas acciones protectoras diferirán enormemente en dependencia de cuáles sean los límites de dosis efectiva consensuados políticamente como riesgo tolerable (ver capítulo 3).

---

<sup>56</sup> Además de Japón, la «responsabilidad ilimitada» del explotador es aplicada por Austria, Alemania y Suiza (OIEA, 2006). La legislación nuclear japonesa obliga a los explotadores de centrales nucleares que tengan un seguro privado de unos 129 000 millones de yenes (1600 millones de dólares) por cada instalación (o sea, reactor) para la compensación al público por daños y perjuicios (OECD, 2012; Nutall *et al*, 2017).

<sup>57</sup> Ante la magnitud de las reacciones despertadas en la población japonesa, TEPCO finalmente decidió no buscar la exención.

Si los límites anuales (1 mSv, 5 mSv o 20 mSv) y los límites para toda la vida (70, 350 o 1000 mSv) han sido motivo de disputas irreconciliables hacia el interior de cada país, mucho más complejo sería el escenario político durante los litigios transfronterizos, cuando el monto de las indemnizaciones superaría cualquier capacidad financiera y, sobre la base de los mencionados convenios internacionales, tendría que acudir al erario público. Este solo hecho explicaría la creciente animadversión de los expertos nucleares al modelo lineal sin umbral (LNTM) y su criterio de optimización ALARA para disminuir las dosis efectivas hasta donde sea razonablemente posible (capítulo 3). La propuesta *De minimis*, fijando un mismo valor numérico de dosis efectiva para todos los países afectados por una contaminación radiactiva, se legitimaría como una opción justificada para limitar el pago de las indemnizaciones y el monto de las evacuaciones masivas. Pero ya no se trataría ni siquiera de la gestión y/o gobernanza de un «riesgo tolerable», sino de un «riesgo impuesto» por consideraciones políticas y, a fin de cuentas, económicas. El dilema regulación/promoción de la energética nuclear se expresaría en la renuncia forzosa a la negociación del riesgo aceptable y/o tolerable debido a su no-compensabilidad pecuniaria.

Al cargar impunemente el coste financiero de los accidentes nucleares a la ciudadanía, se cumple la advertencia de Beck sobre la denegación de cobertura de seguros privados como la principal norma operativa para distinguir entre los riesgos calculables (peligros controlables) y riesgos incalculables (peligros no controlables). De imponerse la necesidad de anticipar un subsidio gubernamental para la compensación de las enormes pérdidas que produciría otro desastre similar al de Fukushima Daiichi, resultaría que los costos económicos de la energía nuclear podrían superar con creces a los de otras fuentes de generación eléctrica que compiten entre sí (Laureto y Pearce, 2016). Este factor competitivo sería el verdadero trasfondo de que la INES no reconozca la categoría de «catástrofe» —aunque la legislación nuclear sí lo haga—, limitándose a reconocer el rango de «accidente muy grave». Por eso solamente se hace hincapié en la actividad emitida al medio ambiente, pero se omite toda referencia a dosis colectivas, áreas contaminadas, personas desplazadas, costes económicos u otro indicador que podría caracterizar el impacto sociorradiológico, sacando a relucir su enorme potencial catastrófico más allá de toda duda. A este proceder es lo que Beck denomina «irresponsabilidad organizada» como expresión tácita de la incertidumbre manufacturada.

Todo hace indicar que cuando la INES fue concebida, restringiéndola a siete niveles por actividad emitida, se asumió que no ocurriría otro accidente análogo a Chernobyl, confiándose en el conocido «nunca más» de los ingenieros nucleares. Orientada a satisfacer las expectativas de la opinión pública luego del secretismo imperante durante la Guerra Fría, se esperaba que la INES funcionara como mediación simbólica que facilitaría restablecer la confianza en la energética nuclear y, llegado el momento, retomar su desarrollo como la panacea mundial contra el uso indiscriminado de los combustibles fósiles. Pero ocurrió Fukushima Daiichi y, a partir de ese momento, se ha ganado en conciencia de que los desafíos planteados por los desastres *NaTech* exigen una atención por sí mismos, paralelamente a ese otro gran megapeligro que es el calentamiento global (Beck, 2011).

Aun así, con tal de amainar su responsabilidad social, muchos expertos nucleares insisten en supeditar la relevancia de los fallos tecnológicos por causa común (*blackout*, entre otros) a la ocurrencia del fenómeno natural: si no hubiera habido terremoto y tsunami, no hubiera habido desastre nuclear (Kinsella, 2015; Iguchi, 2019). Pero este argumento deja de ser válido si se le contrapone otro antecedente causal aun más sólido: de no haberse construido centrales atómicas en zonas altamente sísmicas, Japón no tuviera que atenerse a las consecuencias apocalípticas de futuros terremotos que, seguidos por tsunamis, podrían devenir accidentes nucleares como Fukushima Daiichi. La gran aportación teórica de Beck radica en haber fundamentado sociológicamente esta argumentación contrafáctica mediante el concepto de «incertidumbre manufacturada». Sean cisnes negros o reyes dragones, debido a su elevado potencial catastrófico, los desastres nucleares de extremadamente baja probabilidad y altas consecuencias confirman la existencia de un desfase entre la promoción de la energética nuclear y la capacidad societal y/o institucional para garantizar su seguridad mediante mecanismos reguladores. El análisis diacrónico de los grandes accidentes nucleares históricos apunta a que podría cumplirse lo que el sociólogo alemán vaticinó:

En último término, no hay ninguna institución, ni concreta ni, probablemente, tampoco concebible, que esté preparada para el “peor accidente imaginable”, como tampoco existe ningún orden social que pueda garantizar su constitución social y política en este peor caso posible. Sin embargo, existen muchos especialistas en la única posibilidad que queda: negar los peligros. Las medidas paliativas, que garantizan la seguridad incluso frente a los peligros, se sustituye por el dogma de la fiabilidad tecnológica, que quedará refutado por el próximo accidente (Beck, 1999: 83-84).

Aunque esa admonición pudiera restringirse a los desastres nucleares *NaTech*, creyendo que difícilmente pueda existir otro escenario más complejo, la importancia del término beckiano «peor accidente imaginable» es que enfatiza la ausencia de un orden social para enfrentarse a ese caso hipotético. Dado que el sistema tecnocientífico nuclear no puede ofrecer certezas para las decisiones políticas, se hace necesario enjuiciar hasta qué punto será decisiva la problemática de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico en caso de una gran contaminación transfronteriza. Esto es lo que nos ha llevado a plantear la posibilidad de una «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa». Para seguir desarrollando esta idea nos adentraremos finalmente en la obra del también sociólogo alemán Niklas Luhmann.

## 5.2/ La comunicación social del riesgo: su abordaje sistémico-constructivista

Niklas Luhmann abordó inicialmente el tema del riesgo en *Ökologische Kommunikation* [Comunicación ecológica], publicado en 1986, el mismo año de Chernobyl. Sus análisis se profundizaron en *Soziologie des Risikos* (1991) [Sociología del riesgo (1992)] y *Beobachtungen der Moderne* (1992) [Observaciones de la Modernidad (1997)], donde hay referencias críticas a los planteamientos iniciales de Beck, quien los tendría en cuenta para su evolución teórica. Ambos pensadores se preocuparon por cuestiones similares

como el rechazo del amplio público al cálculo racional de los riesgos cuando son acontecimientos extremadamente improbables que pueden ser catastróficos. También coinciden en que el temor manifiesto de la sociedad por su futuro se debe fundamentalmente a la intromisión de la ciencia y la técnica en la naturaleza. Pero hay una diferencia sustancial entre sus enfoques macrosociológicos respectivos, así como una diferencia de matices con respecto al papel de la energética nuclear y otras tecnologías, cuyos efectos secundarios escapan al control de las instituciones convencionales del Estado-nación.

Mientras que Beck apuesta por la reflexividad para afrontar el tránsito hacia la «sociedad del riesgo global», que él mismo describe como tal; por su parte, Luhmann reconceptualiza el significado del *riesgo* dentro de su teoría constructivista de los sistemas sociales (Luhmann, 1984, 1987, 1997)<sup>58</sup>. Esta última debe entenderse en contraposición a la teoría crítica o de la acción comunicativa, de Jünguer Habermas, con quien Luhmann sostuvo una larga polémica a través de los años (Habermas, 1971, 1984, 1990). Atendiendo a que las posiciones de Beck se inclinan más hacia el pensamiento habermiano, esto influyó en los desencuentros teóricos y políticos que tuvieron dichos autores. Al criticar a esos contemporáneos suyos por su racionalidad comprometida con el cambio social, Luhmann ejemplifica precisamente con el libro iniciático de Beck sobre la sociedad del riesgo, endilgándole este irónico comentario: «Después de que los prejuicios y la parcialidad en contra del capitalismo han declinado, la sociología encuentra aquí otra oportunidad de dar contenido nuevo a su antigua función, a saber: alarmar a la sociedad» (Luhmann, 1992: 27). En su momento, Beck responderá a este señalamiento, achacándolo a que «Luhmann representa, por lo que se refiere a la decisión social y política del riesgo, un punto de vista agnóstico» (Beck, [2007] 2008: 199).

¿*Qué ha hecho cambiar a la sociedad postmoderna con respecto al pasado: la realidad de los nuevos riesgos o la construcción social de los mismos?* Esta cuestión primordial nos posibilitará analizar las divergencias ontológicas y epistemológicas entre Ulrich Beck y Niklas Luhmann. Hemos visto que el enfoque beckiano llama a sobreponerse a la antinomia entre realismo y constructivismo social, pero se mantiene siendo realista en el fondo cuando se decanta por la realidad de los riesgos incalculables. Sería por causa de los nuevos megapeligros, como la energética nuclear y el cambio climático, que la sociedad postindustrial pudiera encontrarse abocada a la destrucción total del género humano. La esperanza de sobrevivir a esa transformación —o *metamorfosis*, como Beck terminó definiéndola—, sería la emergencia de un «catastrofismo emancipatorio». Este vendría siendo la apoteosis de su exhortación teórica a implementar una *realpolitik* cosmopolita (ver subcapítulo 5.1).

---

<sup>58</sup>Luhmann se propuso el análisis de la sociedad en tres planos: la teoría general de sistemas —y dentro de ella la teoría de los sistemas autopoieticos—; la teoría de los sistemas sociales, y la teoría de la sociedad como caso particular de la teoría de los sistemas sociales (Luhmann, 1997). Finalmente logró una *teoría general de la sociedad* que se basa en cinco teorías: la de sistemas, la de comunicación, la de evolución, la de diferenciación de la sociedad, y la de autodescripción de la sociedad. Nuestro enfoque se apoya fundamentalmente en la interpretación de la obra luhmanniana por Javier Torres Nafarrate (México), Darío Rodríguez Masilla y Marcelo Arnold (Chile), quienes fueron alumnos de Luhmann en la Universidad de Bielefeld y han contribuido decisivamente a la traducción de sus libros y su promoción en habla hispana.



Por su parte, durante casi treinta años hasta su muerte en 1998, Luhmann se resistió a conjeturar una posible solución para el futuro del mundo, considerándolo altamente incierto desde su atalaya metateórica. Aunque sus formulaciones resultan tremendamente polémicas por abstractas, autorreferenciales y autológicas —en el sentido de que el teórico se aplica a sí mismo sus propias categorías de análisis—, resultan muy valiosas porque ayudan a fundamentar la problemática del riesgo y la incertidumbre como fenómeno comunicativo a nivel social. Nociones como «desastre informativo», o más concretamente: «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa», a cuya posibilidad nos hemos referido anteriormente, pueden argumentarse con ayuda de las aportaciones luhmannianas. Aquí desglosaremos aquellas que consideramos indispensables para comprender su epistemología sistémico-constructivista y, desde esta perspectiva ahora, seguir fundamentando nuestra hipótesis sobre el carácter único del riesgo nuclear y radiológico. Si de acuerdo con Ulrich Beck, podemos afirmar que Chernobyl inició el tránsito hacia la «sociedad del riesgo global» como una primera consecuencia inesperada de la modernidad (hasta ese momento los reactores electronucleares no habían explotado); a partir de Fukushima Daiichi se confirma que el dilema regulación/promoción de la energética nuclear debe verse de alguna manera «acoplado estructuralmente» a la *diferenciación funcional* de la sociedad moderna que preconiza Luhmann.

### 5.2.1 Bosquejo de la teoría constructivista de los sistemas sociales

Alumno del sociólogo estadounidense Talcott Parsons, de quien heredó el interés por los temas y preguntas universales, Luhmann se desmarcó de la teoría de acción y del estructural-funcionalismo parsonianos para consagrarse a la elaboración de su propia teoría general de la sociedad como culmen de su teoría constructivista de los sistemas sociales. Con ese metaobjetivo se propuso derribar las barreras epistemológicas que —a su juicio— impedían obtener una explicación coherente sobre la creciente complejidad de la sociedad moderna, la cual se le hacía inescrutable con las categorías de la tradición sociológica humanista; en primer lugar, del marxismo (Torres Nafarrate y Zermeño Padilla, 1992; Rodríguez Mansilla y Arnold, 1991). Con apoyo de interrogantes para facilitar su comprensión, estos serían para Luhmann los cuatro obstáculos epistemológicos transversales a la praxis sociológica (Luhmann, 2006):

1) Suponer que la sociedad está constituida por seres humanos concretos y por sus relaciones entre ellos (*prejuicio humanista*). ¿Acaso puede verse a la sociedad como la suma de todas las personas? ¿Cambiaría algo si una persona nace o muere?

2) Suponer que la sociedad puede lograr el consenso de todos los seres humanos, gracias a la concordancia de sus opiniones y complementariedad de sus objetivos. Si esto fuera así, ¿qué sucedería después del consenso, cuando no haya conflictos ni contradicciones?

3) Suponer que las sociedades siguen siendo básicamente unidades regionales o territorialmente delimitadas por el Estado-nación (*nacionalismo metodológico*). ¿Cómo entender entonces a la pujante sociedad global?

4) A partir de los tres supuestos anteriores, si bien no queda aclarado el concepto de «sociedad» como objeto de estudio, aun así pretender que la sociedad y los seres humanos pue-

den observarse desde el exterior (*prejuicio de la distinción entre objeto y sujeto*). ¿Acaso puede el ser humano observar a la sociedad sin tener que observarse a sí mismo?

Para tratar de superar esos obstáculos epistemológicos que se relacionan y sostienen recíprocamente, Luhmann se apertrechó de múltiples saberes provenientes de varias disciplinas no sociológicas, teniendo como basamento a la teoría general de sistemas, cuya primera formulación es atribuida al biólogo Ludwig von Bertalanffy (1968). La evolución del pensamiento luhmanniano suele dividirse en tres etapas (Pignuoli-Ocampo, 2015), aunque estas se solapan entre sí:

—la primera (desde 1964 hasta años antes de 1984) se caracteriza por su apego a la teoría sistémica de la acción (Parsons) y la teoría funcional cibernética de sistemas (W. Ross Ashby y N. Wiener, entre otros);

—la segunda (desde años antes de 1984 hasta 1990), por la asunción de la teoría matemática de la comunicación (Claude Shannon y Warren Weaver) y de la teoría de sistemas autorreferenciales autopoiéticos (Humberto Maturana). El paso entre la primera y la segunda etapas estaría marcado por la publicación del libro *Soziale Systeme. Grundrisse einer Allgemeinen Theorie* (1984) [*Sistemas sociales. Lineamientos para una teoría general*];

—la tercera (1990-1997) se caracteriza por seguir profundizando en el vínculo epistemológico y metodológico con los nuevos desarrollos que se producían en la teoría general de sistemas: la lógica formal de George Spencer Brown y la cibernética de segundo orden (*observing systems*) de Heinz von Foerster. Junto a esas fuentes teóricas, el propio Luhmann mantiene su adhesión a la teoría de la evolución (Charles Darwin) y a la fenomenología de Edmund Husserl, cuyo metaconcepto de *sentido* reinterpreta<sup>59</sup>.

Sobre la base de ese entramado transdisciplinario, mediante un enorme ejercicio de metaconceptuación, la epistemología luhmanniana se distingue por la creación o reformulación de categorías tales como: sistema/entorno, operación/observación, autorreferencia/heterorreferencia, reducción de complejidad, doble contingencia, *autopoiesis*, clausura operativa, acoplamiento estructural, interpenetración, diferenciación funcional... Cada una de esas nociones claves puede definirse solamente con referencia a las demás, por lo que para dominar una de ellas es necesario conocerlas a todas, «las cuales a su vez requieren el conocimiento de la partida, en un carrusel infinito de referencias» (Corsi *et al*, 1996: 15). Esta autorreferencialidad conceptual es una de las grandes dificultades para justipreciar los aportes teóricos de Luhmann al entendimiento del riesgo como categoría social. Debemos sobrepasar esta barrera, si queremos confrontar la singularidad del enfoque luhmanniano con respecto a otros enfoques constructivistas, como el antropológico cultural de Mary Douglas, por ejemplo.

---

<sup>59</sup>El *sentido* es el filosofema de la teoría sociológica luhmanniana y, según él mismo explica, se lo debe a Husserl y su metafísica subjetiva trascendental. Sin embargo, se ha criticado a Luhmann por haberse alejado demasiado del clásico original, forzando esa categoría fenomenológica para adecuarla a sus intereses teóricos-sistémicos y funcionalistas empíricos (Habermas, 1984; Lewkow, 2012). Mientras que Husserl concibe el *sentido* a partir de la conciencia en dirección a una teoría del sujeto trascendental, Luhmann aprovecha el *sentido* para fundamentar la clausura operacional de los sistemas (psíquico y social), como se verá más adelante. En cualquier caso, todo enjuiciamiento crítico de Luhmann debe partir de su renuncia premeditada al *sujeto* y, por ende, a las nociones de *subjetividad* e *intersubjetividad*. Por demás, él siempre reconoció que su reinterpretación del *sentido* «tiene la función de unir la tradición hermenéutica del acto y comprender de la sociología, con la conceptualización sistémico-teórica» (Torres Nafarrate y Zermeño Padilla, 1992).

### *Postontología y constructivismo operacional*

Lo primero es tener inmediatamente en cuenta la renuncia de Luhmann a toda referencia ontológica (verdad, objetividad, sujeto...), si bien evoca fenómenos de carácter suprasubjetivo; es decir, que preceden o trascienden al ser humano. La postontología luhmanniana se expresa como rechazo total a la tradicional relación *sujeto/objeto* que supone la capacidad de los observadores para acceder a un mundo real y objetivo mediante el proceso del conocimiento (epistemología del objeto observado)<sup>60</sup>. En su lugar, el sociólogo alemán se adscribe al constructivismo radical que preconiza el conocimiento como una función del observador —y no de lo que es observado—, siguiendo las directrices de Von Foerster para la cibernética de segundo orden. La radicalidad de esta postura sistémico-constructivista (epistemología de los sistemas observadores) es resumida por este físico y cibernético austríaco con el siguiente apotegma: «La objetividad es la ilusión de que las observaciones pueden hacerse sin un observador» (Foerster, citado en Watzlawick y Krieg, 1995: 20).

En sintonía con Von Foerster y otros constructivistas radicales<sup>61</sup>, Luhmann considera que todo proceso cognitivo es una construcción de la realidad por las observaciones de primer y de segundo orden (observación de la observación). Por *observación* no se refiere a la visibilidad humana o la amplitud de miras de un sujeto trascendental, sino a observar «distinciones» según la lógica formal de Spencer Brown (ver supacápite 5.2.2). La primera de ellas es que, siendo el mundo una infinitud inobservable e irrebasable, se precisa distinguir entre *sistema* y *entorno*. Según esta distinción, todo sistema es correlativo a un entorno más complejo del que se diferencia precisamente cuando aquel —o sea, el sistema— distingue sus propios límites como reductor de la tal complejidad. Existen disímiles clases de sistemas y, según sea su función, así será el entorno considerado. A la distinción *sistema/entorno* se supeditan otras distinciones: operación/observación, elemento/relación, autorreferencia/heterorreferencia, identidad/diferencia... como urdimbre conceptual del enfoque sistémico-constructivista.

A partir de estas distinciones luhmannianas, la dicotomía epistemológica *sujeto/objeto* queda totalmente descalificada: el sujeto es reemplazado por el observador, y el objeto por las operaciones que produce el sistema para diferenciarse del entorno. Sin embargo, aunque el observador sea el único que pueda distinguir a los sistemas como tales, esto no quiere decir que tenga la libertad para designar cualquier cosa como un sistema. Si bien no son entidades fijas y objetivas en el espacio y en el tiempo, los sistemas existen realmente cuando se vuelven tales por sus propias operaciones. Por eso Luhmann prefiere denominar su constructivismo epistémico como «constructivismo operativo» o «constructivismo sistémico-operativo», en lugar de constructivismo radical, ya que su novedad consiste en la observación de esas operaciones constitutivas de sistemas en la realidad (Luhmann, 1984, 1991).

---

<sup>60</sup>Además de la renuncia a la tradicional relación *sujeto/objeto*, Luhmann también renuncia a la *acción* como la base de todo fenómeno social, sustituyéndola por la *comunicación*. Esta es su principal ruptura con respecto a Talcott Parsons y la sociología en general.

<sup>61</sup>Entre otros autores afines a Luhmann que profesan el constructivismo epistémico se encuentran el antropólogo Gregory Bateson, los psicólogos Ernst von Glasersfeld, Jean Piaget y Paul Watzlawick, así como el biólogo Humberto Maturana.

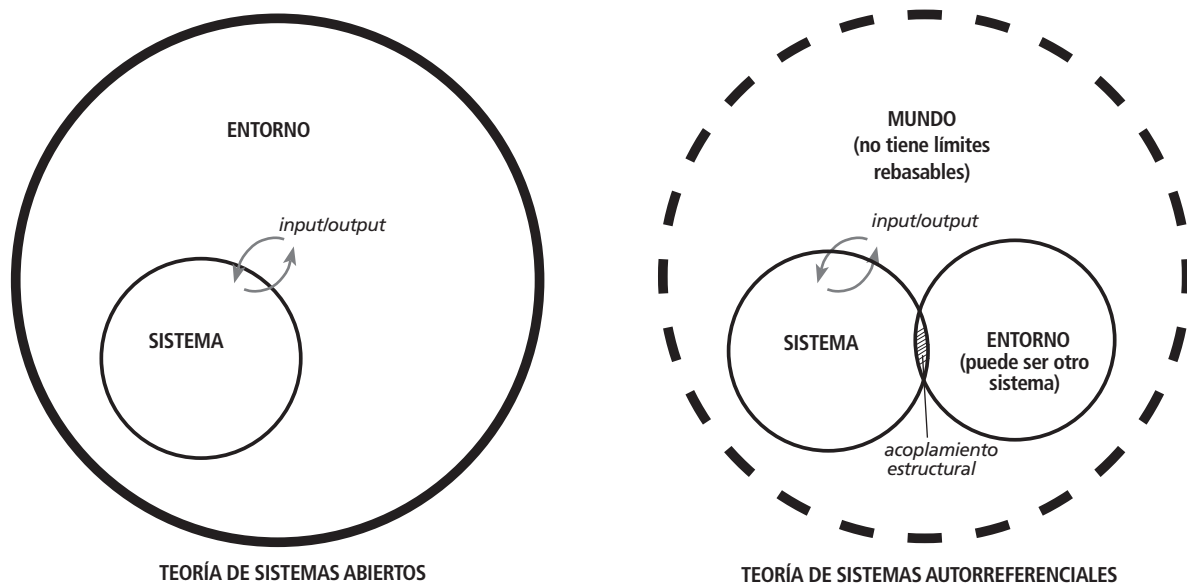


Figura 16: Distinciones *sistema/entorno* en teoría general de sistemas. Fuente: elaboración propia

### *De la complejidad biológica a la complejidad social*

La teoría constructivista de los sistemas sociales de Luhmann se inscribe en el paradigma de la complejidad, que es aplicable tanto a las ciencias naturales como a las ciencias humanas y sociales. Uno de sus grandes motivos es la «reducción de la complejidad», no como el paso de lo complejo a lo simple, sino como la producción de una diferencia de complejidades: «La presentación de la teoría, por lo tanto, aplica a sí misma lo que aconseja: reducción de complejidad. Pero complejidad reducida no significa complejidad excluida, sino complejidad elevada» (Luhmann, 1998 [1984]: 6). De hecho, la distinción *sistema/entorno* consiste en un gradiente de complejidades, ya que la mayor complejidad del entorno es la condición necesaria para la emergencia de los sistemas reductores de la tal complejidad, como se ha explicado antes. Esto responde a la ley de la «variedad requerida» (*law requisite variety*) de Ashby, entre otras aportaciones cibernéticas que modificaron los planteamientos iniciales de la teoría general de sistemas (Rodríguez y Arnold, 1991).

A partir de esas renovaciones conceptuales, ya no se trata del clásico postulado sistémico del todo y las partes, ni de los sistemas abiertos que logran equilibrio y/o estabilidad mediante el constante intercambio de energía, materia e información con el entorno según el esquema *input/output*, como estipulaba Bertalanffy (1956)<sup>62</sup>. La epistemología luhmanniana aprovecha el nuevo paradigma sobre la existencia de sistemas autorreferenciales que son capaces de producir y reproducir por sí mismos sus propias estructuras, operaciones y elementos. Mientras

<sup>62</sup>Aprovechamos para señalar que el filósofo Evandro Agazzi adopta el enfoque sistémico de esquema *input/output* cuando aborda el tema de la *neutralidad* en su obra *El bien, el mal y la ciencia. Las dimensiones éticas de la empresa científico-tecnológica* (1996), a la que hicimos referencia en la introducción de esta tesis doctoral. Su idea es que el sistema científico (SC) es un *sistema social adaptativo abierto* que está inserto en el medio ambiente intrasocial junto a otros sistemas sociales y no sociales, pero a la vez formando parte de un medio ambiente extrasocial o internacional de características análogas. La unión de estos dos tipos de ambiente (intrasocial y extrasocial) conformarían el medio ambiente global.

los sistemas abiertos (o cerrados) son concebidos como inmersos en un entorno homogéneo y no diferenciado, los sistemas autorreferenciales se constituyen ellos mismos cuando establecen sus propios límites de diferenciación con respecto a un entorno — otro sistema, por ejemplo— en el mundo circundante como horizonte abierto (ver figura 16).

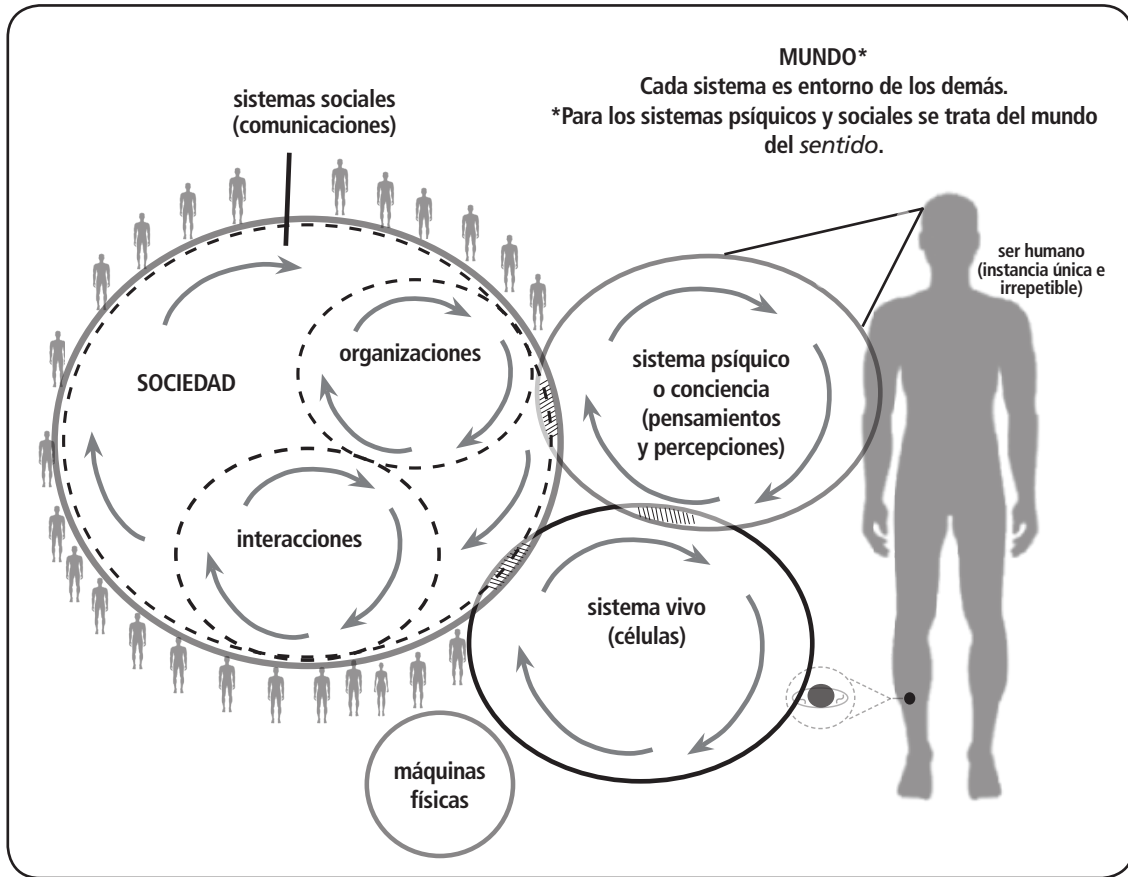
Si la complejidad del entorno supera los niveles establecidos por el sistema autorreferencial, este último pudiera modificar hasta su propia estructura y operaciones gracias a su capacidad de selección para actualizar las relaciones de los elementos intrasistémicos entre sí. A esto es lo que se denomina «reducción de complejidad» [del entorno], mediante un incremento o variación de la propia complejidad interna del sistema, que incluso puede realizar cambios en su diferenciación con respecto al entorno; o sea, en la conservación de los límites entre uno y otro (*boundary maintenance*). Siempre a partir de la distinción sistema/entorno, esta conexión entre *complejidad* y *diferenciación* es el meollo de la elucubración luhmaniana sobre los sistemas sociales con base en la teoría de los sistemas autorreferenciales: «La clásica distinción entre sistemas “cerrados” y sistemas “abiertos” es sustituida por la cuestión de cómo la clausura autorreferencial puede producir apertura» (Luhmann, 1998: 33).

Esta problemática de la autorreferencialidad remite a una teoría de la biología empírica, según la cual los organismos vivos se autoclausuraron con respecto al entorno mediante la transformación de sus estructuras a lo largo de generaciones. A ello se refiere por primera vez el biólogo chileno Humberto Maturana en su libro *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo* (1973), escrito en coautoría con Francisco Varela. Este metaconcepto es un neologismo que significa «autocreación» en griego: *αυτο* (sí mismo) + *ποιησις* (producir o crear). Como resultado de la *autopoiesis* podría entenderse el origen de las células hace miles de millones de años a partir de las moléculas químicas. Esto se habría producido gracias a la generación de membranas suficientemente estables —y, a la vez, dúctiles— que propiciaron la formación de proteínas mediante el intercambio iónico con el mundo abiótico. Al volverse ya orgánicas, esas moléculas especificaron sus límites y se reprodujeron a sí mismas de manera radicalmente circular mediante sus propias redes de reacciones. Así surgió la vida como un nuevo tipo de organización o *sistema autopoietico*, puesto que «se levanta por sus propios cordones y se constituye como distinto del medio circundante a través de su propia dinámica, de tal manera que ambas cosas son inseparables» (Maturana y Varela, 1984: 28).

Los sistemas autorreferenciales clausurados operativamente (autopoieticos) suscitaron un interés profundo para la teoría general de sistemas en múltiples campos del conocimiento. Así como el origen del sistema vivo (células, organismos, cerebro) pudo deberse al proceso de clausura operativa de ciertas proteínas y otros elementos biológicos con respecto al ambiente, el metaconcepto de *autopoiesis* podía generalizarse a todos los sistemas complejos sin exclusión: el sistema nervioso, el lenguaje, la conciencia, la comunicación, la sociedad... (Rodríguez Mansilla y Torres Nafarrate, 2003). Esto es lo que hizo Luhmann: redimensionar esa categoría explicativa de la complejidad biológica para fundamentar la complejidad social desde la interacción individual, pasando por las organizaciones, hasta la sociedad en

**DISTINCIÓN SISTEMA/ENTORNO**

Punto de partida de la epistemología sistémico-constructivista de Niklas Luhmann, esta distinción significa que todo sistema es correlativo a un entorno más complejo del que se diferencia precisamente cuando aquel —o sea, el sistema— distingue sus propios límites como reductor de la tal complejidad. La teoría de los sistemas sociales no concibe los tipos de sistemas como entidades fijas y objetivas en espacio y tiempo, aunque sean reales, sino como operaciones distinguibles por la observación: el sistema vivo se autorreproduce celularmente; el sistema psíquico (conciencia), por los pensamientos y percepciones, y los sistemas sociales, por las comunicaciones.



**OPERACIONES REPRODUCTORAS**

Los sistemas de *sentido* constan de elementos que constituyen unidades mínimas sin duración y que se relacionan unas con otras mediante las operaciones reproductoras: pensamientos y percepciones (sistema psíquico) y comunicaciones (sistema social).

**ACOPLAMIENTO ESTRUCTURAL**

El sistema psíquico y el sistema social son entornos el uno para el otro. Solamente se interpenetran mediante el *medium* del lenguaje cuando son perturbados por un mismo evento.

**AUTORREFERENCIA**

Cada tipo de elemento corresponde a un tipo de sistema y su operación reproductora: las comunicaciones solamente pueden relacionarse con otras comunicaciones (sistema social), y los pensamientos con otros pensamientos (sistema psíquico). Esto implica una circularidad cerrada de las operaciones (autorreferencia) que introduce la distinción sistema/entorno al interior del sistema.

**MODELO SINTÉTICO DE COMUNICACIÓN**

**MUNDO\***

**SISTEMA SOCIAL**  
(su elemento básico es la triple selección como unidad sintética de comunicación)

**ENTORNO**  
(otros sistemas sociales)

4) Aceptación o rechazo de la propuesta de Alter. De aceptar, Ego se convierte en Alter, manteniéndose la comunicación.

1) selección de información, y  
2) dar-a-conocer (Mitteilung)

3) comprensión (Verstehen)

ALTER

EGO

conciencia

conciencia

interpenetración

acoplamiento estructural

(no hay comunicación entre conciencias)

El núcleo central de la teoría constructivista de Luhmann es el «modelo sintético de la comunicación», así conocido porque postula que el elemento basal de la operación comunicacional es una unidad sintética de tres selecciones en un solo acto (*unit-act*), seguida de una cuarta selección como acto de enlace para seguir garantizando la comunicación. Basándose en la aporía de la *doble contingencia*, Luhmann fundamenta así el carácter mutualista y/o dialógico de la comunicación: tanto *ego* como *alter* observan las selecciones del otro como impredecibles. Por ese motivo, el suceso comunicacional no se cierra hasta que *ego* comprende la distinción entre información y dar-a-conocer de *alter*. De aceptar la oferta comunicativa, mediante un cuarto enlace, *ego* se convierte en *alter* y se repite la operación autopoiética de manera circular. Esta emergencia de la comunicación explicaría la autogénesis de *lo social*.

general. Junto a la «codificación indeferenciada»<sup>63</sup> y la observación de segundo orden, la *autopoiesis* es uno de los principios fundamentales del constructivismo luhmanniano y, sin dudas, su apropiación conceptual más controversial. De hecho, fue cuestionada por el propio Maturana, el creador de ese metaconcepto aplicable a la creación de la vida (Rodríguez Mansilla y Torres Nafarrate, 2003; Ávila, 2015). En todo caso, debe asumirse que el «giro autopoietico» facilitó a Luhmann consolidar el «giro comunicativo» para postular la *autorreferencia de la comunicación* como el núcleo central de su teoría sistémico-constructivista.

*Sistemas sociales autorreferenciales clausurados operativamente (autopoieticos)*

Luhmann postula en su libro *Soziale Systeme. Grundrisse einer Allgemeinen Theorie* (1984) [*Sistemas sociales. Lineamientos para una teoría general*] que, aparte de las máquinas físicas, el mundo se compone de los siguientes tipos de sistemas: sistema vivo (u orgánico), sistema psíquico (o de conciencia) y sistema social. Este último se manifiesta en tres formas: el sistema societal (o sea, la sociedad), los sistemas organizacionales y los sistemas interaccionales. Contrariamente a la tradición humanista, que sitúa al hombre en su totalidad (ser vivo + conciencia) como elemento único e indivisible de la sociedad, la teoría luhmanniana lo recoloca como sistema psíquico y sistema vivo en el entorno de los sistemas sociales; o sea, Luhmann establece un «triadismo sistémico» (ver infografía 17). Para el sociólogo alemán se trata de un cambio de paradigma que no desvaloriza la importancia del ser humano en la sociedad, sino que reconoce aun más su complejidad al integrarlo en la infinitud del mundo: «En esta teoría, el hombre no se pierde como entorno del sistema, solo cambia la posición jerárquica de la que gozaba en la antigua teoría europea de la sociedad civil» (Luhmann, 1998: 11)<sup>64</sup>.

Para fundamentar este presupuesto suprasubjetivo y/o postontológico, Luhmann preconiza que los sistemas psíquicos y los sistemas sociales surgieron al unísono y, como tales, coevolucionaron constituyendo el mundo del *sentido*: «(...) los sistemas sociales y los psíquicos se caracterizan porque operan en el medio del *sentido*, en cambio los organismos y las máquinas no» (Luhmann, 1998: 29). De ahí que estos dos tipos de sistemas (psíquico y social) sean entornos imprescindibles el uno para el otro, cuando ambos establecen sus propios límites de *sentido*. En clave husserliana, Luhmann define como *sentido* la «diferencia fundamental entre actualidad y horizonte de posibilidades» (Luhmann, 1998: 82). Procesar *sentido* significa, entonces, que el sistema opera posibilidades actualizadas como acción o vivencia, a la par que remite simultáneamente a posibilidades potenciales que no han sido seleccionadas (Corsi *et al*, 1996). Cuando pensamos, percibimos o comunicamos sobre la realidad inaccesible («todo eso que está ahí afuera»), desencadenamos tales operaciones mediante distinciones de *sentido* que se imprimen como formas sobre el *medium* del lenguaje:

<sup>63</sup>El «principio de codificación indeferenciada» es una de las aportaciones cibernéticas de Von Foerster a la neurofisiología. Se refiere a que las células cerebrales únicamente codifican la intensidad y no la propiedad física de los estímulos perceptivos: vista, oído, tacto... Solo mediante el procesamiento neurofisiológico de dichos estímulos se diferencia lo visto de lo oído o de lo tocado. Desde el punto de vista constructivista, esto confirmaría que las teorías realistas del conocimiento yerran cuando presuponen el acceso expedito al mundo óptico o realidad objetiva (Watzlawick y Krieg, 1995: 20).

<sup>64</sup>Por esta y otras disidencias, Luhmann ha sido tildado de profesar una metabiología (Habermas, 1989; García Sánchez, 1999), un neoplatonismo y, a fin de cuentas, un antihumanismo teórico (Miranda Rebeco, 2012).

«(...) la peculiaridad del médium del sentido es un correlato necesario de la clausura operativa de los sistemas con capacidad de distinguir [o sea, el sistema psíquico y el sistema social]. El sentido se produce exclusivamente como sentido de las operaciones que lo utilizan; se produce por tanto solo en el momento en que las operaciones lo determinan, ni antes ni después. El sentido es entonces un producto de las operaciones que lo usan y no una cualidad del mundo debida a una creación, fundación u origen» (Luhmann, 2006 [1997]: 28)<sup>65</sup>.

Con base al filosofema del *sentido* en sus tres dimensiones (objetual, temporal y social), Luhmann se atreve a sostener que tanto los sistemas psíquicos como los sistemas sociales también cumplen con los mismos fundamentos de la *autopoiesis* que los seres vivos: autonomía, emergencia, clausura operativa, autoestructuración, autorreproducción... Mientras que los organismos se reproducen mediante las células; los sistemas psíquicos se reproducen gracias a las operaciones de la conciencia: los pensamientos y percepciones que se encadenan incesantemente con base a otros pensamientos y percepciones<sup>66</sup>. Para los sistemas sociales, esa operación reproductora son las comunicaciones que resultan de comunicaciones precedentes y que suscitan a su vez comunicaciones ulteriores. Que sea la *comunicación* se explica porque presupone siempre el contacto de dos sistemas psíquicos como mínimo; o sea, es «la única operación genuinamente social» (Luhmann, 2006: 57). No es el caso de la *acción*, que puede ser individual y no necesariamente colectiva, además de que puede ser producida por otro tipo de sistema como las máquinas físicas. Ni tampoco el lenguaje, porque este es también empleado por el sistema psíquico (Pignuoli Ocampo, 2013a, 2013b).

Así diferenciados en términos operacionales, los tipos de sistemas (vivo, psíquico y social) son entornos unos de otros. Pero no mantienen una relación causal directa según el tradicional esquema *input/output* de energía, materia e información. Al estar clausurados autorreferencialmente por sus propias operaciones, los sistemas autopoieticos solamente procesan como información aquellos problemas, ruidos y perturbaciones del entorno (complejidad del mundo o *heterorreferencia*) que pudieran reducir mediante sus propias estructuras intrasistémicas a modo de «autoirritaciones» (complejidad propia o *autorreferencia*). Si una instancia externa usurpara las operaciones reproductoras de los elementos intrasistémicos, esto significaría la desaparición del sistema como tal. Para un sistema vivo sobreviene la muerte cuando el organismo ya no resulta capaz de reproducir sus células a partir de sus propias células. Un sistema social que no genere comunicaciones estaría destinado también a desaparecer, aunque las conciencias continúen

---

<sup>65</sup>Las palabras (formas) se imprimen como unidades de sentido sobre el lenguaje (*medium*), así como el habla (forma) se imprime sobre el sonido (*medium*). Es así que «determinado sentido siempre va enlazado a determinados sonidos o fonemas; y, al revés, determinados sonidos o fonemas, a un determinado sentido» (Schützeichel, 2015). La distinción *forma/medium* de Luhmann se basa en la idea del psicólogo Fritz Heider para explicar la percepción de objetos en contacto no inmediato con el cuerpo. Así, el aire y la luz (*medium*) transportan sin alterar las características del objeto percibido (*forma*).

<sup>66</sup>La distinción entre pensamientos y percepciones es problemática para Luhmann. Este se emplea a fondo para tratar de explicarla en *El arte de la sociedad* (1995) con tal de fundamentar que la obra artística es comunicación. Esto lo lleva a afirmar que «la obtención primaria de la conciencia consiste en procesar percepciones del mundo real y regirlas por medio del pensamiento» (Luhmann, 2005 [1995]: 32). Quiere decir: el sistema psíquico o de conciencia reproduce los pensamientos y estos incluyen las percepciones «concientizadas», incluida la percepción sensorial del propio cuerpo.



pensando contenidos relativos a comunicaciones pasadas. Al no ser comunicados, esos contenidos no serían información para los demás.

Ese tipo de cierre/clausura operativo no debe entenderse como aislamiento, ya que los sistemas autopoieticos (el sistema vivo, en primer lugar) siguen dependiendo material y energéticamente del entorno. En términos de información, se trata de otra forma de autocontacto según la cual ambos —sistema y entorno— se estimulan de manera mutua, aunque sin intercambio causal directo. A esta forma se le denomina *acoplamiento estructural*, que resulta *interpenetración* cuando se trata de sistemas que no pueden existir el uno sin el otro. El sistema psíquico está acoplado estructuralmente al sistema viviente, interpenetrándose ambos, ya que la conciencia solo puede existir si funcionan el cerebro y los procesos neurofisiológicos. Como ya vimos, los sistemas de sentido (psíquico y sociales) se interpenetran porque coevolucionaron juntos: sin pensamientos y percepciones sería imposible el proceso de comunicación. Aunque sea muy abstracto, «lo decisivo es que los límites de un sistema pueden ser adoptados en el campo de operación del otro» (Luhmann, 1984: 205). Pero no se trata de círculos que se entrecruzan, puesto que son límites de *sentido*; o sea, no son límites fijos, ni físicos ni espaciales. De ahí que nuestra representación gráfica del abstraccionismo luhmanniano deba tomarse solo con fines ilustrativos (o sea, tanto la figura 15 como la infografía 17).

Una consecuencia fundamental de esta aplicación sociológica de la *autopoiesis* es que cesa el primado ontológico de la conciencia como el único sistema autorreferencial. Siendo operaciones reproductoras de *sentido*, al procesar información y producir significado, las comunicaciones solamente se relacionan con otras comunicaciones, y los pensamientos con otros pensamientos. Tampoco ninguna de esas operaciones puede sustituir a la otra, aunque parezca que pudieran hacerlo debido a que las comunicaciones pueden expresar coloquialmente nuestros pensamientos, e igualmente la conciencia está lingüísticamente estructurada, ya que también pensamos en términos de palabras y oraciones<sup>67</sup>. Mediante una relación de trastorno recíproco, el sistema social (comunicaciones) y el sistema psíquico (conciencia) se interpenetran mediante el lenguaje como *medium* únicamente cuando se perturban o irritan al compartir un mismo evento como información. La incomunicabilidad entre conciencias es presupuesto y, a la vez, resultado de la comunicación: «Solamente una conciencia puede pensar (pero no puede pensar con pensamiento propio dentro de otra conciencia) y solamente la sociedad puede comunicar» (Luhmann y De Georgi, 1993: 52-53).

En resumen: aunque presuponga la existencia de los seres humanos y sus conciencias, Luhmann desarrolla una sociología integralmente fundamentada en la comunicación, sobre la base de que posee propiedades socio-operativas que no las tienen los requisitos físicos y biológicos, ni los constituyentes psíquicos (Pignuoli Ocampo y Zitello, 2011). Los sistemas sociales son sistemas autorreferenciales clausurados operativamente (autopoieticos) en

---

<sup>67</sup>Esta problemática de la autonomía estructural y operativa del sistema psíquico con respecto al sistema social plantea arduas interrogantes, ya que Luhmann no llegó a esclarecer suficientemente cuál sería la operación propia del sistema psíquico o de conciencia (ver nota al pie 59). Así, el problema de la dependencia informacional de la comunicación respecto de la conciencia es motivo de debate entre los estudiosos luhmannianos (Gabriel Calise, 2013; Pignuoli Ocampo 2011, 2013).

la *operación comunicacional*. Al contenerse a sí misma y a las demás formas de sistema social (organizacionales e interaccionales), la sociedad se revela como el horizonte de todos los procesos de comunicación posibles: «Comunicación y no otra cosa es la operación con la que la sociedad como sistema social se produce y reproduce autopoiéticamente» (Luhmann, 1992: 23). O dicho más explícitamente: «La sociedad no se compone de seres humanos, se compone de comunicaciones entre hombres» (Luhmann, 1998: 41).

### *Modelo sintético de comunicación*

A partir de su socialización de la *autopoiesis*, Luhmann aprovechó para fundamentar por qué la comunicación constituye —como ya se ha explicado arriba— el elemento basal y la operación específica de los sistemas sociales. Para ello se nutrió de la teoría clásica de la información (Donald MacKay y Gordon Pask) y de la pragmática interpersonal de la Escuela de Palo Alto (Gregory Bateson y Paul Watzlawick), entre otras fuentes no sociológicas que le permitieron desarrollar su propio modelo de comunicación. Un referente insoslayable es, por supuesto, el modelo informacional de Shannon y Weaver, cuyos acentos telecomunicativos fueron aprovechados por Luhmann para sustituirlos por acentos sociológicos (Pignuoli-Ocampo, 2013a). También tuvo en cuenta el modelo-*órganon* de Karl Bühler sobre la triple función del lenguaje humano como signo hablado, así como la teoría del acto del habla desarrollada por John L. Austin (Schützeichel, 2015).

Pero la teoría luhmanniana trasciende a dichas referencias, ya que su propósito es entronizar la comunicación como operación propia y única de los sistemas sociales. Premeditadamente, Luhmann rompe con todos esos enfoques lingüísticos, semióticos y comunicológicos para preguntarse: «¿Cómo se logra la comunicación como *procesamiento de información*?» (Luhmann, 1998: 157). Su problema de investigación es la improbabilidad de la comunicación y cómo —aun así— cumple la función de reducir la complejidad societal; o sea, de mantener el orden social. Con este metaobjetivo concibe su «modelo sintético de comunicación». Le llama «sintético» porque postula que el elemento basal de la operación comunicacional es una unidad sintética de tres selecciones en un solo acto (*unit-act*), seguida de una cuarta selección como acto de enlace para seguir garantizando la comunicación (ver infografía 17):

- 1) selección de la información;
- 2) *Mitteilung*, traducido indistintamente como: dar-a-conocer, acto de comunicar, conducta de notificación o «hacer en el mundo»<sup>68</sup>;
- 3) *Verstehen*: el-entenderla, acto de comprender o «actuar la comprensión». Esta tercera selección cumple la función de distinguir a las dos anteriores: información y dar-a-conocer.
- 4) Una cuarta selección, pero ya fuera de esa tripleta selectiva, que decide la aceptación o rechazo de la oferta comunicativa después de haber sido comprendida.

---

<sup>68</sup>Finalmente nos decantamos por «dar-a-conocer» —en lugar de «acto de comunicar»—, ya que así lo decide Javier Torres Nafarrate, discípulo de Luhmann y principal traductor de su obra a habla hispana, en la introducción a *La sociedad de la sociedad* (Luhmann, [1997] 2006). Mantenemos «acto de comprender» porque no se presta a confusión.

Por «información» se entiende una eventualidad «que cambia el estado del sistema que la procesa, en el sentido del famoso dicho de Bateson: *a difference that makes a difference* [una diferencia que hace una diferencia]» (Luhmann, 2006: 61)<sup>69</sup>. De esta manera, profesando su constructivismo radical, Luhmann descalifica las posturas epistemológicas que presuponen la «transmisión» de información como entidad objetiva, permanente y transferible desde un ser humano a otro; desde un emisor a un receptor. Todo lo contrario: la información se construye como selección específica durante el proceso comunicacional cuando adquiere significado de novedad, sorpresa o diferencia para los comunicadores en dependencia de cuáles sean sus estructuras de expectativas. O lo que es decir: la información se consume como constructo comunicativo<sup>70</sup>. A partir de esta premisa, explicamos el modelo luhmanniano de comunicación, cuyo carácter abstracto y contraintuitivo lo hace muy difícil de entender y, por este motivo, ha tenido confusas interpretaciones<sup>71</sup>.

Toda comunicación debe involucrar como mínimo a dos personas, actores, sistemas... cada uno de los cuales opera con referencia a sí mismo (autorreferencia), pero a la misma vez con referencia al otro (heterorreferencia). Para la sociología luhmanniana se trata de *alteregos* que reducen complejidad coordinadamente cuando logra cumplirse esa unidad operativa o triple selección: información/dar-a-conocer/comprender. Con tal de evitar que la comunicación sea entendida únicamente como acción, unilateralidad de la emisión o simple cadena de acciones comunicativas<sup>72</sup>, una detrás de otra, Luhmann estipula que la operación comunicacional concluye siempre con el receptor, nombrándolo *ego* y dejando el lugar de *alter* al emisor: «La comunicación se hace posible desde atrás, por decirlo así, en sentido inverso al fluir del tiempo del proceso» (Luhmann, 1998: 144). Así deja por sentado que la tercera selección como acto de comprender (*Verstehen*) es el instante imprescindible de la comunicación como operación autorreferencial clausurada (autopoietica).

Esta propuesta teórica de la tripleta selectiva (más una cuarta selección) remite a la pregunta seminal: ¿Por qué en verdad comunicamos? Esta interrogante, a su vez, remonta a la situación hipotética de un punto cero de la evolución social, conjeturando que la génesis de la sociedad —y, por ende, de la comunicación— se habría producido cuando *ego* comprendió a *alter*, logrando ambos sobreponerse a sus mutuas expectativas sobre un trasfondo de complejidad no reducida o parálisis de la acción. Hasta ese momento ninguno de esos potenciales interlocutores podía saber cuál sería el comportamiento del otro y, por tanto, cuál debía ser su propio comportamiento. Esta aporía postontológica fue definida como *doble*

<sup>69</sup>El concepto de «información» es muy poco discutido en sociología, entendiéndose siempre de manera muy general (Schützeichel, 2015).

<sup>70</sup>Desde la perspectiva luhmanniana, resulta una enorme confusión creer que la información puede comprimirse, salvarse, almacenarse y transferirse entre computadoras. Una cosa es la capacidad del «medio de comunicación» (*pen driver, hard disk, periódico, libro, grabación, nuestra propia memoria, el lenguaje...*) para contener información en potencia, y otra cosa es la información en sí cuando se revela durante la comunicación.

<sup>71</sup>Somos del criterio que el modelo luhmanniano de comunicación termina muchas veces siendo distorsionado o simplificado. Aquí nos atenemos a su interpretación por Schützeichel (2015) y Pignuoli Ocampo (2013a).

<sup>72</sup>La diferencia entre «acción comunicativa» y «suceso comunicativo» es la problemática cardinal de la sociología de la comunicación. Una «acción comunicativa» es la selección de la acción (problema de la acción-estructura de la comunicación), mientras que un «suceso comunicativo» es una síntesis de selecciones (problema del acontecimiento-proceso de la comunicación) (Schützeichel, 2015: 49). O sea: la acción comunicativa está en la base del suceso comunicativo.

*contingencia* por Parsons y, tras ser reinterpretada por Luhmann, fundamenta el carácter mutualista y dialógico de su modelo de comunicación: tanto *ego* como *alter* deben observar las selecciones del otro como «contingentes»; o lo que es decir: como selectividad impredecible a partir del horizonte infinito de posibilidades alternativas que es el mundo del sentido. «Contingente es todo lo que no es necesario ni es imposible» (Luhmann, 1996: 175).

Una vez que se solucionó por sí mismo el problema de la doble contingencia, la emergencia de la comunicación significó la emergencia de la unidad social, pero trayendo consigo la posibilidad de aceptación o rechazo de la información participada: «Este riesgo que está en la base de la comunicación, es un factor morfogenético de una relevancia muy alta, porque debido a eso surgirán después instituciones que garanticen la aceptación aun en el caso de que la comunicación sea muy improbable» (Luhmann, 2002a: 312). Si bien se trata de una situación totalmente hipotética, la autogénesis de *lo social* como comunicación a partir de la doble contingencia explicaría cuestiones tales como que la sinceridad no pueda comunicarse (Luhmann, 1984). A tales argumentaciones postontológicas responde la concepción luhmanniana de la operación comunicacional, cuyo elemento basal es la síntesis de tres selecciones, a la que sigue obligatoriamente la cuarta selección (ver infografía 17):

*Selecciones 1 y 2:* *Alter* realiza una distinción al seleccionar y codificar una información —y no otra— para expresarla a *ego* mediante el dar-a-conocer (*Mitteilung*). Esta «propuesta de sentido» de *alter* puede ser emitida mediante una gesticulación, un cariño, una locución oral, puesta por escrito, telecomunicativamente difundida, codificada simbólicamente...

*Selección 3:* La comunicación se establece si, por su propia capacidad de observación, *ego* «actúa la comprensión» (*Verstehen*) cuando distingue entre el dar-a-conocer (*Mitteilung*) de *alter* y su codificación de la información seleccionada. Quiere decir: *ego* reconstruye para sí, mediante sus propios términos de decodificación, la «propuesta de sentido» de *alter*. Por ejemplo: *alter* guiña un ojo (información) y *ego* debe distinguir si se trata de un *tick* nervioso o de un dar-a-conocer como coqueteo o complicidad. Así se cierra la unidad operativa o «suceso comunicacional» como reducción de complejidad, gracias a la coordinación entre las selectividades de los *alteregos*. Esta tercera selección incluye también la incompreensión: que fuese un *tick* nervioso de *alter*, aunque *ego* creyó que era coqueteo, pongamos por caso.

*Selección 4:* A pesar de que la unidad sintética de comunicación sea un evento de duración temporal nula, que desaparece en cuanto aparece, los *alteregos* «cambian sus estados en razón de la información participada» (Schützeichel, 2015: 185). Esta diferencia de la diferencia, a modo de «autoirritación», impele a una cuarta selección: la aceptación o rechazo de *ego* a la oferta comunicativa de *alter*. Su importancia como acto de enlace, ya destacada en *Soziale Systeme* (1984), es subrayada por Luhmann en *Die Gesellschaft der Gesellschaft* (1997) [*La sociedad de la sociedad* (2006)], su obra cumbre y último libro:

Con el entender (o malentender) se cierra una unidad de comunicación, sin importar la posibilidad —en principio infinita— de seguir esclareciendo *qué* es lo que originalmente se había entendido. Pero este cierre tiene la forma del paso a otra comunicación, que puede realizar los esclarecimientos o de-

dicarse a otros temas. Producción de elementos es *autopoiesis*. La comunicación que acepta o rechaza la propuesta de sentido de una comunicación es *otra* comunicación, la cual no resulta —a pesar de todos los nexos temáticos— automáticamente de la comunicación anterior. Es condición básica de la *autopoiesis* de la sociedad —y de sus formaciones estructurales— que la comunicación no contenga en sí misma su propia aceptación, sino que todavía deba decidirse en la comunicación ulterior acerca de dicha aceptación (Luhmann, 2006 [1997]: 59).

Debido a que se trata de una doble autorreferencialidad clausurada operativamente (autopoietica) de los *alteregos* a partir de sus respectivos correlatos psíquicos en soliloquio, el proceso comunicacional no puede concebirse como la búsqueda de un entendimiento intersubjetivo. Que la comunicación se acepte, no significa estar de acuerdo con lo que se dijo o la forma en que fue dicho, sino tan solo que su aceptación se toma como premisa de la siguiente comunicación, independientemente de qué ocurra en la conciencia individual de cada cual. En modo alguno se trata de que los interlocutores lleguen a comprender la autenticidad de sus motivos o sentimientos. Tampoco que renuncien a sus respectivas expectativas, ya que estas seguirían siendo doblemente contingentes, incluso aunque hayan consensuado atenerse a la «racionalidad» para mantener un modo estable de comunicación. «Pero, ¿qué pasa si el *alter* o el *ego* se cansan de ser racionales?» (Fuchs, 2000: 208). Precisamente a este tipo de casos, cuando se rompe el vínculo entre realidad y racionalidad comunicativa, se consagra la teoría luhmanniana al preconizar el estatuto emergente y operativo de la *comunicación autopoietica*, «ya que lo que este concepto afirma, aplicado a la sociedad, es que todas las comunicaciones (rationales, irracionales, a-rationales o cualesquiera que sean los criterios) continúan la *autopoiesis* de la sociedad» (Luhmann, 2006 [1997]: 61).

### *Improbabilidades de la comunicación*

La teoría luhmanniana representó «el cambio más radical en lo concerniente a la teoría de la comunicación» (Schützeichel, 2015: 179). Su modelo basado en la doble contingencia de *alteregos* valida el proceso comunicativo como operación autorreferencial que debe sobreponerse a tres umbrales de improbabilidad: 1) entendimiento; 2) accesibilidad, y 3) éxito o consecución. Estos umbrales obedecen a la tripleta selectiva, de modo que no están aislados entre sí, sino reforzándose mutuamente. Si ya es improbable que *ego* comprenda a *alter*, esto resulta aún más improbable si ambos se encuentran alejados físicamente, sin poder percibirse el uno al otro. Y aun cuando se lograra la comprensión, todavía el éxito comunicativo dependería de la cuarta selección: la aceptación o rechazo. A los logros evolutivos que han «desimprobabilizado» la comunicación hasta propiciar la *diferenciación funcional* de la sociedad moderna, Luhmann los llama *media* o *medium*: 1) el lenguaje (probabilidad de comprensión), 2) los medios de difusión (probabilidad de accesibilidad), y 3) los medios de consecución o medios de comunicación simbólicamente generalizados (probabilidad de aceptación).

El *lenguaje* es el *medium* fundamental para la *autopoiesis* de la sociedad. Facilita la probabilidad de comprensión (*Verstehen*), al hacer unívoca la distinción entre información y

dar-a-conocer (*Mitteilung*) mediante signos acústicos y ópticos, más allá de la percepción. La comunicación lingüística permite que casi cualquier acontecimiento pueda ser tratado como información, tanto estados del entorno como estados propios. «O en la terminología de la teoría de sistemas: el lenguaje posibilita, en comparación con medios prelingüísticos, un alto incremento de la auto y la heterorreferencia» (Schützeichel, 2015: 203). Asimismo, el lenguaje asegura la reflexividad del sistema sobre la propia comunicación; o sea, la meta-comunicación. En oposición a los principios fundamentales de la lingüística saussureiana, Luhmann considera que el lenguaje no posee ningún modo propio de operar, sino que se hace efectivo como pensar o como comunicar gracias al *sentido*. «Consecuentemente, el lenguaje no constituye un sistema propio» (Luhmann, 2006: 82).

Los *medios de difusión* posibilitan que la comunicación supere los estrechos límites de la interacción (co-presencia de hablante y oyente) y llegue hasta personas distantes en espacio y tiempo. Tales *media* son la escritura, la imprenta, las telecomunicaciones, los medios de masas convencionales y los medios electrónico modernos, incluyendo los digitales. Todos se desarrollaron evolutivamente a partir de la comunicación lingüística, con arreglo a distintas tecnologías que aumentaron el alcance y la variedad de la difusión. Sin embargo, al aumentar la probabilidad de accesibilidad, se resquebrajó la unidad sintética de la comunicación, acentuándose las demás improbabilidades. En primer lugar, gracias a la disponibilidad de los textos escritos para la lectura y la relectura, esa tripleta selectiva quedó escindida espacial y temporalmente, creándose una distancia entre el *Mitteilung* (dar-a-conocer), por una lado, y el acto de comprensión (*Verstehen*) por el otro, aunque sin romper ese nexo. Al rebasar los controles sociales de la interacción entre oyentes, la comunicación escrita hizo que el acto de comprender fuera más difícil, a la par que más libre. Por consiguiente, aumentó el umbral de probabilidad de rechazo, incluyendo la crítica: «(...) ya no se puede confiar en la fuerza avasalladora de la exposición oral; hay que argumentar más objetivamente. Al parecer, este sería el origen de la filosofía» (Luhmann, 1998: 158).

Esa probabilidad de rechazo a los contenidos informativos se intensifica hasta límites insospechados luego de la invención de la imprenta y su reproducción de la escritura: «Sobre el significado de este cambio en la praxis de la comunicación societal todavía no se tiene una idea clara» (Luhmann, 2006: 225). Entre otras cuestiones, se reduce aún más la posibilidad del emisor para controlar la comprensión del receptor, quien puede dejar de leer si la oferta comunicativa no satisface sus expectativas. Igualmente se refuerza la sospecha de que el dar-a-conocer obedece a motivos propios del emisor: ¿contra qué o contra quién se escribió el texto? Mientras más información se tenga al respecto, podría significar menos aceptación de la comunicación. Si este uso comunicativo de la escritura ya imponía una selectividad ordenada y diferenciada para la provisión de *temas*, estos se diversifican con la ampliación del público de lectores: «Llamamos a esta provisión de temas, *cultura*, y cuando esta se ha almacenado especialmente para fines comunicativos, *semántica*» (Luhmann, 1998: 161).

Pero en la medida que aumenta la comunicación impresa, sobre todo a partir de la invención de los medios de masas, sucede que la información tiende a volverse anónima

mientras gana en profusión. Asimismo se torna más difícil averiguar si un dar-a-conocer se aceptará —o rechazará— como premisa para una conducta posterior. Aunque los *mass media* intenten medir la opinión pública mediante encuestas, resulta casi imposible conocer cuáles comunicaciones se aceptan a lo largo de la sociedad y cuáles se rechazan o se olvidan. Al plantearse la repercusión de los medios electrónicos como la televisión, señalando los aspectos conflictuales de la recepción individual-masiva de la emisión audiovisual, Luhmann especula sobre la posibilidad de que la diferencia constitutiva de la comunicación —entre información y darla-a-conocer— se debilite a tal punto que se vuelva irreconocible. Y todavía resulte más complejo en el caso de las nuevas tecnologías informáticas, cuyas operaciones no son accesibles ni a la conciencia ni a la comunicación. Al respecto, el sociólogo no descarta que, a semejanza del lenguaje, las computadoras sean capaces de proporcionar nuevas formas de acoplamiento estructural entre sistema social y sistema psíquico (Luhmann, 2006: 87).

A esta problemática Luhmann dedica sus «especulaciones más atrevidas» en *Die Gesellschaft der Gesellschaft* [*La sociedad de la sociedad*] (1997), publicado el año anterior a su fallecimiento, cuando apenas se iniciaba la proyección planetaria de internet. Entre las conjeturas luhmannianas se destaca que las computadoras como medio de difusión podrían anular la *autoridad* de la fuente de información con todos sus aseguramientos socioestructurales imprescindibles: rangos, reputación..., sustituyéndola por lo *irreconocible* de la fuente. Esto eliminaría la «posibilidad de reconocer el propósito de dar-a-conocer una comunicación y alimentar a partir de ahí la sospecha o sacar conclusiones que podrían llevar a su aceptación o rechazo» (Luhmann, 2006: 240). Incluso el sociólogo llega a conjeturar que estaría por nacer un nuevo *medium* cuyas formas dependerían del procesamiento computacional, por lo que hasta la dimensión objetual del sentido de la comunicación podría ser modificada. No habría nada que no pueda ser comunicado, con la única excepción de la sinceridad.

Incluso podría comunicarse paradójicamente; o sea, negando decir lo que se dice: se exponen las intenciones y perspectivas propias en el lado bueno del mundo, y a la misma vez se señala también que no todo es tan bueno como parece. Pero no se trata ya solamente de la realidad construida por los *mass media*, a cuya operatividad auto-poietica como subsistema funcional autónomo dedica Luhmann su libro *Die Realität der Massenmedien* [*La realidad de los medios de masas*] (1996), ejemplificando con la escenificación informativa de la Guerra del Golfo Pérsico para fines de doble uso: civil y militar. Sería un problema más profundo y complejo, pues ya no habría manera de discernir el conocimiento auténtico, ni tampoco si existe manipulación. Ante la improbabilidad de discernimiento, el procesamiento de información con vistas a su comunicación social se convierte en sí mismo en un riesgo invaluable: ¿de qué manera comunicar la ignorancia o lo que equivale a decir: la incertidumbre? Más adelante, con base a esa posible ruptura de la unidad operativa de la comunicación — o sea, entre información, dar-a-conocer y comprensión—, retomaremos esta conjetura para ilustrar nuestra idea de *implosión informativa*, aplicándola a los desastres sociorradioecológicos, en especial a Fukushima Daiichi.

Por ejemplo: las bajas dosis de radiación artificial después de un accidente nuclear podrían ser malas, no tan malas y hasta buenas, ya que esto dependería del modelo adoptado de curva dosis-respuesta por los expertos (ver subacápite 3.1.1).

### *Diferenciación funcional de la sociedad moderna*

Con base a su modelo sintético de comunicación, la teoría luhmanniana de los sistemas sociales o teoría general de la sociedad puede aquilatarse como una hiperbolización del problema de la doble contingencia entre *alteregos*, tanto a nivel individual como macrosociológico. Al desmarcarse completamente de las sociologías parsoniana y habermiana, Luhmann ofrece una versión propia sobre la evolución sociocultural de la humanidad en cuatro grandes formas estructurales a lo largo de la historia: diferenciación segmentaria; diferenciación jerárquica centro/periferia; diferenciación jerárquica por estratos (estratificada), y por último: diferenciación funcional. A cada una de estas formas de diferenciación social, basándose en la distinción *igualdad/desigualdad*, Luhmann le asigna retrodictivamente el primado de cada uno de los medios de comunicación: el *lenguaje*, la *difusión* y los *medios de comunicación simbólicamente generalizados*. Ya hemos abordado los dos primeros someramente; priorizamos ahora este tercer *media* por su importancia para comprender la hipercomplejidad de la sociedad moderna como *sociedad funcionalmente diferenciada*, a cuya condición socioevolutiva el teórico alemán supedita la problemática del riesgo.

Si la interacción cara a cara mediante el lenguaje oral fue la operación comunicacional que predominó durante la diferenciación segmentaria (tribus, clan, familia...), no es hasta que se produce la aparición de la escritura alfabética que se instauran las formas societales basadas en la diferenciación jerárquica: centro/periferia y por estratos sociales. Por último, los *medios de comunicación simbólicamente generalizados* consiguieron «desimprobabilizar» la aceptación de la comunicación cuando su difusión a distancia trajo consigo el incremento del umbral de rechazo hasta niveles insostenibles. La emergencia de esos medios de consecución propició la *autopoiesis* de algunos subsistemas sociales que comenzaron a cumplir una función independiente y única, sin que esto implicara la desaparición de los anteriores *media*. Incluyendo a las demás formas de sistemas sociales (interaccionales y organizacionales), la sociedad comenzó a reducir la creciente complejidad dentro de sí misma mediante la institucionalización de tales subsistemas funcionales. Significó el advenimiento de la sociedad moderna hasta hoy día, con sus sistemas parciales, sin ninguna primacía funcional de uno por encima de todos los demás: el sistema político, el sistema económico, el sistema jurídico, el sistema científico, el sistema mediático, el sistema educativo, el sistema de salud, la familia, la religión...

Este éxito socioevolutivo se explicaría porque los medios de comunicación simbólicamente generalizados lograron una combinación unívoca entre la selección de una oferta comunicativa y la motivación para aceptarla en un ámbito específico de competencia. Mediante códigos basados en una distinción binaria de validez universal, a semejanza del estricto código binario del lenguaje *sí/no*, esas instituciones semánticas garantizaron niveles de aceptación



por encima de la persuasión y de la retórica, incluyendo la prédica de contenido religioso (Luhmann, 2006). Así —por ejemplo— el *dinero* posibilitó ofrecer pagos por bienes o servicios que se deseaba poseer, aunque los interlocutores ni siquiera se conocieran. Con arreglo al código binario *pagar/no pagar* se hizo probable el éxito de la comunicación económica para la sociedad en su conjunto: el que no es propietario puede comprar una cosa, mientras que únicamente el propietario puede venderla. La atribución del valor positivo (*pagar*), acompañado por el valor negativo (*no pagar*) como valor de reflexión, se ajusta a los criterios fijados por un *programa*: fijación de precios en el mercado. De esta manera quedó establecida una estructura de expectativas para la resolución del problema de la doble contingencia, motivando la selección del valor positivo del código: el uso del dinero para comprar la propiedad, y no de la violencia para obtenerla, quitándosela a otro.

Esto no significa que el dinero hubiese tenido el estatus prioritario como *media of interchange* a partir del cual se generó el intercambio recíproco de bienes y decisiones entre los sistemas sociales. Esta tesis había sido sustentada anteriormente por Talcott Parsons, basándose en la teoría de los sistemas complejos abiertos (*input/output*) para concebir el modelo tetrafuncional (esquema AGIL)<sup>73</sup>. Su conclusión fue que los medios simbólicamente generalizados como el dinero surgieron cuando ya la diferenciación funcional se había consolidado con base a valores y normas (Parsons, 1968). En sentido totalmente opuesto, considerando a los sistemas sociales como sistemas complejos autopoieticos, Luhmann sostiene que los medios de comunicación —y no de intercambio— simbólicamente generalizados precedieron a la diferenciación funcional, ya que fueron precisamente su causa (Chernilo, 2006).

A partir de esos medios de consecución emergieron los subsistemas funcionales altamente efectivos que caracterizan a la sociedad moderna en su proceso de reducción de la hipercomplejidad. Tal y como vimos arriba con el *dinero*, que llevó a la diferenciación del sistema económico (*pagar/no pagar*), cada uno de esos sistemas parciales se reprodujo mediante sus operaciones comunicacionales con arreglo a un código binario específico que determina su estructura de expectativas<sup>74</sup>. El establecimiento del *poder* simbólicamente generalizado llevó a la diferenciación del sistema político (*gobierno/oposición*); la *verdad*, a la formación del sistema científico (*verdadero/falso*); el *derecho*, al sistema jurídico (*legal/no legal*); lo *sagrado*, al sistema religioso (*inmanente/trascendente*); el *arte*, al sistema artístico (*belleza/no belleza*); el *amor*, al sistema de las relaciones interpersonales (*amado/no amado*)... (Rodríguez y Arnold, 1991).

Todo subsistema puede observar a su entorno únicamente bajo la perspectiva de la tal codificación, cuyos valores son atribuidos mediante los criterios o reglas de decisión que establece su programa respectivo. Mientras que el código se mantiene invariable, el programa

<sup>73</sup>Para Parsons existen solamente cuatro medios: el dinero (en el sistema económico), el poder (en el sistema político), la influencia (en la comunidad societal) y los compromisos de valor (en el sistema fiduciario). Ellos representan a las cuatro clases de problemas funcionales que un sistema debe resolver para sobrevivir y desarrollarse: A = Adaptation (adaptación); G = Goal Attainment (logros de objetivos); I = Integration (integración), y L = Latency (mantenimiento del modelo latente). De ahí el acrónimo AGIL.

<sup>74</sup>No todos los sistemas funcionales operan con un medio de comunicación simbólicamente generalizado; por ejemplo: el sistema educativo, el sistema mediático y el sistema de salud (curación de enfermos). Esto se explica porque el éxito de su comunicación se garantiza de otra manera, además de las características propias de tales subsistemas (Corsi *et al*, 1996).

puede flexibilizarse para facilitar el acoplamiento estructural entre los sistemas parciales: el sistema económico con el sistema científico, por ejemplo. Pero cada subsistema sigue cumpliendo estrictamente su función como sistema autorreferencial clausurado (autopoietico) en la operación comunicacional. Dialécticamente, Luhmann insiste en que solo mediante la investigación empírica podrían identificarse cuántos medios de comunicación simbólicamente generalizados existen, cuál es la relación entre ellos, y cómo sus grados de institucionalización produjeron (o producirán) subsistemas funcionales (Luhmann, 2006).

Así, la *verdad científica* emergió como *media* para resolver cuestiones que, de otra manera, no hubiera podido observarse o, lo que es decir: comunicarse. Ni con todo el dinero del mundo se hubiera aceptado que la tierra es redonda, aunque se perciba plana, sino hubiese sido por la astronomía helenística y su desarrollo ulterior. El éxito de la comunicación científica se garantiza mediante la distinción *verdadero/no verdadero* como código binario cuyos valores se atribuyen con base al programa que son las teorías y métodos para actualizar verdades (o no verdades) todavía desconocidas. De ahí que el sistema parcial de la ciencia solamente considere las comunicaciones veritativas para sus objetos de indagación, y deje de lado —entre otras— a las consideraciones estéticas. Estas corresponde atribuir las al sistema artístico mediante el código tradicional *bello/feo*, o el más reciente del arte contemporáneo: *se adapta/no se adapta*. Si el mingitorio de Duchamp es arte o no, pongamos por caso (Luhmann, 2005). Esto no quita que se pueda programar la investigación científica en dependencia de los fondos económicos disponibles, o que la belleza sea invocada por los investigadores como fuente de inspiración. Pero los resultados del sistema de la ciencia no son un hecho económico ni artístico, sino que se atienen a su código binario: verdadero o falso.

Cada subsistema se encarga autopoieticamente de su función específica para la reducción de complejidad, y del mismo modo se encuentra dependiente de las reducciones que realizan los demás subsistemas y de las que aquel mismo no puede encargarse. Ningún sistema parcial cumple una función particular que sea más importante que otra: «Ni la política puede solucionar el problema de la economía, ni la economía los problemas de la ciencia, ni la ciencia los problemas de la religión, ni la religión los de la educación y esto, aunque los sistemas de funciones sean más interdependientes que antes» (Luhmann, [1985] 2012: 87). Al hipostasiar universalmente el primado de su código específico, todo sistema funcional se vuelve opaco a sí mismo y para el resto de los subsistemas, aunque se observen los unos a los otros (observación de segundo orden). A la sociedad omniabarcadora solamente puede observarse desde la estructura interna de cada sistema parcial, como si estos fueran atalayas cerradas en sí mismas con sus códigos, programas y operatividad comunicacional. Por tanto, ningún sistema funcional puede afirmar que es el representante de la sociedad global como un todo, ni siquiera el sistema político o el sistema económico, aunque pretendieran serlo.

Esta ausencia total de jerarquía que deviene heterarquía, descentralización o policontextualidad representa para Luhmann el hito evolutivo de que la sociedad moderna se haya autocatalizado bajo el régimen de los medios de comunicación simbólicamente generalizados y sus codificaciones binarias propias. Para la sociología luhmanniana no hay dudas de que la

sociedad moderna ha terminado sobrepasándose a sí misma, al autoexcederse por encima de las capacidades de sus sistemas funcionalmente diferenciados. Por eso descarta que pueda haber una solución posible para los problemas ecológicos, aun cuando se moralice al respecto, se apele a la retórica del miedo y se exija una nueva ética o cambio de mentalidad. La contribución de Luhmann a la teoría del riesgo comienza sentando sus bases en la improbabilidad de la comunicación ecológica como respuesta a las amenazas ambientales.

### *Comunicación ecológica: dominante y de protesta*

A su controversial tesis de que los problemas ecológicos resultan de la diferenciación funcional, Luhmann dedica una conferencia dictada en 1985 con el título *¿Puede la sociedad moderna evitar los peligros ecológicos?*, que luego amplía para convertirla en el libro *Ökologische Kommunikation* (1986). Sus planteamientos tienen una doble intención. Por un lado, trata de validar su recién estrenada teoría de los sistemas sociales autopoieticos, aprovechando para lanzar sus invectivas al Estado liberal, que considera finiquitado. Por otro lado, cuestiona a los grupos ambientalistas por sus excesos moralistas e incapacidad para gobernar (Strassoldo, 1991). Esta postura ambivalente se trasluce de sus respuestas en una entrevista documental que, con el título *El observador en el nido del cuervo*, fue filmada en 1989 cuando arreciaban las protestas masivas de los antinucleares y pacifistas en Alemania. Es notorio que Luhmann evita referirse directamente al tema nuclear cuando le preguntan: «¿Es posible una discusión social balanceada después de Chernobyl? ¿No es comprensible, incluso necesario, estar indignado?» (Strauch, 1989). Su reticencia académica a opinar con respecto al acontecer todavía en curso es típico de este sociólogo alemán, quien —no obstante— suele disertar en sus escritos con ejemplos eruditos de siglos pasados.

Sus criterios radicales sobre la problemática ecológica parecerían excesivamente reduccionistas, sino fuera por su profundo trasfondo metateórico. Hay que partir de su descalificación del concepto de «ecosistema», ateniéndose a la distinción *sistema/entorno*. De acuerdo con la lógica sistémico-constructivista, carece totalmente de sentido presuponer que existe un ecosistema omnicomprensivo que se pueda delimitar desde afuera, máxime tratándose de la complejidad irreductible del binomio naturaleza y sociedad. La unidad (distinción) siempre lleva implícita consigo la diferencia (indicación): el entorno nunca es «en sí» entorno, sino es entorno de un sistema; o lo que es decir: hay tantos entornos como sistemas<sup>75</sup>. Qué es lo que la sociedad reconoce como medio ambiente (ecológico) al exterior de sí misma, depende de la estructura interna de sus subsistemas funcionales, cuando cada uno convierte la perturbación de su entorno en información procesable: «La información es una cualidad completamente interior al sistema: no hay ninguna transferencia de información desde el entorno al sistema» (Luhmann, 1992: 82). Por ejemplo: aunque sea reconocido por el sistema científico, el problema ecológico de la contaminación radiactiva será entendido de manera diferente por el sistema económico, el sistema político y demás sistemas parciales.

<sup>75</sup>Basándose en el esquema conceptual que George Spencer Brown propone en *Laws of Form* (Brown, 1969), Luhmann define *sistema* como la forma de una distinción que tiene dos caras: el sistema, como el interior de la forma, y el entorno, como el exterior de la forma. Más adelante profundizaremos en esto (ver subcapítulo 5.2.2).

Un precepto luhmanniano básico es que, tanto los hechos físico-químicos y biológicos como los psicológicos, deben ser tematizados como comunicación; de lo contrario, no existirían socialmente. Nada que llamemos «riesgo» preexiste a la observación del riesgo; o lo que es decir: a su comunicación social. A esto se refiere la enigmática expresión luhmanniana: «El arsénico en la sangre y la furia en la cabeza no son como tales, realidades sociales. Se convertirán en acontecimientos sociales si se traducen en comunicación: cómo sea esto posible, lo regula el sistema mismo de la sociedad» (Luhmann, [1985] 2012: 82). Pero como ya hemos visto, la observación de la cuestión ambiental depende de cada subsistema funcional, cuyas estructuras internas son «ciegas» a las selecciones de sentido que no sean observables por sus propios códigos. Cada sistema parcial puede reflexionar solamente sobre su propia diferencia sistema/entorno, pero no tiene la oportunidad de hacerlo globalmente. Al no tener límites rebasables, el mundo como tal no puede ser un sistema diferenciado de un entorno. En ausencia de una instancia central de coordinación y control que represente a la sociedad mundial, resulta imposible una respuesta unificada a las amenazas ecológicas, aunque sea una legítima aspiración de orden moral y ético. Al aumentar el cúmulo de informaciones contradictorias sobre el (los) entorno(s) ecológico(s), en dependencia de cada subsistema funcional, aumenta la complejidad social: «No se necesita ser asocial para arruinar la sociedad; quizás, más bien, se llegue a la catástrofe precisamente porque se es demasiado social» (Luhmann, [1985] 2012: 82).

Para hacer asequible la fundamentación teórica de sus conjeturas sobre la posibilidad de una catástrofe ecológica debido a la diferenciación funcional, Luhmann recurre al concepto físico de *resonancia*, ya que este le permite resumir el sistema categorial de su teoría constructivista de los sistemas sociales, sintetizando conceptos tales como: clausura operativa, acoplamiento estructural, autorreferencialidad, etc. *Resonancia* significa que las irritaciones del entorno —incluido el medio ambiente (ecológico)— provocan disímiles reacciones en los subsistemas funcionales, dependiendo de cuáles sean sus estructuras, medios de comunicación simbólicamente generalizados o sus equivalentes funcionales, códigos y programas. Unos cambios relativamente poco notables en algún sistema parcial podrían estimular cambios sobreproporcionados en otros, y viceversa: algunos cambios muy importantes en un subsistema pueden ser tomados con relativa indiferencia por los demás.

Entendiendo metafóricamente cada subsistema funcional como un diapasón con afinación musical, ellos sonarían cuando sus entornos adquieran su misma frecuencia. El sonido (información) de un diapasón (subsistema) podría irritar como entorno a otro diapasón (subsistema) y, así sucesivamente, produciéndose un intercambio irrefrenable de perturbaciones mutuas. Al seguir enfrascada en su reproducción autopoética, como una inmensa caja de resonancias (comunicaciones), la sociedad moderna sería incapaz de controlar su autoirritabilidad a los problemas ecológicos que ella misma produce, so pena de autodestruirse: «En vistas de la típica diferenciación funcional, por tanto, de cara a una alta complejidad que se refuerza y se disminuye a sí misma, y que las causalidades no se pueden controlar centralmente, un tal desarrollo catastrófico es, a la larga, probable» (Luhmann, [1985] 2012: 92).

Otro aspecto teórico indispensable para justipreciar esa polémica tesis luhmanniana es la autorreferencia de la comunicación; o sea, la comunicación sobre la comunicación. La comunicación orientada por los sistemas funcionales según los precios, las normas de derecho, las elecciones políticas o las teorías científicas, no es la única comunicación. Aunque sea la *comunicación dominante*, resulta cada vez más notoria su incapacidad de representar a la sociedad como un todo, ya que esta función de procurar la unidad no la tiene ningún subsistema, como ya se ha visto. Emerge entonces la *comunicación de protesta* como un correlato inverso de la diferenciación funcional, teniendo su propio diapasón, al ocuparse de temas que ningún sistema parcial reconoce como suyo. Por ejemplo: reprocharle a la ciencia el fracaso de no haber logrado una vacuna para un virus ya conocido, o por no haber logrado identificar el umbral de dosis permisible para evitar los daños radiológicos.

Al margen de los subsistemas funcionales, pero inserta también dentro de la sociedad, la comunicación de protesta se autorreproduce como un peculiar sistema autopoiético en forma de los movimientos sociales como los «verdes». Aunque logran unirse, estos nunca podrían erigirse en representantes de la sociedad global por encima de los demás sistemas sociales, ya que el principio de diferenciación no admite la abarcabilidad del sistema dentro del propio sistema. Por eso los ambientalistas no han llegado a constituir un subsistema con su propio medio de comunicación simbólicamente generalizado —o con su equivalente funcional— que les permita representar a la unidad global frente a los demás subsistemas. Con ayuda de los *mass media*, que sí constituyen uno de esos sistemas parciales, los ecologistas solamente pueden irritar a la sociedad mediante la retórica del miedo y de la moral: «Esto lo que muestra es que nosotros tendremos que vivir con esta dualidad de comunicación: la comunicación del miedo y la comunicación funcional» (Luhmann, [1985] 2012: 94).

En su formulación más dramática, pesimista o fatalista, la teoría luhmanniana no deja margen ni remotamente a la búsqueda de un consenso global, racionalidad ambiental, reflexividad movilizadora o algo parecido. Mientras que para Beck existe la posibilidad de un «catastrofismo emancipatorio» en alusión a efectos secundarios beneficiosos del cambio climático en el orden político y social (ver subacápite 5.1), desde la perspectiva de Luhmann no cabe aspirar a ninguna solución futurista, ya que es mucho más realista plantearse la posibilidad de autodestrucción debido a la evolución no controlable de la sociedad funcionalmente diferenciada. Si ocurrirá —o no— este fatal desenlace evolutivo, es imposible saberlo de antemano, porque dependerá de una complejidad dinámica que escapa a toda cognición, quedando a merced de la contingencia; o sea, de lo que no es necesario pero tampoco imposible.

Por eso la apelación luhmanniana a buscar mecanismos de absorción de las incertidumbres irreductibles, reconociendo que la única comunicación posible es la *comunicación sobre la ignorancia*. Esta podría ser la manera de propiciar un compromiso social para no empeorar las cosas, revisándolo continuamente y estando siempre atentos a los horizontes de expectativas, a modo de «entendimiento no convencido» (Luhmann, [1992] 1997: 187). A este tema dedica su quinto capítulo de *Beobachtungen der Moderne*

[*Observaciones de la Modernidad*] (1992), publicado al año siguiente de *Soziologie des Risikos* [*Sociología del riesgo*] (1991).

«¿Por qué ha de agotarse la modernización en la autonomización y culminar, precisamente, en la “autorreferencialidad”, como sostiene Luhmann?» (Beck, 1997: 41). Así enfila Beck una de sus más severas críticas a la simplificación sociológica que podría constituir la teoría constructivista de sistemas por su rígida supeditación de la diferenciación funcional a la prevalencia de los códigos binarios, excluyendo la posibilidad de fusión y síntesis entre esos mismos códigos. ¿Acaso no es posible una combinación de ciencia y arte, de tecnología y ecología, de economía y política... que tenga como resultado algo que no sea ni lo uno ni lo otro, sino una tercera entidad todavía desconocida y aún por descubrir? Para nada es nuestro propósito dilucidar esta controversia sociológica. Pero sí quisiéramos señalar un aspecto que diferencia curiosamente a ambos autores, y es la polarización de sus diatribas: mientras Beck arremete frontalmente contra los ingenieros nucleares, por su parte Luhmann carga sus tintas contra los ecologistas antinucleares.

Esta polarización crítica se corresponde con sus posturas epistemológicas respectivas: el sociólogo *realista* increpa a los expertos técnicos, también realistas, considerándolos culpables de la *realidad* de los nuevos megapeligros. El sociólogo *constructivista* imputa a los ecologistas, señalándolos como principales atizadores de la *construcción social* del riesgo en la sociedad funcionalmente diferenciada. El sociólogo realista enfatiza en que el propio conocimiento tecnocientífico es la fuente del aumento de la ignorancia o «no saber» (*Nichtwissen*). El sociólogo constructivista recrimina a los «verdes» por su carencia de un saber propio, reprochándoles que sus exigencias «resultan de la transformación de la ignorancia en la impaciencia. Sustituyen el no saber por el saber que en todo caso ya no podemos permitirnos esperar, porque ese saber, si es que llega, llegaría demasiado tarde (...)» (Luhmann, 1997: 187). Situados a uno y otro lado de la división filosófica «realismo versus constructivismo social», ambos sociólogos también sucumben en su rivalidad a la condición ontológica de que la energética nuclear nació siendo una tecnología inherentemente política.

### 5.2.2/ *La incomunicación del riesgo nuclear y radiológico después de Chernobyl*

Si anteriormente concluimos en sintonía con Ulrich Beck que el dilema regulación/promoción de la energética nuclear se había acrecentado como incertidumbre manufacturada con cada accidente histórico superior a la base de diseño; ahora, de acuerdo con Niklas Luhmann, podemos sostener que el carácter único del riesgo nuclear y radiológico radica en la improbabilidad de su comunicación en la sociedad funcionalmente diferenciada. A una primera disfuncionalidad comunicacional ya nos hemos dedicado: que la OIEA se niegue a reconocer la dimensión catastrófica de Chernobyl y Fukushima Daiichi, limitándolos a «accidentes graves» en su Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES), supuestamente concebida para facilitar la comunicación pública. Este es un claro ejemplo de «irresponsabilidad organizada» en el sentido apuntado por Beck de que las instituciones siguen encubriendo la realidad de las catástrofes, aunque parezcan reconocerlas.

A esta recriminación los expertos nucleares suelen reponer que la dimensión catastrófica de los acontecimientos no depende solamente de las valoraciones técnicas, sino también de las valoraciones sociales, políticas, económicas, culturales... No es menos cierto que así ocurre, sobre todo cuando se admite el punto de vista luhmanniano sobre la construcción comunicacional de los riesgos. Entonces cabría enfocar el dilema regulación/promoción de la energética nuclear en hasta qué punto la sociedad funcionalmente diferenciada todavía sería capaz de continuar operando un control sobre sí misma para reducir la hipercomplejidad de una gran contaminación radiactiva transfronteriza, más allá de su dudosa calificación por la INES. *¿Podrá la sociedad de la incertidumbre manufacturada no ya evitar, sino lidiar comunicativamente con otros desastres sociorradioecológicos de magnitud global?*

Que un accidente nuclear tenga un nivel 6 o un nivel 7 de la INES, en dependencia de si han sido arrojados entre  $10^{15}$  y  $10^{16}$  o más terabequerelios de radiactividad artificial al medio ambiente, resulta una información difícilmente procesable por los sistemas sociales hacia el interior de sí mismos. Cuando durante los sucesos de Fukushima Daiichi se impuso la asignación directa del nivel 7 luego del nivel 5, saltándose el nivel 6, quedaron de manifiesto las graves deficiencias de esa escala oficial del OIEA desde que fue estrenada en 1990. Una de ellas es haber sido concebida como un registro histórico en retroactivo bajo circunstancias altamente politizadas, relacionadas con el eminente colapso de la Unión Soviética.

Para la clasificación del accidente de Kyshtim como un «accidentes importante», único con el nivel 6 hasta hoy día, se tuvo en cuenta que en 1989 fue reconocida por las autoridades de ese país la gran liberación radiactiva que produjo la explosión de un tanque de desechos líquidos en el complejo militar industrial *Mayak*. Este accidente ocurrió en 1957 y se había mantenido en secreto durante más de treinta años. Su revelación facilitó otorgarle el rango inferior de «accidente con consecuencias de mayor alcance» (nivel 5) al incendio del reactor industrial militar de Windscale, ocurrido también en 1957, pero aireado hasta cierto punto a la opinión pública desde un primer momento. De paso, se aprovechó para asignarle ese mismo nivel 5 a los sucesos de Three Mile Island (1979). En ambos casos se asumió que las emisiones radiactivas no fueron significativas, aunque siempre han existido serias dudas de cuál fue su monto.

A partir de ese ordenamiento en retrospectiva, la lógica de la INES se basa en la ruptura de las «líneas de defensa» para fundamentar la asignación de los niveles numéricos de gravedad por tres áreas de impacto: defensa en profundidad, barreras y controles radiológicos, y efectos sobre la población y el medio ambiente. Pero se carece de una introspección técnica que haya valorado autocríticamente cada accidente por sus causas ingenieriles, tipo de sorpresa tecnológica y grado de *irreversibilidad*. No se tiene en cuenta que las fallas tecnológicas de Kyshtim fueron nimias en comparación con Windscale, donde se puso de manifiesto el apenas conocido efecto Wigner por la acumulación de energía potencial en el grafito (ver subacápite 2.1). Ni tampoco se valoró que este accidente en un antiguo prototipo militar de reactor nuclear fue muy diferente a lo sucedido después con el prototipo energético civil de TMI-2, cuya pérdida de refrigerante hasta provocar la fusión de su núcleo corroboró el «fallo de causa común» (*common-cause failure*) y demás vaticinios de los análisis probabilísticos

del informe WASH-1400, más conocido como informe Rasmussen (ver subacápite 2.3). Tal pareciera como si, mediante ese nivel 6 asignado a Kyshtim, se hubiera querido separar a Chernobyl de Three Mile Island, aunque estos últimos fueran hasta ese momento los únicos accidentes superiores a la base de diseño (BDBA), con apenas siete años de diferencia.

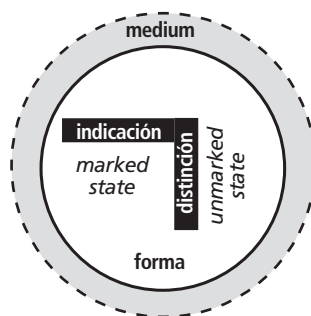
Al atenerse al principio comunicacional de las escalas sismológicas y sus criterios evaluativos (impacto y magnitud), sin ninguna valoración autocrítica, la INES incurre en el reduccionismo de tratar a los accidentes nucleares como si fueran desastres naturales. Pero mientras la génesis de un huracán, un terremoto, un tsunami... no puede ser imputada al hombre, la clasificación de un desastre tecnológico por su gravedad tendrá siempre el sesgo implícito de que su origen y causas son responsabilidad humana. A esta condición ontológica podemos yuxtaponer la principal aportación de Niklas Luhmann a la teoría del riesgo: la distinción *riesgo/peligro* (*Risiko/Gefahr*). Como tal se le reconoce, aunque suela rechazarse su tesis sobre la resonancia autodestructiva de los subsistemas sociales debido a los peligros ecológicos (Renn, 2008b). Es preciso abstraerse de las posiciones realistas y seguir manteniendo una radical postura sistémico-constructivista, si queremos entender el profundo calado de esa distinción luhmanniana. Nos guiaremos por su propia metodología cuando, al reconocer la naturaleza complicada y abstracta de sus reflexiones, el sociólogo de Bielefeld reconoce que su principal contribución es la aplicación de la «observación de segundo orden» (observación de la observación) para «echar más luz sobre la comunicación del riesgo» (Luhmann, 1992: 156).

#### *Observación de segundo orden*

La teoría constructivista de sistemas entiende por «observación»: encontrar distinciones. Este concepto de observación no tiene nada que ver con la observación ordinaria, la cual está muy ligada a las percepciones, aunque estas son también observaciones que distinguen (Schützeichel, 2015). El significado luhmanniano de «observar» se relaciona con pensar, percibir, actuar y comunicar como procesos que distinguen siempre algo de la realidad, diferenciándolo al unísono de otro algo. Es así que, cuando procuramos obtener determinado fin, lo hacemos con una acción específica, y no empleando cualquier acción para todo fin. Comunicamos una información de cierta manera, y no de otra que pudiera ser incomprendida. A modo de retruécano, significa que algo solamente puede señalarse mientras sea distinguible de otro algo, y a la inversa: cuando algo resulta distinguible, lo es solamente porque otro algo puede señalarse. Por consiguiente, toda observación se realiza mediante alguna distinción, remitiendo a dos lados que se presuponen entre sí asimétricamente: uno que es indicado de inmediato (*marked state*), y otro lado que no es indicado (*unmarked state*), pero está latente. Este último puede ser simplemente el resto del mundo (*unmarked space*).

Con el concepto de *forma* se identifica a la unidad de esa distinción *lado indicado/lado no indicado*. De esta manera, como ya hemos venido diciendo, Luhmann se acoge al cálculo lógico desarrollado por George Spencer Brown en su libro *Laws of Form* (1969) sobre las formas básicas que subyacen a las leyes lingüísticas, matemáticas y físicas. En sintonía con la máxima browniana: «*draw a distinction*» (realice una distinción), el sociólogo alemán se





**Figura 17:**  
**Concepto de**  
**forma según**  
**Niklas Luhmann,**  
**basándose en**  
**Spencer Brown.**

apropia de las categorías *distinción* (*distinction*), *indicación* (*indication*) y *reingreso* (*re-entry*), extrapolándolas desde ese ámbito lógico matemático para cimentar las bases de su epistemología sistémico-constructivista. Cada observación representa una operación basada en la aplicación de una forma (esquema de distinción con dos lados) *en y sobre el medio de sentido*, acompañada por la selección-indicación del lado interior de esa forma por ser el origen de dicha distinción (ver figura 16). El lado exterior (no indicado) se relaciona siempre de alguna manera con el tipo de distinción manejada. Ambos lados de la forma no pueden señalarse simultáneamente porque se borraría la distinción: «Solo se puede observar con el auxilio de un corte, de un límite, de una muesca, que se puede cruzar, pero no “suprimir” sin regresar a lo inobservable» (Luhmann, 1998: 69). Ese paso de un lado hacia el otro (*crossing*) requiere de otra operación y, por tanto, de tiempo para borrar la indicación precedente. Hay distinciones que admiten ser reconocidas como unidad para su reingreso (*re-entry*) en cualquiera de los lados distinguidos por ella. Por ejemplo: la distinción sistema/entorno.

Con base en esa lógica formal de la observación, altamente abstracta, Luhmann enfrenta el problema epistemológico de cómo podría conocerse la distinción que utiliza un observador para indicar un objeto o un concepto, eligiendo un lado —y no otro— como punto de partida para operaciones ulteriores: comunicaciones, pensamientos, percepciones... Tratándose de *objetos* —una silla, una mesa, una lámpara...—, se puede compartir la misma realidad del observador de primer orden, coincidiendo al distinguir ese «algo» como un acto único con respecto al resto del mundo. O sea: a pesar de diferenciar dos lados, solo hacemos referencia de manera explícita a uno de ellos, dejando el restante en el suspenso o la penumbra. De esta manera, aquello a lo que nos referimos se constituye como una «cosa» (o sea, como «algo» no contingente) que se identifica con una realidad existente, independientemente de cualesquiera distinciones sean realizadas por el observador. Una silla es una silla, ya sea distinguida con respecto a un espejo o una lámpara.

En cambio, tratándose de los *conceptos*, resulta imprescindible distinguir ambos lados de la distinción, de manera tal que el lado indicado (*marked state*) tenga explicitado su contraste en el reverso de la distinción (*unmarked state*). Para lograrlo se necesita una observación de segundo orden que no se oriente solamente a lo observado (*qué*), sino al *cómo* de la observación de primer orden: observar cómo observa el observador observado. Aquí Luhmann se auxilia de la cibernética de segundo orden desarrollada por Heinz von Foerster, especialmente de su noción del punto ciego (*blind spot*). Aplicado a observaciones de todo tipo, este principio fue abstraído de los estudios sobre la visión ocular que corroboran la existencia de

una zona de la retina sin células receptoras, a la que corresponde un punto de ceguera, sin que el vidente se de cuenta. En términos constructivistas significa que todo observador tiene un punto ciego que no puede ver por sí mismo, aunque puede ser visto por otro observador, quien a su vez tiene su punto ciego: «Parece ser cierto lo que leemos en Heinz von Foerster: no se puede ver que no se ve lo que no se ve» (Luhmann, 1995: 60).

Ese punto ciego significa que, cuando efectúa la observación con base a una distinción específica, el observador de primer orden es incapaz de observar si dicha distinción se cumple para su misma observación. Si la observación se orienta con base a la distinción *verdadero/falso* —o sea, el código binario del subsistema funcional de la ciencia—, el observador no podrá observar si su propia observación es verdadera o falsa: «El famoso postulado de la falsabilidad (Popper) dice: las tesis de la verdad son sólo relevantes científicamente cuando con ellas uno corre el riesgo de que pudieran ser falsas» (Luhmann, 1992: 71). Si la observación se orienta con base a la distinción *razón/error*, el observador será incapaz de saber si tiene razón o comete un error. Si se trata de la distinción *riesgo/seguridad*, el observador será incapaz de observar si su observación es riesgosa o segura. Únicamente una observación de segundo orden con base a otra distinción/indicación podrá observar ese punto ciego del observador de primer orden: qué no ha podido ver y cómo no ha podido verlo.

Para hacerlo un poco más fácil: una cámara de seguridad en un banco o una tienda es una observación de segundo orden. Además de percibir todo lo que puede ver un vigilante como observador de primer orden, observa también cómo este no pudo ver determinado hurto y, con ello, la cámara ayuda a determinar si el propio vigilante resulta sospechosamente cómplice. O ejemplificando en términos más serios y cercanos a nuestro tema: los neutrones se «observaron» cuando emergió la mecánica cuántica como observación de segundo orden. Su distinción específica fue el «principio de complementariedad», según el cual tanto la descripción ondulatoria como la corpuscular son indispensables para comprender la realidad física subatómica. De haberse persistido en las leyes de la mecánica clásica como observación de primer orden, con arreglo a una sola de esas descripciones (o la ondulatoria o la corpuscular), el neutrón no existiría como tal y, por ende, tampoco los reactores nucleares (ver subacápite 1.5). La comprensión de esa interdependencia de observador y mundo observado tiene enormes consecuencias teóricas que no podemos abordar aquí a plenitud. Su enfoque va más allá de la teoría de la relatividad de Einstein, según la cual las observaciones son relativas al punto de referencia del observador, y más allá del postulado de la relación borrosa de Heisenberg, según la cual toda observación influye en lo observado (Watzlawick y Krieg, 1995).

Bajo este prisma radicalmente constructivista se explicaría la diferenciación del *framework* (encuadre) del riesgo por los científicos que señaló la socióloga Dorothy Nelkin y, más tarde, desarrolló Bryan Wynne para fundamentar la importancia de tener en cuenta el conocimiento lego, introduciendo su concepto de *indeterminación* sobre las redes causales abiertas (ver subacápite 4.4). Ambos autores son referenciados por Luhmann en *Soziologie des Risikos* (1991), la obra que estrena su aplicación de la observación de la observación, si bien en *Ökologische Kommunikation* (1986) había dedicado un breve capítulo al tema con

mención a Von Foerster. Entre uno y otro libro, Luhmann dejó su impronta entre los constructivistas radicales al publicar el artículo «¿Cómo se pueden observar estructuras latentes?» en la monografía *Das Auge des Betrachters. Beiträge zum Konstruktivismus* (1991) [*El ojo del observador. Contribuciones al constructivismo* (1995)], que vio la luz con motivo del ochenta cumpleaños de aquel cibernético austríaco. El sociólogo alemán aprovecha para adelantar el problema de investigación que lo anima a contradecir a sus homólogos que abordan el tema del riesgo: «¿Por qué pensamos sobre nuestro futuro en el contexto de la distinción riesgo/seguridad, sabiendo que no hay seguridad libre de riesgo?» (Luhmann, 1995: 68).

En nota al pie de esta interrogante, Luhmann aprovecha para criticar a Beck por atenerse a la distinción *riesgo/seguridad* con la intención de alarmar en su libro puntero sobre la sociedad del riesgo, mientras que en sentido contrario —o sea, como ejemplo no alarmista— menciona a Aaron Wildavsky, con su libro *Searching for Safety*, ambos publicados en 1986. Pero aun así, Luhmann reconoce que no puede explicarse por qué persiste el binomio riesgo/seguridad como esquema de observación: «La polémica es fascinante, los motivos de la elección de la distinción siguen ocultos» (Luhmann, 1995: 72). A estas alturas de nuestro trabajo, podemos enarbolar nuestra propia hipótesis: la elección de la distinción *riesgo/seguridad* obedece a que, siendo el punto de partida del *Risk Analysis*, se constituyó en el marco analítico del dilema regulación/promoción de la energética nuclear (ver figura 12, capítulo 4). No es hasta después de Chernobyl que se resquebraja ese esquema de observación, tanto para los ingenieros nucleares como para los científicos sociales.

#### *Del esquema riesgo-seguridad al esquema riesgo-peligro*

Hasta que Luhmann escribió *Soziologie des Risikos* (1991) nadie se había propuesto esclarecer conceptualmente el *riesgo* para satisfacer las exigencias de las ciencias sociales, aun cuando esa categoría apareciera en las disciplinas científicas más variadas. Ubicándose en el plano semántico, este sociólogo alemán reparó en que la mayoría de la literatura académica en inglés usaba indistintamente las palabras *risk*, *hazard* y *danger* en un mismo sentido como términos forjados para afrontar la incertidumbre de un daño<sup>76</sup>. Ni siquiera el reconocido filósofo de la ciencia estadounidense Nicolas Rescher, quien manejara esas categorías como sinónimos, se había planteado esa duda semántica cuando reconocía el entuerto de dilucidar si el riesgo es una categoría metafísica o una categoría epistémica; o sea, si el riesgo es una condición intrínseca del mundo, ajena a la cognición humana (plano ontológico); o si el riesgo es una realidad existente en virtud de juicios elaborados (plano epistemológico) (Rescher, 1983).

Reconociendo el riesgo como categoría epistémica que aborda cada disciplina científica a partir de su propio contexto teórico, aun así Luhmann puso en duda de que se supiera realmente de qué se habla, sobre todo cuando se ontologiza el riesgo como ente objetivo. De acuerdo con su enfoque sistémico-constructivista, no pueden existir riesgos que sean independientes de la observación: «El mundo exterior como tal no conoce riesgos, puesto que

<sup>76</sup>Según el Diccionario Oxford: *risk* es «la posibilidad de que algo malo, desagradable o peligroso pueda ocurrir», mientras que *danger* significa «la posibilidad de que algo o alguien pueda ser dañado, destruido o muerto».

no conoce diferenciación, expectativas, evaluaciones ni probabilidades, *excepto como un resultado propio de sistemas observantes en el universo de otros sistemas*» (Luhmann, 1992: 28). Si bien tiene en cuenta las elaboraciones ingeniosas desde el campo de la economía —como la famosa distinción de Frank Knight entre riesgo e incertidumbre—<sup>77</sup>, el sociólogo alemán considera insuficientes los métodos cuantitativos del cálculo de riesgos. Así, con el término de *umbral de catástrofe*, Luhmann se refiere a la incapacidad de esos cálculos racionales para determinar cuándo algunos acontecimientos extremadamente improbables pudieran volverse catastróficos. Por este motivo, determinados riesgos nunca serán aceptados socialmente, aunque la posibilidad de daño sea valorada como ínfima o muy remota.

Luhmann cuestiona la tradición racionalista, realista-objetivista y formal-normativa que sustenta el esquema *riesgo/seguridad*, cuya máxima expresión es el enfoque probabilista ingenieril según la socorrida fórmula: **Riesgo (C) = P x C**. En su opinión, este esquema reduce el problema de las decisiones riesgosas a la obtención de más y mejor información sobre la magnitud del daño (C) y su probabilidad de ocurrencia (P), «todo ello como si hubiera “informaciones” que uno podría *tener o no tener*» (Luhmann, 1992: 37). Es así que, tanto los expertos técnicos como quienes les reprochan no hacer suficiente por la seguridad, son observadores de primer orden que creen en los mismos hechos como si fueran el único mundo real. Sin embargo, debido a sus puntos ciegos, ni unos ni otros son capaces de ver que esos mismos hechos generan informaciones muy diversas para cada cual. Solamente desde una observación de segundo orden se hace notorio que la seguridad total resulta imposible de conseguir por las ciencias de la ingeniería, aunque se empeñen en lograrlo: «Siempre hay algo imprevisto que puede ocurrir. A causa de esto, el uso que le dan al concepto de riesgo se refiere a su aspiración de alcanzar la seguridad y la precisión numérica de la dimensión de lo razonablemente alcanzable. La transición de los análisis de riesgo determinístico a los análisis de riesgo probabilístico, corresponde a esto» (Luhmann, 1992: 37).

El principal reproche teórico de Luhmann al enfoque macrosociológico de Beck es que este reflexione sobre el futuro de la sociedad moderna en el mismo contexto de la distinción riesgo/seguridad, aunque sepa que no hay seguridad libre de riesgo. En efecto, cuando Beck lanza sus primeras diatribas contra los ingenieros nucleares, les fustiga porque puedan determinar únicamente la seguridad probable y no la seguridad como tal (ver subacápite 5.1). Sin embargo, la complejidad sistémica hace que sea imposible evitar riesgos buscando seguridad, incluso decidiendo no decidir. A tenor con la «reducción de una complejidad por otra» como uno de los grandes motivos de la teoría de sistemas, en todo caso podría lograrse la reducción de unos riesgos mediante otros riesgos. Cada sistema social tiene que construir su propio diferencial de riesgos, no para garantizar la seguridad sino para gestionar su inseguridad con

---

<sup>77</sup>El filósofo y economista estadounidense Frank Knight formalizó esa distinción conceptual en su libro *Risk, Uncertainty, and Profit* (1921) para subrayar el papel del empresario frente a dos tipos de incertidumbre: una mensurable y otra inmensurable. Caracterizándolas como «objetiva» y «subjetiva», respectivamente, la primera es identificada mediante el concepto de *riesgo* (aleatorio con probabilidades conocibles), mientras que la incertidumbre inmensurable (aleatoria con probabilidades que no se pueden conocer) es la *incertidumbre* propiamente dicha. La taxonomía de la incertidumbre propuesta por Wynne incorpora esta idea de la diferente mensurabilidad (ver figura 14).

respecto a los demás sistemas parciales en la sociedad funcionalmente diferenciada. Por tanto, a pesar de su arraigo y validez en la práctica ingenieril, el esquema riesgo-seguridad resulta demasiado estrecho para entender el enorme significado del riesgo a escala societal.

El gran acierto teórico de Luhmann es haber aplicado su propia observación de segundo orden para desmarcarse tanto del realismo positivista de los expertos técnicos que sostienen el esquema riesgo-seguridad, como de los científicos sociales que tratan de contraponérselo, pero sigue atrapados dentro de ese mismo marco analítico, como sería —en su opinión— el caso de Beck<sup>78</sup>. Al entender el riesgo exclusivamente como comunicación social, la premisa luhmanniana es —reiteramos— que nada que llamemos riesgo preexiste a la observación del riesgo. El riesgo es una construcción por el observador. El riesgo es una semántica, no un hecho. El riesgo no es el daño, sino una conjetura del daño. El riesgo no es la incertidumbre, sino una forma de afrontar la incertidumbre. En síntesis: Luhmann no se aproxima al riesgo como fenómeno real y objetivo, sino como el resultado de distintos esquemas de observación: «No se trata simple y llanamente de una descripción del mundo por parte de un observador de primer orden que ve algo positivo o negativo, que constata o echa de menos algo. Más bien se trata de la reconstrucción de un fenómeno de contingencia múltiple que, como tal, ofrece diferentes perspectivas a diferentes observadores» (Luhmann, 1992: 28).

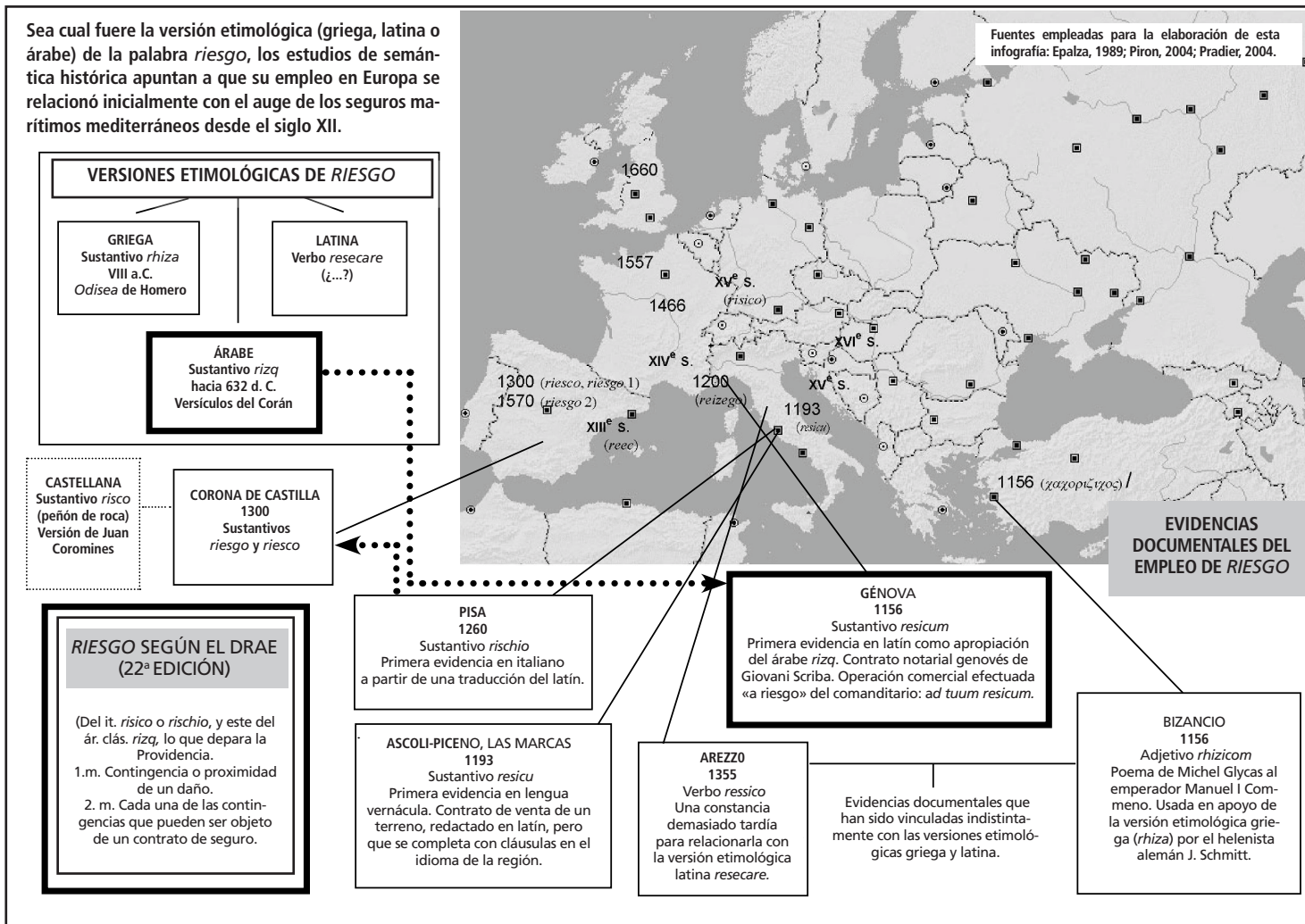
El término «riesgo» tiene la misma raíz en la mayoría de las lenguas europeas modernas, además de la española: francés *risque*, catalán *risc*, portugués *risco*, euzkera *ris-ko*, italiano *rischio*, alemán *risiko*, inglés *risk*, griego *rhizikon*.... El que fuera adoptado por lenguas de orígenes muy diversos (romances, germanas, griega, vasca...), inclinó a sospechar que su génesis era muy antigua y estaba relacionada con alguna de las llamadas lenguas clásicas. Aunque parece aceptado que todas esas locuciones derivan de los antecedentes latinos *risicum*, *risichium*, *risco*, *rischis*..., no habido nunca un consenso unánime sobre su etimología, al punto que los diccionarios presentaban dos versiones: una latina (popular, medieval y clásica) y otra griega. A estas se sobrepuso la expresión árabe *rizq*, sugerida por arabistas franceses e hispanos debido a su presencia en un centenar de versículos del Corán desde 632 d. C., fecha de la muerte de Mahoma. Por tanto, hay suficientes motivos para pensar que la noción de «riesgo» comenzó obedeciendo a un sistema referencial absolutamente religioso y trascendente<sup>79</sup>. No obstante, sea cual

---

<sup>78</sup> El pensamiento de Beck evolucionó a partir de su conceptualización del *riesgo manufacturado* y la *incertidumbre manufacturada* (ver subcapítulo 5.1). Finalmente logró desmarcarse de la distinción *riesgo/seguridad*, adoptando la distinción *riesgo/catástrofe* en *La sociedad del riesgo mundial: en busca de la seguridad perdida* [2007] (2008). Desde el mismo título, Beck se propuso rebatir a Luhmann como uno de los principales objetivos de este libro.

<sup>79</sup> La versión etimológica árabe *rizq* fue impulsada por el arabista francés Marcel Devic y, posteriormente, por los españoles Federico Corriente y Mikel de Epalza, sobre la base de que «esta voz significa cuanto depara la Providencia que puede ser bueno o malo para el musulmán ortodoxo» (Corriente, 1985). Para los musulmanes cultos que solían ser también comerciantes activos, además de piadosos peregrinos a los Lugares Santos de la Meca, el empleo del genérico *rizq* habría servido para poner sus seguros comerciales a resguardo de Allâh. Al no tener ningún término para designar ese tipo de contratos, las lenguas europeas incorporaron esa palabra, aunque ya despojada de sus referencias religiosas originales, puesto que la confianza en la instancia divina tenía sus propias expresiones de origen griego y latino en el ámbito mediterráneo occidental: *tyché* y *fortuna*, respectivamente. A favor de esta hipótesis se pronuncia también el medievalista francés Sylvaill Piron, quien constata la aparición por primera vez de la palabra *resicum* (o *risicum*) en un cartulario notarial genovés, cuyo dueño se llamaba Giovanni Scriba y se desempeñó como notario entre 1154 y 1164. Este emplea dicho término en una

Sea cual fuere la versión etimológica (griega, latina o árabe) de la palabra *riesgo*, los estudios de semántica histórica apuntan a que su empleo en Europa se relacionó inicialmente con el auge de los seguros marítimos mediterráneos desde el siglo XII.



Infografía 18: La palabra *riesgo*: etimología y primeras evidencias de su empleo en Europa. Fuente: elaboración propia.

fuere la versión etimológica (griega, latina o árabe), los estudios de semántica histórica apuntan a que el empleo de esa palabra en Europa se relacionó inicialmente con el auge de los seguros marítimos mediterráneos desde el siglo XII (ver infografía 18).

Lo anterior coincide con que las versiones etimológicas griega y latina recreen la idea de escollo o dificultad que habrá de evitarse durante la navegación. A la propagación de la versión griega influyó que Homero empleó el vocablo *rhiza* (ρίζα) para designar los acantilados de Escila, los cuales procura sortear Odiseo en su ruta de regreso a Ítaca. También en esa imagen marítima de las rocas cortantes, se basa la versión latina del verbo clásico *resecare*, que quiere decir «cortar». En ambas versiones se trataría de aquella fuente de daño contra la cual estaba advertido todo navegante, de ahí que pasara a formar parte de su vocabulario activo. En ese mismo sentido apunta la etimología castellana tradicional,

escritura de abril de 1156 para caracterizar una operación comercial efectuada «a riesgo» del comanditario: *ad tuum resicum* (Piron, 2004: 66). De ahí que *resicum* pudiera ser la apropiación del término árabe *rizq*, cuya sinonimia con *fortuna* facilitó su empleo por los notarios italianos con un objetivo jurídico: disponer de ambos términos cuando la mundana transacción comercial comenzó a requerirlo. Es el caso de la expresión *ad risicum sive fortunam* («a riesgo o fortuna») para regular quién se hará cargo de las reparaciones de un navío en caso de que sufriera daños. Entrado el siglo XIII, aparece la fórmula notarial *ad fortunam Dei et tuum resicum*, con lo cual «la fortuna es lo que viene de Dios, y el *resicum* se refiere a quien asume las consecuencias financieras de la operación» (Piron, 2004: 70).

ya desechada por el DRAE, de que la palabra *riesgo* en español tendría un origen común con *risco* (peñasco alto) por el peligro que sufren los barcos al transitar por esos lugares<sup>80</sup>.

Un tanto renuente o desconocedor de esos estudios lingüísticos sobre el riesgo, Luhmann es del criterio que «faltan todavía tanto una investigación histórico-nominal como una histórico-conceptual detalladas», teniendo en cuenta que «las raíces de la palabra no son conocidas» e, incluso, «algunos piensan que es de origen árabe» (Luhmann, 1991: 30). Su hipótesis es que, a medida que fue transmutando en los idiomas vernáculos, dicho neologismo dejó de tener el significado estricto de las contrataciones y el derecho mercantil, pasando a otras esferas de la vida: militar, doméstica, religiosa, literaria..., en las que «riesgo» comenzaría a ser usado con otras connotaciones. Es aquí donde —tal y como señala el sociólogo alemán— se echa en falta una historia del concepto que clarifique cómo fue ese proceso, aunque hay suficientes evidencias documentales en favor de que esa palabra tuvo su epicentro de difusión en la península itálica, durante el apogeo de las llamadas repúblicas marítimas.

Con las miras puestas en la invención de la imprenta hacia 1500, Luhmann ejemplifica con varias frases que demuestra el empleo del sustantivo italiano *rischio* fuera de los contratos de seguro marítimo, aunque reconoce que resulta muy difícil reconstruir las razones para la asimilación del nuevo concepto en otros ámbitos, donde ya el lenguaje contenía palabras para el peligro, la empresa aventurada, el azar, la fortuna, el valor, el miedo, la aventura...: «Sospechamos que el problema reside en la opinión de que solamente es posible alcanzar ciertas ventajas cuando se pone en juego (se arriesga) algo. No se trata aquí del problema de los costos, que pueden calcularse previamente y que se pueden sopesar en relación a los beneficios. Se trata, más bien, de una decisión que, tal como se puede prever, se lamentará más tarde en el caso de que ocurra un daño que se esperaba poder evitar» (Luhmann, 1991: 31).

Una vez señalada la ambigüedad semántica del término «riesgo», el problema radica en cuál distinción podría elegirse para su conceptualización. Que Luhmann escoja *riesgo/peligro* (*Risiko/Gefahr*) como la distinción más idónea obedece en primera instancia al precedente ya mencionado del empleo confuso de ambos términos en calidad de sinonimia, reforzado por las versiones etimológicas griega y latina. Cuando enfrentamos un riesgo o un peligro nos exponemos a sufrir un daño; esto es lo que hermana ambos términos. Por eso pueden contrastarse con ayuda de la lógica formal de Brown como lados distintos de una misma distinción, de manera que el *peligro* sea un concepto de reflexión cuya función consiste en aclarar la contingencia de los hechos o estados de cosas que se relacionan con el concepto de *riesgo*. Esta distinción puede validarse con arreglo a la diferencia entre sistema y entorno: el *riesgo* implica autorreferencia, internalización de la complejidad, mientras que el *peligro* implica heterorreferencia, externalización de la complejidad. Esta es la clave epistemológica constructivista para entender el aporte luhmanniano al tema de marras.

---

<sup>80</sup>Esta versión del filólogo y etimólogo Joan Coromines (1983: 13-18) ha sido refutada por el arabista Mikel Epalza, para quien «la imagen de la roca marítima que corta parece inventada a propósito para introducir las etimologías montañosas del *riza* griego y del *risco* castellano» (Epalza, 1989: 190).

A partir de este despeje lógico se entiende cómo la eventualidad de daños es atribuida y procesada por el sistema observado, ya sea persona, organización o sistema social. Dando por sentado que hay siempre una incertidumbre con respecto a la posibilidad de daño, se presentan únicamente dos opciones: o el posible daño se atribuye a una decisión que es resultado de las operaciones o acción propia del sistema, siendo el daño consecuencia de esa decisión, y hablamos de *riesgo* en sentido estricto: «el riesgo de la decisión», recalca Luhmann. O el posible daño se considera provocado externamente, siendo procesado por el sistema no como resultado de una acción propia, sino como una vivencia de su acoplamiento con el entorno, y hablamos entonces de *peligro*.

La caracterización de algo como riesgo o peligro depende de esa atribución del daño. Así, la posibilidad de un terremoto, tsunami, huracán u otro desastre natural constituye solamente un peligro, mientras no se tome alguna decisión que implique enfrentarlo, después de la cual pasaría a ser un riesgo para el decisor: construir una central nuclear en una zona sísmica, por ejemplo. El peligro del impacto de un meteorito sería un caso límite, ya que su posibilidad se subestima sencillamente por la razón de que no podría decidirse nada al respecto. «Este ejemplo muestra que la sociedad moderna ve, desde el lado del riesgo, peligros que toma en serio únicamente como riesgos» (Luhmann, 1992: 41).

De lo anterior se colige que un mismo hecho puede asumirse como riesgo o como peligro, si bien esto implica estar en uno u otro lado de la distinción, pero nunca en ambos a la vez. La argucia sistémico-constructivista de Luhmann resuelve esta dicotomía cuando estipula que la distinción *riesgo/peligro* transmuta en la distinción *decisores/afectados*, cuya significación social se manifiesta a modo de paradoja: el riesgo de unos (decisores) es el peligro de otros (afectados). Esto se cumple, incluso, cuando somos afectados por decisiones que también nosotros podríamos haber considerado como riesgos, de haber tenido la oportunidad de decidir: «Enfrentamos aquí una de las paradojas sociales clásicas: los riesgos constituyen peligros y los peligros son riesgos. Porque se trata, en efecto, de un mismo contenido que se observa gracias a una distinción que requiere de una diferencia a ambos lados. Lo que es igual resulta diverso» (Luhmann, 1992: 88). Contraponiéndolo al esquema riesgo-seguridad de los expertos técnicos, el esquema riesgo-peligro sirve a Luhmann como correlato de su teoría evolutiva sobre la sociedad funcionalmente diferenciada:

Si bien en todas las sociedades el futuro —desde el respectivo presente— es incierto, en las sociedades antiguas esta inseguridad podía hacerse presente como peligro venido de fuera. Esto llevaba a privilegiar la solidaridad social —que en cierto modo representaba una red de seguridad para superar los posibles peligros. Pero cuando, por el contrario, se trata de riesgos que la sociedad debe a decisiones consideradas racionales porque son necesarias para aprovechar las oportunidades o para evitar algo peor, entonces se arriba a consecuencias diametralmente opuestas. Se llega a conflictos entre quienes deciden y los afectados —conflictos entre cálculos del riesgo (efectuados en la mayoría de los casos en las organizaciones) y personas excluidas de las decisiones pero incluidas en las consecuencias. Porque lo que para “quien decide” es un ries-



go, para los afectados es un peligro venido de fuera —peligro que, sin embargo, tiene su origen en la misma sociedad, precisamente en la decisión a la cual se atribuye (Luhmann, 2006: 421).

Según este esquema conceptual, entonces la diferenciación histórica de la sociedad contemporánea con respecto al pasado no ha de verse tanto como una cuestión de los nuevos megapeligros de potencial catastrófico, tal y como resalta Ulrich Beck, sino en el hecho de que la mayoría de los peligros (viejos y nuevos) devienen riesgos importantes, pues sus posibles daños son atribuibles a decisiones humanas, incluso aunque no pueda identificarse como causante culpable a una instancia decisora: persona, organización o sistema social. Por ejemplo: antes se asumía que una inundación costera tras un huracán era producto de las fuerzas impredecibles de la naturaleza. En este primer caso se trataba de un peligro o amenaza provocado externamente. Pero ahora también puede observarse que esas inundaciones se han agudizado por la subida de la temperatura de las aguas como consecuencia del cambio climático. En este segundo caso, aunque para los afectados siga siendo un peligro, ya es el resultado de un riesgo porque el mismo daño o su mayor severidad son atribuidos a una decisión humana: el consumo de combustibles fósiles y el consiguiente aumento de la emisión de CO<sub>2</sub>.

Asimismo, el peligro de adelgazamiento de la capa de ozono ya es consecuencia de la decisión de utilizar los clorofluorocarbonos (CFC), aunque nadie imaginó que este sería el riesgo de introducir esa familia de gases en la industria como refrigerante y propelente de aerosoles. O como resume este ejemplo más sencillo del propio Luhmann: «El peligro de mojarse en caso de lluvia (un evento incontrolable en el medio ambiente) se ha transformado en riesgo con el invento del paraguas, ya que el peligro de empaparse ahora es consecuencia de la decisión de echar (o no) mano de él» (Corsi *et al*, 2006: 193). En resumen: si estamos «en riesgo», todavía podemos decidir nosotros mismos con respecto a la posibilidad de daño; si estamos «en peligro», otros ya decidieron sin nosotros y, por tanto, solamente resta que seamos —o no— afectados. Los riesgos son resultado de nuestras propias decisiones, mientras que los peligros significan que podríamos ser afectados por riesgos que otros han provocado. Con respecto a cierta y determinada posibilidad de daño, siempre estamos del lado del riesgo (como decisores) o del lado del peligro (como afectados), pero nunca en ambos lados a la vez.

Mientras que antiguamente las desgracias eran atribuidas a los dioses, destino o naturaleza, ahora se atribuyen a la responsabilidad humana. Esto trae consigo una transformación de la temporalidad, «ya que el futuro depende en todos los aspectos esenciales de decisiones que pueden tomarse actualmente, de modo que siempre se decide ahora sobre los presentes futuros, aunque el futuro no puede conocerse» (Luhmann, 2006: 869). El futuro no constituye ya la intransparencia de lo venidero, sino que parece accesible cuando se toman decisiones, y lo que por fin acontezca podrá explicarse por decisiones tomadas previamente. Aquí debería verse la razón más profunda de los cálculos cuantitativos de riesgos con el fin de conseguir racionalmente un consenso social, aunque no exista la seguridad absoluta. Puede ocurrir que esos cálculos fallen, incumpléndose lo considerado probable e irrumpiendo lo improbable como contingencia. A esto se refiere Luhmann cuando sentencia: «Aunque se sabe que una

planta nuclear solo explota cada doce millones de años, esto podría acontecer mañana y mañana y, de nuevo, mañana» (Luhmann, 1992: 52).

Este afán anticipatorio del futuro se ha convertido en una meta demasiado ambiciosa que excede las capacidades de la sociedad funcionalmente diferenciada. Si el riesgo de unos es el peligro para otros, ¿cómo puede soportar esto un orden social? La reflexión metaconceptual de Luhmann lleva recursivamente al punto de partida: la improbabilidad de la comunicación, ya que esa distinción entre riesgo y peligro «marca una diferencia social explosiva dentro de la sociedad: la de los que toman las decisiones y la de los que las padecen» (Bechmann, 1995: 84). Esto explica que la problemática del riesgo presuponga un conflicto estructural de imputación irrevocable, pues los afectados siempre incriminarán a los decisores por las consecuencias no deseadas. Como el futuro siempre será abierto y contingente, tanto los que están a favor de una decisión como los contrarios a su adopción contarán con buenas razones para aferrarse a sus observaciones de primer orden. Por eso difícilmente podrá convencerse de negociar la aceptabilidad de un riesgo a quienes hayan padecido o habrán de padecer sus daños presumibles como peligro que puede traspasar el umbral de catástrofe.

#### *Indefinición del umbral de catástrofe sociorradioecológica*

A la incalculabilidad del umbral de catástrofe atribuye Luhmann que los análisis cuantitativos de riesgo no tengan ninguna posibilidad de suscitar consenso político. Los resultados de un cálculo de ese tipo son aceptados —si es que se aceptan— únicamente si se trata de peligros que no llegan a ese umbral. Este puede fijarse de manera muy diversa, según sea el caso de que se participe en el riesgo como portador de decisiones o como afectado por las decisiones riesgosas (Luhmann, 1992). Desde esta perspectiva constructivista radical, nuestra hipótesis del carácter único del riesgo nuclear y radiológico se refuerza debido a la indefinición del umbral de catástrofe sociorradioecológica. Seguimos teniendo en cuenta las tres características señaladas por Beck para caracterizar la «incertidumbre manufacturada» (deslocalización, incalculabilidad y no-compensabilidad), ya que definen el potencial catastrófico de la energética nuclear como nuevo megapeligro desde una perspectiva realista (ver subacápite 5.1.2). Conjugando ambos enfoques (realista y constructivista social), retomaremos ahora la posibilidad de una «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa», tal y como adelantamos al criticar la International Nuclear and Radiological Event Scale (INES). Este será el colofón de nuestro análisis sincrónico y diacrónico de los grandes accidentes históricos: Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima Daiichi...

El esquema riesgo-seguridad se resiente por primera vez durante los sucesos de Three Mile Island, cuando se cumplieron los temores señalados por el análisis probabilístico del informe Rasmussen (ver subacápite 2.2.1). Este dictamen técnico había predicho que fallas mínimas, pero interrelacionadas, podían conducir a la fusión del núcleo del reactor por pérdida del refrigerante (LOCA). Sin embargo, al comunicar sus conclusiones, se había optado por destacar eufemísticamente que la probabilidad de morir al año en Estados Unidos por causa de 100 plantas nucleares en funcionamiento era tan irrisoria como perecer por causa

de la caída de un meteorito:  $10^{-9}$ /reactor-año; o sea: un muerto cada mil millones de años. Efectivamente, TMI-2 no reportó ninguna víctima mortal y, según los reportes oficiales, la liberación radiactiva fue insignificante. Pero bastó la especulación mediática sobre la posibilidad del «síndrome de China» para que ese accidente nuclear fuera percibido socialmente como advertencia o presagio de un desenlace catastrófico (ver subacápite 2.3).

Siete años después, como quiera que el desastre de Chernobyl habría escapado por sus características a todo análisis probabilístico, se confirmaba la inoperancia de los cálculos cuantitativos del riesgo para la argumentación política sobre la seguridad de las centrales atómicas. Fue a partir de esta tragedia que el esquema riesgo-seguridad se resquebrajó públicamente para siempre, pues hasta ese momento se excluía una explosión de un reactor nuclear con liberación incontrolada de radionucleidos. Ninguna normativa se refería a esta posibilidad ni remotamente, por lo que la comunidad tecnocientífica nuclear a nivel internacional —entiéndase, el OIEA— se vio obligada a buscar nuevas formas de comunicación social para apaciguar los estados de opinión en su contra. La INES fue concebida para unificar las declaraciones nacionales sobre los sucesos adversos y, de esta manera, no dar pábulo a la especulación mediática.

Mientras que dicha escala internacional de siete niveles servía como recuento de los accidentes pasados hasta Chernobyl, a la misma vez se dejaba bien claro que este último era un caso excepcional debido a violaciones sistémicas de la seguridad nuclear en la Unión Soviética. A la par de esa proyección pública altamente politizada, se aprovechaba para acometer una revisión conceptual del esquema riesgo-seguridad, reconociendo el factor humano como el único eslabón débil de la energética nuclear. El OIEA definió su nuevo credo filosófico práctico como «cultura de seguridad» en el documento INSAG-4. Para ello invoca en su introducción a la cláusula anglosajona de fuerza mayor como eximente: «Con excepción de lo que a veces se denominan “actos de Dios”, todos los problemas que puedan surgir en una central nuclear tienen en cierta forma su origen en el error humano» (IAEA, 1991: 5).

Tanto este apotegma del INSAG-4 como la conclusión altisonante del informe Rasmussen ilustran el modo de atribución que profesan los expertos nucleares. Por heterorreferencia se invoca a peligros ontológicamente no controlables (actos de Dios, meteoritos...) para subrayar autorreferencialmente la capacidad ingenieril de mantener el control del sistema tecnológico. Es así que los riesgos son considerados un déficit residual de la seguridad ya alcanzada. En último caso quedaría algún resto de inseguridad debido a las imperfecciones humanas, aunque estas también pudieran ser calculadas y neutralizadas. Sin embargo, este filosofema práctico se enfrentó a una nueva problemática después de Chernobyl: *¿dónde, cuándo y cómo situar el umbral de catástrofe que desafía el cálculo cuantitativo del riesgo nuclear y radiológico como de bajísima probabilidad?* La ausencia de una respuesta se debe a que, dentro del esquema riesgo-seguridad, no pueden encuadrarse los eventos consiguientes a la pérdida del control tecnológico, cuando el potencial destructivo se desencadena irreversiblemente a partir de cierto punto. Por eso posiblemente nunca pueda explicarse si fueron una o dos explosiones del RBMK-1000 durante su embalamiento neutrónico. En vista de ello,

Edward Teller y Andrei Sajárov, artífices de la bomba de hidrógeno, coincidieron en que las centrales atómicas debían construirse bajo tierra (ver subacápite 2.4.4).

A partir de entonces, la experticia nuclear tuvo que adoptar una observación de segundo orden para evaluarse a sí misma de cara al amplio público mediante la aplicación de la INES. Tratándose de accidentes superiores a la base de diseño (BDBA) como Three Mile Island y Chernobyl, esto ya implicó asumir la distinción riesgo/peligro, dado que se había incumplido la seguridad probable. Algo así solamente es posible cuando se evalúan los sucesos pasados en retrospectiva, ya que hay suficiente tiempo para cambiar del esquema riesgo-seguridad al esquema riesgo-peligro y, de esta manera, tratar de clasificar aquellos por su gravedad. Pero cuando se trata de aplicar la INES en tiempo real a un nuevo BDBA en curso, como sucedió por primera vez durante Fukushima Daiichi, se impone el problema de la autorreferencia/heterorreferencia: los ingenieros nucleares no pueden ocuparse de la defensa en profundidad y, a la misma vez, autoobservarse cuando pierden el control tecnológico.

Dado que los propios errores humanos —así como la automática que pretende evitarlos— son factores cruciales de las perturbaciones incontrolables, cuya simultaneidad causal escapa a toda escala temporal, el traspaso del umbral de catástrofe cae en el punto ciego de la observación de primer orden. Tampoco una observación de segundo orden *a posteriori* podría precisar ni cuándo ni cómo se inició la irreversibilidad de los procesos incontrolados. En plena sintonía con Charles Perrow y su teoría de los *Normal Accidents* (NAT) basada en el concepto de acoplamiento rígido (*tigh coupling*), Luhmann considera que la energía nuclear es el ejemplo clásico de alta tecnología cuyas fallas de rápido desarrollo exceden los límites del control humano. De ahí el empleo de tecnología de seguridad adicional para tratar de garantizar «la exigencia paradójica de no ser puesta fuera de operación, a pesar de una interrupción en la operación» (Luhmann, 1992: 78). Pero si esa tecnología adicional también falla —como sucedió en Fukushima Daiichi con los generadores emergentes de energía eléctrica—, se produce inevitablemente el desenlace catastrófico.

¿Son capaces los ingenieros nucleares de reconocer su ignorancia sobre el traspaso del umbral de catástrofe? Acostumbrados al esquema de déficit cognitivo, según el cual hay que convencer al público desinformado, ellos son reacios a ventilar públicamente los intrínquilos más profundos del empleo de la fisión atómica. Esto explica su mutismo cuando ocurre un BDBA, hasta que la comunidad tecnocientífica nuclear es emplazada por el subsistema político a reconocer su culpabilidad. Entonces los expertos técnicos se ven obligados a optar por uno u otro lado de la distinción riesgo/peligro; o sea, a pronunciarse en favor de los decisores o en favor de los afectados. Esta disyuntiva supone un conflicto político y moral, dado que el umbral de catástrofe es determinado de manera muy distinta por los movimientos de protesta y, sobre todo, por los medios masivos de comunicación. No hay neutralidad ni equidistancia posibles durante un escenario catastrófico. La brecha epistémica entre expertos y laicos, así como las controversias entre los propios expertos, se polarizan hasta difuminarse bajo este prisma luhmanniano: «Divergen la situación de riesgo de los que deciden y la situación del peligro de los afectados. El riesgo de uno es el peligro del otro» (Luhmann, 1992: 128).

Si concordamos con el modelo sintético de Luhmann sobre la unidad operativa de los tres elementos: información, dar-a-conocer y comprensión (ver infografía 18), la disfuncionalidad comunicacional de la INES representa un alto riesgo en sí misma, pues su confusa asignación de niveles acrecienta la improbabilidad de la comunicación entre decisores y afectados. Sería totalmente contraproducente que, en caso de BDBA, dicha escala fuese aplicada en términos precautorios tales como: «El evento es al menos un nivel 3. Puede haber ocurrido una liberación de material radiactivo y estamos buscando establecer la magnitud para proporcionar una calificación INES más precisa (...)» (ver subacápite 5.1.2). Que la asignación de cada nivel como *información* sea acompañada con el *darla-a-conocer* de que se espera algo peor, aunque de magnitud todavía desconocida, dificultaría la *comprensión* del mensaje por parte del amplio público. Amplificada por los *mass media* y redes sociales, la incertidumbre sobre una liberación radiactiva cada vez mayor —incluida la posibilidad de un venteo sin previo aviso— suscitaría el rechazo de los afectados a la comunicación, movilizándose a actuar por su propia cuenta. Podrían desatarse evacuaciones masivas, rompiendo los planes de emergencia por muy racionalmente que hayan sido previstos para el caso de contaminación transfronteriza. La aplicación de la INES en tiempo real terminaría allí cuando ya se ha traspasado el umbral de catástrofe sociorradioecológica. Tal es así que, de explotar un reactor como sucedió en Chernobyl, este accidente hipotético alcanzaría el máximo nivel 7 en tan poco tiempo, que dicha escala no serviría para nada.

Este nivel 7 sería el preámbulo de sucesos más complejos que aumentarían la improbabilidad de la comunicación del riesgo nuclear y radiológico. Son todos aquellos relacionados con la aplicación de los criterios radiológicos para emprender las acciones protectoras durante una situación de exposición de emergencia y el tránsito paulatino a una exposición existente (ver infografía 14). La experiencia de Chernobyl demostró que la amenaza para mujeres embarazadas y niños fue el principal motivo de conflicto irresoluble entre decisores y afectados, mientras arreciaban las disputas entre los propios radioproteccionistas sobre cuál debía ser el tope del riesgo tolerable para los habitantes de las zonas contaminadas. Al secretismo gubernamental sobre las consecuencias radiológicas durante los primeros cinco años de la tragedia, se añadía que no existiera un consenso internacional sobre cuál debía ser el criterio cuantitativo óptimo para decidir tales medidas de protección (ver subacápites 3.4.3).

Un escenario semejante se repitió en Fukushima Daiichi, con el agravante del precedente de estigmatización al que fueron sometidos los *hibakusha* de Hiroshima y Nagasaki. Renació el viejo temor a la posibilidad de malformaciones del feto y efectos genéticos heredables en la progenie. Este drama sociopsicológico —y, a la vez, antropológico cultural— no puede abordarse con el modelo unidireccional de déficit cognitivo, según el cual bastaría el suministro de información objetiva para revertir la percepción emocional y hasta irracional de la radiación ionizante por las madres y padres afectados. Para ellos no se trata de un riesgo, sino de un peligro categórico, no calculable, no comparable, inconmensurable... Difícilmente algún criterio de aceptabilidad y/o tolerabilidad del riesgo podría convencerlos de no evacuarse o, si ya lo han hecho, regresar a sus

lugares de origen, ya que está en juego la salud de sus hijos. Esta es la conclusión de las investigaciones sobre el terreno realizadas por el proyecto franco-japonés SHINRAI («confianza» en japonés), tipificando ese conflicto comunicacional como «conmensurabilidad de los riesgos *versus* cuidado paterno “absoluto”» (ver subacápite 3.1.2).

Mientras que para los radioproteccionistas, en su rol de decisores desde la *perspectiva del riesgo*, el límite de dosis permisible representa un constructo matemático de carácter socioestadístico —o sea, para ellos ese valor de dosis efectiva es solamente un indicador «virtual»—, en cambio para los afectados se trata de la posibilidad de daños biológicos reales desde la *perspectiva de peligro*. Quiere decir: una misma información será interpretada y/o entendida de modo diferente por una y otra parte, decisores y afectados. Por eso los damnificados de Fukushima Daiichi rechazaron que dosis efectivas individuales de 20 a 100 mSv (aguda o por año) fuesen tolerables después del desastre, cuando dosis superiores a 1 mSv eran inaceptables antes de haber ocurrido. Fue imposible persuadirlos de que este menor límite de dosis se aplica a la suma de las dosis provenientes de fuentes reguladas en situación de exposición planificada, mientras que una dosis residual mayor es admisible para una exposición de emergencia o existente. Al generar este tipo de paradojas, la improbabilidad de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico es el verdadero motivo de la desafortunada generalización de la doctrina ALARA a los accidentes nucleares severos como filosofía práctica de optimización con base en el Modelo Lineal Sin Umbral (LNTM).

A esa disrupción del proceso comunicacional entre decisores y afectados es lo que llamamos «implosión informativa». Significa que la conexión entre información, dar-a-conocer y comprensión termina rompiéndose debido a las discrepancias irresolubles entre la perspectiva de riesgo y la perspectiva de peligro. Al observar las selecciones del otro como impredecibles, *alter (ego) afectado* percibe que una amenaza o peligro para sí mismo es solamente un riesgo para *ego (alter) decisor* —y viceversa—, por lo que difícilmente ambos puedan superar la doble contingencia en una situación límite. Este antagonismo de *alteregos* se vuelve aún más irreconciliable cuando se pierde la confianza en el saber de los expertos como autoridad. Si el afectado (persona, organización o sistema social) evalúa las posibilidades y la magnitud del daño de manera distinta al que decide, por muy experto que este sea, nada cambiaría porque ambas partes intenten procesar más información a su favor. Todo lo contrario: el deseo de estar más informado respondería a una creciente pérdida de confianza mutua. La improbabilidad de la comunicación se acrecentaría debido al exceso informativo de «no saber» por implosión del conocimiento. El traspaso del umbral de catástrofe socioradioecológica se produciría a modo de «*blackout* informativo» en analogía al apagón eléctrico, cuando se pierde toda fuente de luz y reina la oscuridad.

### 5.2.3/ *El punto ciego de Fukushima Daiichi: ¿Cuán vulnerable es lo suficientemente seguro?*

La catástrofe de Fukushima Daiichi derrumbó el criterio de una *seguridad suficientemente segura* con respecto a los «actos de Dios» o peligros de origen ontológicamente no

controlable. Si en un principio los expertos japoneses consideraron este desastre como un «cisne negro», alegando que la confluencia entre terremoto, tsunami y *blackout* era impredecible, finalmente la OIEA reconoció que este argumento era insostenible, entre otras razones porque «los análisis de seguridad no determinaron la vulnerabilidad de la central a las inundaciones (...)» (ver subacápite 2.5 e infografía 9). Este reconocimiento de la *vulnerabilidad* como punto ciego de la evaluación probabilística ocurría por primera vez oficialmente en la esfera nuclear. Pero este término se manejaría por los expertos solamente como «vulnerabilidad con respecto a los sucesos externos», arguyéndose que se trata de una deficiencia de las centrales atómicas más antiguas de segunda generación. Una vez que fueron realizadas pruebas de resistencia a tales instalaciones, se concluyó que esa herencia tecnológica podía ser subsanada fortaleciendo la defensa en profundidad (DiD) —específicamente su cuarto nivel—, incluyendo acciones suplementarias de mitigación: el venteo preventivo de la contención radiactiva, por ejemplo (ver subacápites 2.2.2 y 2.5.1).

Al tener que prestarse mayor atención a la impredecibilidad de las amenazas externas, Fukushima Daiichi produjo un cambio en la filosofía práctica de la seguridad nuclear. Sin embargo, parapetados en el concepto de «robustez» (*robustness*), los ingenieros nucleares son remisos a reconocer que la vulnerabilidad constituye una condición intrínseca de los sistemas tecnológicos complejos rígidamente acoplados, tal y como propugna la teoría de los *Normal Accidents* (NAT). Para su autor, Charles Perrow, el *3.11 disaster* demostró que el análisis probabilístico del riesgo debe complementarse con el análisis «posibilista» o «enfoco del peor caso» (*worst-case approach*). De acuerdo con esta propuesta original del también sociólogo Lee Clarke, se trata de «esperar lo inesperado» (*expect the unexpected*), oteando aquellos escenarios sin precedentes por muy improbables que parezcan (Perrow, 2011; Clarke, 2005). Esta sería la mejor manera de prepararse para los desastres nucleares, aprovechando que las personas son posibilistas por naturaleza, pues se enfrentan constantemente a lo inesperado en la vida cotidiana. Por eso es muy difícil convencerlas con argumentos de corte probabilista, tal y como pretenden los expertos técnicos.

A este posibilismo del «peor caso» —«peor accidente imaginable», diría Ulrich Beck— se adscribe nuestra conjetura de una socioecorradiocatástrofe por implosión informativa. Para desarrollarla se necesitaría la apertura de un enfoque crítico desde los estudios CTS que sirva de contrapartida homóloga al análisis ingenieril de los BDBA o accidentes severos (Severe Accident Analysis, SAA), el NaTech Risk Management y otras disciplinas emergentes relacionadas con los nuevos escenarios de desastre nuclear. Que se asuma la indefinición del umbral de catástrofe sociorradioecológica como una problemática comunicacional propiciaría la avenencia entre la noción realista del riesgo de los expertos técnicos (ingenieros y radioproteccionistas) y la noción socioconstructivista del riesgo que tienen los científicos sociales. Este entendimiento podría intentarse sobre la base de la noción de *vulnerabilidad*, considerándola la tercera distinción —junto a *peligro* y *seguridad*— que cierra el triángulo epistemológico del *riesgo* como concepto que ofrece diferentes perspectivas a los observadores.

### *Del esquema riesgo-seguridad al esquema riesgo-vulnerabilidad*

Siempre de acuerdo con Luhmann, el *riesgo* es aquella decisión tomada en el presente a la que se atribuye un daño futuro que podrá ser evitado o no, según sea la contingencia. Por *peligro* consideramos la capacidad ontológica de infringir daño realmente. Que el riesgo para los decisores sea el peligro para los afectados depende de la *vulnerabilidad* de estos últimos, entendiéndola como predisposición intrínseca a ser susceptibles de daño. Aunque no hay una teorización luhmanniana sobre el concepto de *vulnerabilidad*, este puede relacionarse con el concepto de *resonancia* que el sociólogo introduce al referirse a la capacidad estructural de los sistemas sociales para asimilar hacia el interior de sí mismos las perturbaciones del entorno: natural, tecnológico o demás subsistemas funcionales. Mientras el *peligro* es el factor externo del riesgo (heterorreferencia), la *vulnerabilidad* es el factor interno del riesgo (autorreferencia). No hay peligro sin vulnerabilidad, ni vulnerabilidad sin peligro. La *seguridad* es la aspiración de minimizar ambos factores del riesgo (externo e interno), aunque sabiendo que estos nunca podrán ser suprimidos totalmente, pues hasta no decidir es riesgoso.

A partir de este despeje conceptual, ya de nuestra propia cosecha, proponemos un enfoque socioconstructivista-posibilista del esquema riesgo-vulnerabilidad paralelamente al enfoque realista-probabilista del esquema riesgo-seguridad (ver figura 17)<sup>81</sup>. Ambos enfoques tributan a la dilucidación del peor caso o accidente imaginable como riesgo-peligro: desastres *NaTech* y otros tipos de BDBA, incluidas sorpresas tecnológicas, así como la amenaza de terrorismo. Bajo la observación de los posibles afectados, los expertos nucleares se verían obligados a reingresar en el esquema riesgo-seguridad para replantearse ese peor caso posible mediante la cuantificación y medición de los indicadores técnicos. Por su parte, bajo la observación de los decisores, los científicos sociales reingresan al esquema riesgo-vulnerabilidad para replantearse la resiliencia de la sociedad a sobrevivir o recuperarse en ese peor caso posible, aun cuando los expertos nucleares afirmen que la seguridad estará suficientemente garantizada. Es así que validamos la distinción *riesgo/vulnerabilidad* como contrapartida a la distinción *riesgo/seguridad*, teniendo a la distinción *riesgo/peligro* como dovela central o piedra clave de ese arco del conocimiento (o desconocimiento).

Esta mutua observación de segundo orden entre decisores y afectados, entre expertos técnicos y científicos sociales, permite salirse del marco analítico del dilema regulación/promoción de la energética nuclear, pasando al marco analítico de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico (comparar figuras 12 y 17). En lugar de *¿cuán seguro es lo suficientemente seguro?* (*How safe is safe enough?*), se entroniza la interrogante: *¿Cuán vulnerable es lo suficientemente seguro?* (*How vulnerable is safe enough?*). La negociación del riesgo aceptable y/o tolerable deja de tener como meta la búsqueda de un consenso mutuo, dándolo por improbable. Ahora se trata de propiciar una voluntad de

---

<sup>81</sup>Esta propuesta nuestra coincide en muchos aspectos con la visión socioconstructivista de los estudios CTS que considera la *vulnerabilidad* como una característica inevitable de la cultura tecnológica (Bijker, 2006, 2009; Hommels, Mesman y Bijker, 2014). Validado después de los sucesos terroristas del 11/9, este enfoque se ha aprovechado para subrayar la importancia de los métodos participativos en la elaboración de los planes de emergencia nuclear tras Fukushima Daiichi (Rossignol, 2016).



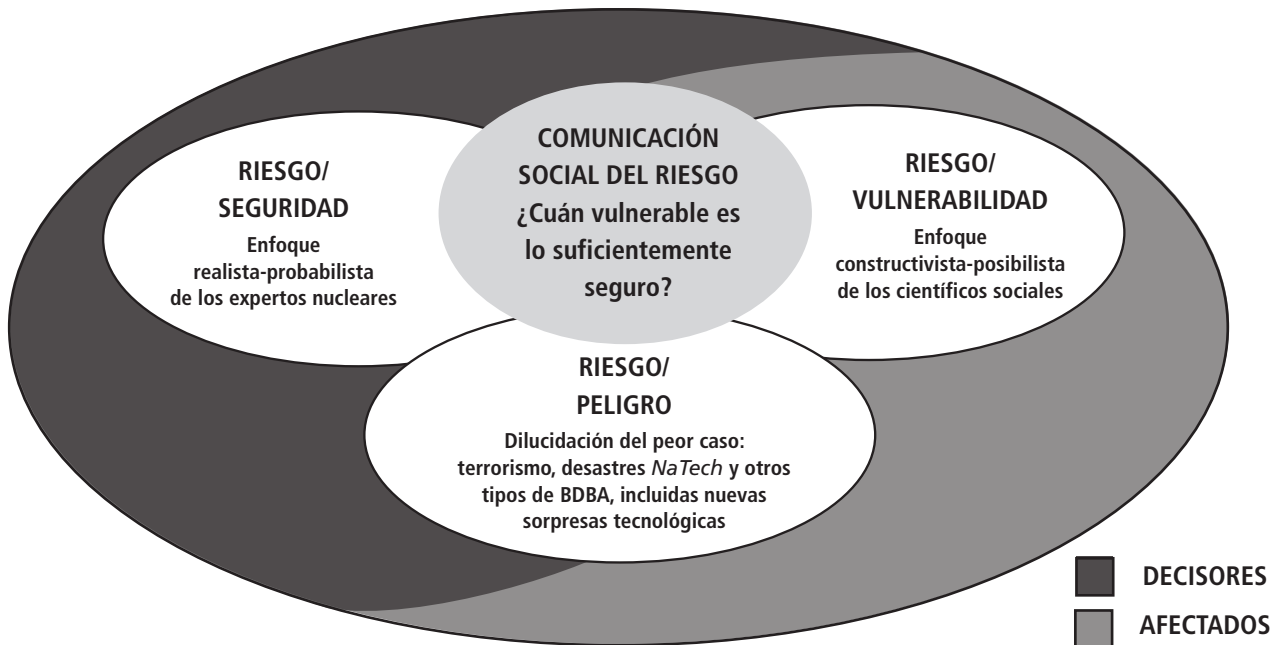


Figura 18: Nuevo marco analítico de la comunicación social del riesgo nuclear y radiológico. Fuente: elaboración propia.

diálogo permanente entre decisores y afectados para llegar a acuerdos renegociables. Este proceder sería ese estado de «entendimiento no convencido» (*Verständigung*) del que habla Luhmann, concibiéndolo como un proceso de discusión continua sobre los riesgos tanto esperados como inesperados. Esta sería la única manera de enfrentar el gran dilema que plantea su teoría social: «¿Puede la comunicación resultar de alguna utilidad allí donde reina la desconfianza y allí donde los participantes se observan entre sí, recurriendo a diversas distinciones?» (Luhmann 1992: 92).

Tanto Chernobyl como Fukushima Daiichi revelaron el estrecho vínculo entre las élites políticas y las élites de la experticia nuclear. Por eso identificamos genéricamente a los decisores con los ingenieros y radioproteccionistas. Su disposición al diálogo sobre la vulnerabilidad se verá condicionada por aquellos sesgos epistémicos que —tal y como identificó Brian Wynne— impiden a los expertos técnicos reconocer factores de riesgo indeterminados que desafíen sus propios modelos o encuadres de la realidad (ver subacápite 4.4). Como manifestación de un realismo empírico de orientación materialista, esta postura epistemológica se encuentra en el sustrato de los valores y normas de la ingeniería nuclear, pero cada vez resulta más limitada cuando se aplica al campo de la radioprotección. *¿Cuán vulnerable es el ser humano a las bajas dosis de radiactividad artificial por encima del fondo natural?* El carácter único del riesgo nuclear y radiológico se resume en esta interrogante para la cual no hay respuesta bajo el enfoque realista-probabilista de los expertos nucleares. De ahí que fuera considerado un problema «transcientífico» por Alvin Weinberg; o sea, un problema cuya posibilidad de solución «supera a la ciencia» (ver subacápite 4.2.1).

Si alguna tendencia puede vislumbrarse cuando se analizan diacrónicamente los grandes accidentes nucleares históricos es que el *no-saber* sobre las consecuencias de la exposición prolongada a bajas dosis de radiación ionizante seguirá intensificándose

hasta convertirse en incertidumbre social irreductible. La improbabilidad de la comunicación de ese *no-saber* es el gran desafío para los estudios CTS que se dediquen a los nuevos escenarios de desastre nuclear bajo el enfoque socioconstructivista-posibilista. El reconocimiento de la gravedad del peor caso ya no dependerá de la liberación radiactiva en terabecquerelios (TBq), tal y como estipula la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES). Con el rápido aumento de las redes sociales y las nuevas tecnologías informáticas y de comunicación (TIC), los propios afectados se sentirán capaces de evaluar por sí mismos la gravedad de la contaminación radiactiva, desafiando la primacía de los decisores gubernamentales. Esta ha sido una de las principales lecciones de Fukushima Daiichi: mientras mayor sea la cautela o regodeo de los expertos técnicos para proporcionar información en situaciones de emergencia radiológica, más fuerte será la aspiración del público laico a recabar esa información por sus propios medios, considerando que los reportes oficiales son limitados, esporádicos o poco fiables. El mejor ejemplo fue la respuesta ciudadana al fracaso de la aplicación del System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (SPEEDI)<sup>82</sup>.

La difusión de las mediciones radiológicas mediante sensores (radiómetros) conectados a través de las redes sociales basadas en los principios y tecnologías de la Web 2.0 se convirtió en un recurso alternativo que usaron los damnificados para percibir y representar la amenaza radiactiva. Esta manifestación de *crowdsourcing* (producción participativa) facilitó la recopilación de datos radiológicos en tiempo real con contadores Geiger dotados de GPS para la geolocalización, permitiendo que esta información fuera procesada simultáneamente por los usuarios de internet en diferentes puntos geográficos (Segault, 2017). De esta manera, aunándose en comunidades virtuales, las víctimas del *3.11 disaster* crearon sus propios mapas de la contaminación radiactiva, así como aplicaciones móviles que combinaban esas mediciones con datos de las condiciones meteorológicas para predecir la propagación de radionucleidos. Sin embargo, estas iniciativas ciudadanas comportan un altísimo riesgo en sí mismas por el mal empleo o descalibración de los radiómetros, confusión de las unidades de medida y otras ambigüedades de la protección radiológica que resultan harto complejas hasta para los propios especialistas (ver subacápite 3.4.1 e infografía 13).

Reconociendo la legitimidad de esas prácticas colaborativas a pesar de sus grandes limitantes, se comienza a reflexionar hasta qué punto podrían ser potenciadas mediante las tecnologías de la Web semántica para satisfacer las necesidades de información de los afectados y así facilitar su actuación independiente. Con ese objetivo se maneja que las TIC

---

<sup>82</sup>Este sistema automatizado de simulación fue implementado por los radioproteccionistas japoneses desde la década de 1980 para predecir la dispersión de radionucleidos y sus consecuencias radiológicas en emergencias nucleares. Su cometido es ayudar a decidir la evacuación de los damnificados, evitando cualquier exposición adicional a la radiación artificial, además de facilitar la optimización de esas medidas disruptivas. Sin embargo, los resultados del SPEEDI fueron desestimados por los propios expertos durante el *3.11 disaster* con el pretexto de que las estaciones de medición de ese sistema quedaron dañadas por el terremoto y el *blackout*. Otra versión aduce que el verdadero motivo fue el temor a la divulgación de sus resultados, pues podrían desatarse evacuaciones injustificadas. Algunos expertos consideran que las predicciones del SPEEDI necesitan una interpretación muy cuidadosa para evitar disfunciones, por lo que no resultan aptas para el dominio público. Otros consideran que, por una cuestión de transparencia, hasta sus datos en bruto debieran divulgarse a través de internet y/o televisión como si fueran el pronóstico de un tifón (Sugawara y Juraku, 2018).

podrían acortar la brecha epistémica entre expertos y no expertos gracias a una interoperatividad semántica que «horizontalice» automáticamente el intercambio de conocimientos (Segault, 2017; Segault *et al*, 2019). No obstante, un primer obstáculo es que los contenidos de la protección radiológica —incluyendo las normativas de la ICRP— fueron concebidos únicamente para el consumo de los especialistas. Además, erróneamente, este tipo de enfoque meramente informacional olvida que el antagonismo entre los mismos expertos ha sido el motivo de la profundización de esa brecha epistémica con respecto al público lego (ver subacápite 3.1.2). Por tanto, el empleo de las TIC podría acrecentar las divergencias entre decisores y afectados en lugar de aplacarlas.

¿Quién decidirá las órdenes de evacuación en caso de que una dispersión radiactiva transfronteriza sea detectada por los afectados y ocurra de manera distinta a como vaticinaron los expertos? ¿Cuáles criterios de dosis permisible serían considerados válidos si cunde la desconfianza de los damnificados hacia las pronósticos de la experticia? A ese conflicto radiológico se une la cantidad e inmediatez de las informaciones textuales, imágenes y vídeos tomados directamente del lugar del desastre nuclear mediante telefonía móvil y mensajería instantánea. Aunque la autoridad de la fuente sea irreconocible, se trataría de información en tiempo real que podría ser seguida a través de twitter, facebook, youtube... y otros medios ciudadanos como los blogs y foros virtuales, además del buscador Google. Estos servicios funcionarían como sistemas de alerta temprana, adelantándose a los medios tradicionales: prensa escrita, radio y televisión<sup>83</sup>.

A diferencia de Three Mile Island y Chernobyl, cuando todavía no existía internet, luego de Fukushima Daiichi ya se vislumbra el inmenso desafío que significará una nueva catástrofe sociorradioecológica de magnitud global cuando su umbral catastrófico será determinado por esas dinámicas comunicativas alteradas, sobre cuyo impacto a escala societal todavía no se tiene una idea clara. Las consecuencias de la informatización de la sociedad son tan impredecibles que la teoría del riesgo y la incertidumbre deberían reservar un lugar de indeterminación para no perder de vista esa impredecibilidad. Un desastre nuclear de alcance transfronterizo sería una ruptura tal del orden social que no pueden preconcebirse estrategias de afrontamiento basadas en aspectos estandarizados como la cantidad de daño, el número de víctimas u otros indicadores economicistas de coste/beneficio para una supuesta optimización de las evacuaciones y normalización de los territorios contaminados. Cómo «desimprobabilizar» la comunicación social del riesgo se convierte en el tema prioritario.

Al ser una comunicación de la ignorancia sobre los efectos perjudiciales de la radiactividad artificial, este vacío de conocimiento hará que predominen los sesgos o pautas culturales en la percepción pública del riesgo, tal y como sugirió Mary Douglas desde su perspectiva antropológica (ver subacápite 4.3). Si bien el peligro de la contaminación

---

<sup>83</sup>Por ejemplo: desde 2017 fue implementado Google SOS Alert, mientras que Facebook presentó Safety Check a fines de 2014, un sistema que utiliza la geolocalización para identificar a las personas potencialmente afectadas por una crisis e informar que están a salvo a sus contactos. Previsto inicialmente para desastres naturales, este servicio resultó muy útil durante los atentados terroristas de París en noviembre de 2015 (Segault, 2017).

radiactiva podría ser real o imaginado, a fin de cuentas el riesgo nuclear y radiológico terminaría siendo construido socialmente a partir de las vulnerabilidades propias de los afectados. Los niveles de resonancia serían tales que, en lugar de un solo umbral de catástrofe, se traspasarían varios umbrales en dependencia de cuál sea la afectación para cada sistema parcial de la sociedad funcionalmente diferenciada. La comunicación de protesta adoptaría formas inusitadas que ya no serían pacíficas, sino que podrían llevar a desenlaces violentos, si las consecuencias son más graves para otros países que para el propietario de la central electronuclear en desgracia. En este peor caso posible, el carácter único del riesgo nuclear y radiológico podría hasta manifestarse en su máxima expresión dilemática del doble uso (militar y civil), si surgiera la duda: ¿Será esta contaminación radiactiva el resultado de un ataque terrorista, y no un accidente por causa del error humano?

CONCLUSIONES:

¿EL ÁTOMO PACÍFICO SALVARÁ AL MUNDO?  
LA ENERGÍA NUCLEAR ENTRE LA GUERRA Y LA PAZ, EL BIEN Y EL MAL

Este trabajo de tesis doctoral se propuso dos metaobjetivos a partir del análisis sincrónico y diacrónico de los tres grandes accidentes históricos de la energética nuclear: Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) y Fukushima Daiichi (2011). El primer metaobjetivo ha sido el abordaje filosófico crítico de esa opción energética como tecnología política que, aun cuando se haya desarrollado con fines declaradamente civiles, se mantiene sujeta a su vínculo genesiaco con el complejo militar industrial. De ahí sus «dilemas ontológicos o morfogenéticos» como disyuntivas irresolubles que, si bien son construidas socialmente, tienen un origen o causa real: el poder destructivo, absoluto y subitáneo de la energía nuclear a partir de la fisión del uranio y el plutonio. A caracterizar ese nudo dilemático y cómo se ha ido tensando con cada accidente histórico se dedicó la mayor parte de nuestra investigación.

El segundo metaobjetivo fue contribuir a la superación de los escollos epistemológicos que limitan el abordaje crítico de la energética nuclear por los estudios CTS. Para lograr ambos metaobjetivos se implementó una metodología propia de doble enfoque (intratécnico y extratécnico) que permitió cumplir los objetivos parciales y responder a las problemáticas de investigación, cuyas hipótesis específicas se fueron corroborando capítulo a capítulo. De esta manera quedó validada nuestra hipótesis fundamental sobre el carácter único del riesgo nuclear y radiológico en los planos ontológico, epistemológico, semántico, axiológico y deontológico. Reconociendo ese «carácter único», se arguye finalmente que los estudios CTS deben encarar la problemática de la aceptabilidad social del riesgo nuclear y radiológico, reformulándola como improbabilidad de la comunicación cuando se traspasa el umbral de catástrofe. A continuación se sintetizan las razones esgrimidas para sostener este desafío epistemológico como el hito conclusivo de nuestra investigación en consonancia con cada dilema ontológico identificado.

*Dilema de doble uso (civil y militar):*

Mientras dependa de la fisión del uranio y el plutonio, la energética nuclear nunca podrá ser una tecnología netamente pacífica, ya que esos materiales físi-les son bélicos por naturaleza y sin posibilidad de «desnaturalizarlos». El riesgo de proliferación del arma atómica se encuentra subyacente al llamado «ciclo de combustible», urdido tanto en el *front end* como en el *back end* con respecto al reactor nucleoenergético. A la condición ontológica de este nexo intratécnico se debe que el dominio del átomo con fines pacíficos haya contribuido paradójicamente a que se consolidara su primigenio uso militar. Por eso debe descartarse cualquier pretensión de neutralidad científica, imponiéndose la necesidad de la «resistencia a la proliferación» (*proliferation resistance*). A esta conclusión arribamos luego de un pormenorizado análisis historiográfico, incluyendo bibliografía dedicada a los planes proliferantes de distintos países a lo largo de la historia.

Aunque en principio las categorías de bien/mal y civil/militar no sean reflejas, *el carácter único del riesgo nuclear y radiológico radica en que ningún otro riesgo tecnológico incuba la condición dilemática de «riesgo global» entre la guerra y la paz, el bien y el mal. Mientras los partidarios de la energía nuclear sostienen que salvará al mundo, sus detractores replican que podría contribuir a destruirlo.* Es por eso que al dilema del doble uso (militar y civil) supeditamos los demás dilemas morfogenéticos: dilema *siting and safety* (ubicación/seguridad) y dilema de las radiaciones ionizantes (sociorradioecológico). Esta triada dilemática conforma el dilema regulación/promoción como dilema de los dilemas o gran dilema de la energética nuclear.

#### *Dilema siting and safety (ubicación/seguridad)*

Al ser accidentes superiores a la base de diseño (Beyond Design Basis Accidents, BDBA), los tres grandes accidentes nucleares históricos sacaron a relucir las vulnerabilidades intrínsecas del principio de defensa en profundidad (Defence in Depth, DiD). Refrendamos la hipótesis que esta gran deficiencia se debe a la premura en la conversión de los reactores de origen militar para fines civiles, seguida por el aumento de su potencia sin tener en cuenta las limitaciones del sistema de barreras físicas para la contención radiactiva, el cual fue diseñado en un inicio siguiendo únicamente criterios deterministas. Son los casos de los reactores de segunda generación, tanto el prototipo PWR (Pressurized Water Light Reactor) de Three Mile Island y el prototipo BWR (Boiling Water Reactor) de Fukushima Daiichi, ambos de agua ligera (Light Water Reactors, LWR), así como el prototipo soviético RBMK-1000 (Light Water Graphite Reactor) de Chernobyl. A ellos podrían sumarse otros prototipos incluso más avanzados que, por ahora, no han protagonizado un accidente severo.

Entre los resultados del análisis intratécnico se destaca el haber logrado conciliar la perspectiva ingenieril con las reflexiones teóricas de los científicos sociales que reparan en las irreconciliables paradojas estructurales dictadas por la propia tecnología, tanto desde el punto de vista técnico como organizacional. Gracias a este enfoque combinado se obtuvo una acuciosa caracterización de esos accidentes nucleares severos y, de cierta manera, se pudo fundamentar por qué ocurren sorpresas tecnológicas para las cuales no hay una explicación concisa o, si las hay, tardaron en ser esclarecidas o existen diferentes versiones sobre las mismas. Con ese objetivo fueron revisados todos los informes oficiales sobre las causas de tales accidentes, cotejándolos con las regulaciones y normativas relacionadas con la seguridad nuclear; en especial, la documentación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Aunque sean supuestamente neutrales, esos documentos técnicos traslucen la intencionalidad política de las decisiones adoptadas después de cada BDBA, cuando fueron introducidos cambios en la concepción de la seguridad nuclear, a modo de rectificaciones en el principio de la DiD. Es lo que hemos identificado como «filosofía práctica» de los ingenieros nucleares, en el sentido de que estos asimilan las lecciones de sus fracasos, pero siguen aferrados al esquema riesgo-seguridad por un imperativo pragmático. De ahí gran

parte de su reticencia a aceptar la *vulnerabilidad* como propiedad intrínseca de los sistemas tecnológicos complejos, a cuya constatación heurística se dedicó nuestro abordaje sincrónico y diacrónico de ese derrotero accidentado. Mediante el análisis intratécnico se logró sistematizar que la vulnerabilidad tecnológica de la energética nuclear ha salido a relucir de las siguientes maneras con cada accidente histórico:

—durante el accidente de Three Mile Island (TMI-2), cuando por primera vez se produjo el llamado «fallo de causa común» (Common-Cause Failure, CCF), tardíamente identificado en el campo nuclear.

—durante el desastre de Chernobyl, cuando se produjo por primera vez la explosión de un reactor nucleoeenergético en la historia con la consiguiente liberación incontrolada de productos radiactivos artificiales al medio ambiente.

—durante el triple desastre (terremoto-tsunami-crisis nuclear) de Fukushima Daiichi, cuando volvió a repetirse el «fallo de causa común» como deficiencia potencial de los sistemas tecnológicos complejos que ya se había puesto de manifiesto en Three Mile Island. Solo que esta vez no fueron superadas únicamente las bases de diseño de una unidad, sino de toda la planta nuclear en pleno: seis reactores al unísono, más las piscinas de combustible gastado.

Si bien es cierto que Chernobyl no tiene parangón como primera catástrofe sociorradioecológica de magnitud global por sus consecuencias sanitarias, demográficas, sociales, políticas, económicas, culturales..., aun así clasificamos a Fukushima Daiichi como epítome del dilema *siting and safety*, ya que es la primera sociorradioecocatástrofe *NaTech* (Natural Hazard Triggering Technological Disaster). Del análisis intratécnico (sincrónico y diacrónico) de ambas catástrofes, además de Three Mile Island, se arriba a la siguiente conclusión:

*En comparación con otros riesgos asociados a los sistemas tecnológicos complejos, el carácter único del riesgo nuclear y radiológico radica en un mayor componente de incertidumbre (ontológica y epistémica), ya que siempre existirán factores de vulnerabilidad intrínseca cuyo origen es desconocido, se subestiman o se mantienen en secreto por los expertos nucleares, pudiendo deparar nuevas sorpresas tecnológicas. A pesar que sea considerado harto improbable —incluso, imposible— desde la perspectiva ingenieril, ya ni siquiera puede descartarse una gran explosión por supercriticalidad incontrolada de la reacción de fisión nuclear en cadena como resultado de los procesos irreversibles durante un BDBA.*

#### *Dilema de las radiaciones ionizantes (sociorradioecológico)*

Si el vínculo ontológico del dilema ubicación/seguridad con el dilema de doble uso (militar y civil) se remonta a la morfogénesis tecnológica de los dos tipos de bombas atómicas (de uranio enriquecido y de plutonio, respectivamente), el dilema sociorradioecológico es la consecuencia funesta de sus sendos lanzamientos sobre Hiroshima y Nagasaki. Todo lo que se conoce —o se desconoce— sobre los efectos perjudiciales de las radiaciones ionizantes en los seres humanos se relaciona con los resultados del Life Span Study (LSS): el seguimiento epidemiológico continuo de la mortalidad e inciden-

cia de cáncer y otras enfermedades en una muestra de unos 120 000 sobrevivientes de aquel bombardeo atómico. Por el origen de esa muestra y su fundamento epidemiológico, el LSS es considerado un estudio de cohorte de carácter único en la historia, al punto de catalogarse un «experimento vivo». De ahí que se haya impuesto la extrapolación de sus datos estadísticos como el modo de estipular los límites de dosis permisibles de acuerdo al modelo lineal sin umbral (LNTM) y, a partir de este, se preconice el principio de optimización ALARA como filosofía práctica de la protección radiológica.

De la misma manera que fueron identificados los cambios en la filosofía práctica de la seguridad ingenieril luego de cada accidente histórico, igualmente se pudo constatar el vínculo insoslayable entre ese derrotero accidentado y los cambios en la filosofía práctica de la protección radiológica. Para ello fueron analizadas comparativamente las normativas de la ICRP y del OIEA, así como los informes científicos del UNSCEAR que se refieren a las fuentes, efectos y riesgos de las radiaciones ionizantes. Uno de los resultados singulares de esta tesis doctoral es haber fundamentado que las catástrofes socioradioecológicas de Chernobyl y Fukushima Daiichi provocaron que el LNTM sea considerado un paradigma en crisis, tanto por expertos partidarios de la energética nuclear como por expertos detractores de la misma. Mientras los primeros aducen que ese modelo lineal impulsa a percibir las radiaciones ionizantes como igualmente peligrosas a cualquier nivel de exposición, los segundos insisten en que el LNTM impide reconocer la verdadera ocurrencia de daños radioinducidos, al minizarlos de antemano.

Nosotros concluimos que, siendo un constructo socioestadístico, el modelo lineal sin umbral ha servido para propiciar la connivencia entre la experticia científica y los grupos políticos durante la resolución de los conflictos planteados por la proliferación de la energía nuclear (militar y civil). Aunque el criterio ALARA no fuera previsto para situaciones postaccidentales o catastróficas —de ahí su rotundo fracaso al ser aplicado en estos casos—, su pretensión de servir al «principio de precaución» ha sido enarbolada como argumento político. Esta función social del LNTM y su principio de optimización «tan bajo como sea razonablemente posible» no podrían cumplirla los demás modelos concurrentes de las curvas dosis-efecto, cuya implementación provocaría inevitablemente una colisión entre las posiciones extremas a favor y en contra de la energética nuclear.

*Dadas las insuficiencias epistemológicas de la radioepidemiología, acentuadas por la existencia de teorías radiobiológicas excluyentes entre sí, el carácter único del riesgo nuclear y radiológico estriba en el predominio de las incertidumbres científicas —tanto teóricas como empíricas— sobre los daños que podría causar la exposición crónica a bajas dosis (menores de 100 mSv) por encima del fondo natural. Por eso ninguna concepción de la protección radiológica resulta medianamente satisfactoria cuando se produce una gran liberación de radionucleidos artificiales, cuyos efectos perjudiciales pueden prolongarse por un tiempo indeterminado, afectando incluso a generaciones aún no nacidas.*

*Por su vulnerabilidad biológica y social, el caso particular de las embarazadas, fetos in utero y niños hace que resulte éticamente insostenible atenerse al criterio ALARA como*



*principio de optimización, pretendiendo un nivel de exposición crónica a las radiaciones ionizantes «tan bajo como sea razonablemente alcanzable». Bastaría ponerse en lugar de ese grupo vulnerable para descalificar completamente el utilitarismo de ponerle precio a la salud humana mediante el análisis coste/beneficio del riesgo radiológico (cáncer y enfermedades hereditarias) sobre la base de razonamientos probabilísticos. Tampoco se resolvería el dilema sociorradioecológico mediante la implementación de la propuesta De minimis, en el sentido de consensuar un valor fijo de dosis efectiva por debajo del cual los daños radioinducidos sean descartables por insignificantes. De lograrse tal consenso por parte de los expertos, aun así la aceptabilidad del riesgo nuclear y radiológico estaría supeditada a razones culturales, políticas, ideológicas, éticas y morales.*

### *Dilema regulación/promoción*

Los expertos nucleares han tenido que reformular su filosofía práctica para enfrentarse a los dilemas ubicación/seguridad y sociorradioecológico, además de mantenerse atentos al dilema del doble uso. Al tensarse esta triada dilemática con cada gran accidente histórico, se evidencia el paulatino desfase entre la promoción de la energética nuclear y la capacidad societal y/o institucional para garantizar su seguridad mediante mecanismos reguladores. Hemos argumentado que, al constituir el problema fundamental de la seguridad tecnológica, la interrogante *How safe is safe enough?* (¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?) puede configurarse como el marco analítico de ese dilema *regulación/promoción*. Esto explica que, en su momento, el concepto de *acceptable risk* fuera aprovechado por los ingenieros nucleares, extrapolándolo desde el ámbito técnico al ámbito social con el objetivo de demostrar estadísticamente que la seguridad alcanzada por la energética nuclear ya garantizaba un riesgo muy por debajo del socialmente aceptado para las centrales eléctricas de carbón y fuel oil, además de prometer mayores beneficios que la energética convencional.

Sin embargo, desde un primer momento se produjo una escisión entre los ingenieros nucleares y los científicos sociales a tenor con sus respectivas posturas epistemológicas: intratécnica y extratécnica. Uno de los objetivos de esta tesis doctoral fue recordar que el campo de estudios CTS surgió —entre otras razones— como manifestación académica de la reacción pública contra el secretismo de ascendencia militar, cuando los parlamentos de las democracias occidentales tomaron conciencia de la necesidad de regular y hasta dirigir las aplicaciones de la tecnociencia nuclear. Esto explica el trasfondo político que ha acompañado siempre a toda polémica sobre esa opción energética, incluso a la reflexión de índole científica o filosófica. Asimismo explica que, desde sus orígenes, el abordaje sociológico del riesgo nuclear y radiológico fuera desarrollado por autores estadounidenses e ingleses, intensificándose después de Three Mile Island, cuando comienzan a interesarse sus homólogos franceses, alemanes, italianos y de otros países.

No sucedió así en la Unión Soviética, donde primaba un secretismo total sobre la esfera nuclear (militar y civil) y, por consiguiente, no se desarrolló ninguna sociología del riesgo. De hecho, el concepto de *risk* apenas se empleaba en la práctica ingenieril,

priorizándose la noción determinista de «seguridad»: *bezopasnost*, que significa «sin peligro» en ruso. Hasta que sucedió la tragedia de Chernobyl y, una vez reconocida como catástrofe por las autoridades soviéticas, la noción del riesgo aceptable irrumpió en la palestra pública durante los debates sobre los límites de dosis admisible para decidir la evacuación forzosa, la reubicación temporal o el reasentamiento permanente de millones de damnificados en vastos territorios de la antigua URSS.

Otro resultado singular de esta tesis doctoral es haber fundamentado un correlato heurístico entre ese derrotero accidentado de la energética nuclear y el continuo teórico de las divergentes posturas epistemológicas con respecto a la naturaleza del riesgo y su relación con la incertidumbre: desde el paradigma positivista de los expertos técnicos hasta el paradigma constructivista de los científicos sociales. Mientras los primeros se aferran a que el riesgo es objetivo y puede cuantificarse mediante cálculos probabilísticos, los segundos se enfrentan a la dificultad no ya de medir, sino de entender la percepción subjetiva del riesgo y su ampliación social. En síntesis: no es igual el «riesgo objetivo» que resulta del enfoque intratécnico de los ingenieros nucleares, que el «riesgo subjetivo» bajo el enfoque extratécnico de los científicos sociales. Consecuentemente también son distintas sus respectivas nociones de la incertidumbre, de ahí que ese continuo epistemológico sea como un círculo nunca cerrado, al no poder consensuarse tales paradigmas en conflicto.

*El carácter único del riesgo nuclear y radiológico no solamente comporta la indefectible politización de su aceptabilidad social debido al enfrentamiento irreconciliable entre partidarios y opositores del empleo de la fisión atómica con fines energéticos. Todo hace indicar también que una postura intratécnica a favor de la energía nuclear, ya supone ser un realista empírico, mientras que una postura extratécnica en contra de esa opción energética, ya supone ser un constructivista social. Esa brecha epistemológica entre ingenieros nucleares y científicos sociales se ha ampliado con cada accidente histórico, en la medida que todos significaron sorpresas tecnológicas para los propios expertos. Al fracasar la concepción de «cuán seguro es lo suficientemente seguro», ya resulta imposible la negociación del riesgo aceptable dentro del esquema riesgo-seguridad que impone el marco analítico del dilema regulación/promoción, máxime cuando se ha traspasado el umbral de catástrofe sociorradioecológica.*

A partir de esta conclusión puede explicarse el estancamiento de los estudios CTS cuando reconocen a la energética nuclear como «objeto de riesgo global», pero que podría dejar de serlo si lograra su seguridad plena en el futuro. Por múltiples razones se olvida que este marco analítico fue impuesto por la filosofía práctica ingenieril y su aspiración a convertir esa opción energética en la única fuente de supervivencia de la humanidad. Un científico social se contradice a sí mismo cuando se atiene al concepto socioconstructivista de *indeterminación* de Brian Wynne, según el cual las redes causales siempre están abiertas, y cuando al unísono comulga con el realismo fisicalista de Alvin Weinberg, creyendo en su propuesta de los reactores de seguridad intrínseca (*inherent safety*) como la solución futurista para prescindir de los análisis probabilísticos. Por eso resulta necesaria la equidistancia de los ECTS con respecto a la antinomia

realismo/constructivismo social, oscilando entre uno y otro paradigma en conflicto, entre una y otra postura epistemológica: intratécnica y extratécnica.

### *Dilema realismo versus constructivismo social*

La fundamentación metateórica de nuestra apelación a simultanear la dualidad de enfoques (realista y constructivista social) se sustenta en que, a partir de Chernobyl, el carácter único del riesgo nuclear y radiológico superó los límites epistemológicos de los estudios CTS. Si hasta Three Mile Island se había visto la cuestión del *acceptable risk* en términos restringidos a la causalidad tecnológica y organizacional, a partir de aquella catástrofe se impuso la problemática de la estructuración del riesgo —tecnológico, en particular— a escala societal como una condición irrefrenable de la postmodernidad. A esa dimensión macrosociológica se añade una cada vez mayor comprensión filosófica del vínculo ontológico entre el riesgo y la incertidumbre, cuya manifestación ostensible fue el triple desastre (terremoto-tsunami-crisis nuclear) de Fukushima Daiichi, primera catástrofe sociorradioecológica *Natech*.

Ese giro macrosociológico de la teoría del riesgo fue ejemplificado mediante la confrontación entre el realismo reflexivo de Ulrich Beck y su mayor oponente: el socioconstructivismo radical de Niklas Luhmann. Aunque los aparatos conceptuales de la teoría de la sociedad del riesgo global (Beck) y de la teoría constructivista de los sistemas sociales (Luhmann) no fueron previstos por sus autores con un propósito heurístico, sus categorías más importantes nos permitieron subrayar el carácter único del riesgo nuclear y radiológico desde una perspectiva extratécnica. De esta manera se pudo solventar uno de los problemas más difíciles de la metodología adoptada: lograr la articulación entre los aspectos «intratécnicos» y los aspectos «extratécnicos», más allá de la distinción basada en las prácticas ingenieriles frente a las prácticas de los estudios CTS.

De Ulrich Beck aprovechamos sus nociones de «incertidumbre manufacturada», «riesgo manufacturado» y «no saber» (*Nichtwissen* en alemán; *non-knowledge* en inglés). Si desde una perspectiva intratécnica identificamos los tres dilemas irresolubles (doble uso, ubicación/seguridad y sociorradioecológico) que conforman el dilema regulación/promoción; ya habiendo definido este gran dilema desde adentro, pasamos a caracterizarlo desde afuera como «incertidumbre manufacturada» que se ha acrecentado con cada accidentes histórico superior a la base de diseño. Así corroboramos que la energética nuclear cumple las tres características señaladas por la teoría beckiana para ser un megapeligro de potencial catastrófico en estado latente: deslocalización, incalculabilidad y no-compensabilidad.

Ese enfoque macrosociológico nos permitió analizar la disfuncionalidad de la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES, por sus siglas en inglés: International Nuclear and Radiological Event Scale), enjuiciándola como expresión tácita del dilema regulación/promoción que deviene «irresponsabilidad organizada». Con este término, Beck se refiere a que las instituciones siguen encubriendo la realidad de las catástrofes, aunque parezcan reconocerlas, para evitar así la compensación de los damnificados. Supuestamente concebida para facilitar la comunicación pública a nivel mundial,

la INES denota la enorme reticencia del sistema tecnocientífico nuclear —entiéndase el OIEA— a definir los grandes accidentes históricos de Chernobyl y Fukushima Daiichi como «catástrofes», limitándose a clasificarlos como «accidentes graves». Paradójicamente, su máxima asignación del nivel 7 termina allí cuando ya se ha iniciado el mayor escenario de potencial catastrófico: la inminencia de evacuaciones masivas que podrían resultar incontrolables y generar un altísimo grado de conflictividad social.

A la aplicación confusa y contraproducente de la INES por primera vez en tiempo real durante el *3.11 disaster* concedimos atención primordial, considerando que Fukushima Daiichi fue también un «desastre informativo»; o sea, un cuádruple desastre. A partir de esa experiencia se puso de manifiesto que la disfuncionalidad de esa escala del OIEA resulta un alto riesgo en sí misma, máxime si ocurre una contaminación radiactiva transfronteriza que afecte más a otros países que al propietario de la central atómica en desgracia. Si coincidimos con Ulrich Beck en que Chernobyl inició el tránsito hacia la sociedad del riesgo global como consecuencia inesperada de los nuevos peligros asociados a la sociedad postindustrial (hasta ese momento los reactores electronucleares no habían explotado); a partir de Fukushima Daiichi se confirma que el dilema regulación/promoción de la energética nuclear debe verse de alguna manera «acoplado estructuralmente» a la diferenciación funcional de la sociedad moderna que preconiza Niklas Luhmann.

Nada que llamemos «riesgo» preexiste a la observación del riesgo; o lo que es decir: a su comunicación social. Para entender a profundidad este radical precepto luhmanniano, casi un aforismo, hemos ofrecido un bosquejo pormenorizado de la teoría constructivista de los sistemas sociales, cuyo núcleo central es el «modelo sintético de comunicación». Hemos justipreciado las grandes aportaciones de Luhmann a la teoría del riesgo, validando su acierto epistemológico de aplicar una observación de segundo orden (observación de la observación) para desmarcarnos tanto del realismo positivista de los expertos técnicos que sostienen el esquema riesgo-seguridad, como de los científicos sociales que tratan de contraponérsele, pero siguen atrapados dentro del marco analítico del dilema regulación/promoción de la energética nuclear.

Aprovechamos de Luhmann su polémica tesis sobre la improbabilidad de la comunicación ecológica debido a la heterarquía de la sociedad funcionalmente diferenciada, cuyos subsistemas sociales podrían afectarse mutuamente por resonancia autodestructiva. Asimismo, nos acogimos a su distinción riesgo/peligro (*Risiko/Gefahr*) que transmuta en la distinción decisores/afectados: el riesgo de unos (decisores) es el peligro de otros (afectados). Con ayuda de estas aportaciones luhmannianas conjeturamos la posibilidad de una «sociorradioecocatástrofe por implosión informativa». Esta vendría antecedida por la aplicación disfuncional de la INES en tiempo real cuando se pierda el control tecnológico y se produzca la irreversibilidad hasta traspasar el umbral de catástrofe socioecorradiológica. Difícilmente podrá convencerse entonces de negociar la aceptabilidad y/o tolerabilidad del riesgo nuclear y radiológico a quienes habrán padecido o temerán padecer daños biológicos reales desde la perspectiva de peligro.

*El carácter único del riesgo nuclear y radiológico se resume en que, a pesar de la bajísima probabilidad de los accidentes superiores a la base de diseño (BDBA), la indefinición de su umbral de catástrofe desafía los métodos cuantitativos de cálculo racional, tanto de la seguridad ingenieril como de la protección radiológica. Las centrales electronucleares son un megapeligro de potencial catastrófico por profundas razones tecnológicas que están relacionadas con su morfogénesis militar, incluyendo el destino del combustible usado con alto contenido de uranio y plutonio. A esto se suman las grandes incertidumbres sobre los efectos imprevisibles de las bajas dosis de radiación artificial, cuyas consecuencias negativas sobre la salud humana son incommensurables. Es por ello que la aceptabilidad y/o tolerabilidad del riesgo nuclear y radiológico estará siempre sujeta a la improbabilidad de su comunicación social, primando factores culturales, morales y psicosociales que se remontan al estreno bélico de la fisión atómica en Hiroshima y Nagasaki. El derrotero accidentado de la energética nuclear ha confirmado la indefinición de ese umbral catastrófico, cuando se ha tenido que evacuar a miles y hasta millones de personas, incluidos al grupo más vulnerable: mujeres embarazadas y niños.*

A esta conclusión final, que lleva implícitas las demás conclusiones por cada dilema identificado, arribamos como colofón del análisis sincrónico y diacrónico de los tres grandes accidentes históricos: Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima-Daiichi... Que se asuma la indefinición del umbral de catástrofe sociorradioecológica como una problemática comunicacional propiciaría la avenencia entre la noción realista del riesgo de los expertos técnicos (ingenieros nucleares y radioproteccionistas) y la noción socioconstructivista del riesgo que profesan los científicos sociales. A este deseo de entendimiento recíproco, sin pretender que haya conciliación filosófica, responde nuestra propuesta de un nuevo marco analítico de la comunicación del riesgo nuclear y radiológico.

Ya no se trataría de responder racionalmente a la pregunta tautológica *How safe is safe enough?* (¿Cuán seguro es lo suficientemente seguro?) para la negociación de la aceptabilidad y/o tolerabilidad del riesgo nuclear y radiológico. Ahora se trata de una interrogante más abierta: *How vulnerable is safe enough?* (¿Cuán vulnerable es lo suficientemente seguro?) para propiciar una voluntad de diálogo permanente entre decisores y afectados. El gran tema de los estudios CTS sería la comunicación de la ignorancia o *no-saber* en una sociedad cada vez más globalizada y más funcionalmente diferenciada, adoptando el enfoque crítico de un posibilismo socioconstructivista del «peor caso posible» o «peor accidente imaginable» que podría superar los peores vaticinios tanto de Luhmann como de Beck.

#### *A modo de epílogo. El peor caso posible: la guerra nuclear<sup>84</sup>*

En su iluminador texto *Gelassenheit (Serenidad)*, Martin Heidegger alertaba en 1955 sobre el costo que traería a la humanidad haber entrado en la época de la energía nuclear: «No sabemos lo que el dominio de la técnica atómica, que progresa hasta lo inquietante, tiene como propósito» (Heidegger, 1955: 27). Más que el riesgo de una tercera guerra mun-

<sup>84</sup>Agradezco a mi tutor Alfredo Marcos la idea de cerrar esta tesis doctoral con una suerte de epílogo, así como por haberme dado a conocer el texto citado: *Serenidad*, de Martin Heidegger.

dial, le preocupaba a este otro filósofo alemán que el pensamiento calculador anulara a la meditación reflexiva. Sería la «fuga del pensar» —o sea, la ausencia de pensar reflexivo— el mayor peligro que traería la asimilación de esta fuente de energía como «camino hacia una nueva felicidad». Al ser incapaz de frenar u orientar el curso histórico de esa transformación mundial, el hombre podría sucumbir a la irresistible preponderancia de la técnica. Hasta la autoctonía de las obras humanas sería amenazada en singular medida. Para evitar que así sucediera, Heidegger aconsejaba mantener una doble actitud con respecto al mundo técnico: decir simultáneamente *sí* y *no* a sus objetos —o sea, mantener «la serenidad ante las cosas»—, y estar siempre atentos al propósito o sentido oculto que entraña el dominio tecnológico: mantener «la apertura al misterio».

También apelando a mantener la serenidad ante las cosas y la apertura al misterio, esta tesis doctoral concluye con la apertura de esta última interrogante: *¿Podría un peor accidente imaginable conducir a la guerra nuclear como peor caso posible?* Cuando conjeturamos la posibilidad de una catástrofe sociorradioecológica de magnitud global por «implosión informativa», en ningún momento nos referimos a cuál podría ser su suceso iniciador y su posible desenlace. Hacerlo equivaldría a lanzar una profecía en vano, como si hubiera podido saberse que la ingesta de una sopa de murciélago en un mercado chino cambiaría el mundo a partir de 2020. Ajeno a la teoría del caos, los cisnes negros y los reyes dragón, este epílogo filosófico se basa en un presupuesto más sencillo: la mayor ignorancia o *no-saber* resulta del demasiado conocimiento técnico, cuando trae consigo la ausencia de meditación y la desmemoria social. A poco de terminar estas líneas, se cumplieron treinta y cinco años de que un reactor nuclear con fines civiles explotó por primera vez en la historia. Haber estado debajo de él unos pocos meses antes de que estallara, ha sido motivo suficiente para tratar de retornar a Chernobyl.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACADÉMIE DES SCIENCES (1995). *Problèmes liés aux effets des faibles doses des radiations ionisantes. Rapport no. 34*. Paris. Tec & doc.
- ACHESON, D. (1946). *A Report on the International Control of Atomic Energy*. London, Reprinted by H.M. Stationery Off. Disponible en: <http://www.learnworld.com/ZNW/LWText.Acheson-Lilienthal.html> [Consultado 27-09-2017]
- ACTON, J. M. y HIBBS, M. (2012). *Why Fukushima Was Preventable*. Washington, DC, Carnegie Endowment for International Peace. Disponible en: <http://carnegieendowment.org/files/fukushima.pdf> [Consultado 24-07-2013]
- ADAMOV, E.O. (2017). «Closed Fuel Cycle Technologies Based on Fast Reactors as the Corner Stone for Sustainable Development of Nuclear Power». Disponible en: [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:49085656](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:49085656) [Consultado 22-10-2018]
- ADLER, H.I. y WEINBERG, A.M. (1978). «An Approach to Setting Radiation Standards». *Health Physics*. 34, 719-20.
- ADLOFF, J. P. (1999). «The Laboratory Notebooks of Pierre and Marie Curie and the Discovery of Polonium and Radium». *Czechoslovak Journal of Physics*. 49, 15-28.
- AGAZZI, E. (2008). *Le rivoluzioni scientifiche e il mondo moderno*. Milano, Fondazione Achille e Giulia Boroli. (*La ciencia y el alma de Occidente*. Madrid, Tecnos, 2011)
- AGAZZI, E. (1996). *El bien, el mal y la ciencia: las dimensiones éticas de la empresa científico-tecnológica*. Madrid, Tecnos.
- ALBRIGHT, A. y WALROND, CH. (2010). *Iran Gas Centrifuge Program: Taking Stock*. Washington. D. C: Institut for Science and International Security.
- ALEXANDER, H. M. y SCOTT, D. S. (2009). «The Perils of Predicting Proliferation». *Journal of Conflict Resolution*, 53, 2, 302-328.
- ALEXANDER, J. y SMITH, P. (2000). «Ciencia social y salvación: sociedad del riesgo como discurso mítico». En: *Sociología Cultural. Formas de clasificación en las sociedades complejas*. Barcelona: Anthropos.
- ALLENDE LANDA, J. (1984). «Algunas directrices para una nueva política de ubicación de reactores nucleares». Universidad de Almería. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=2302471> [Consultado 22-11-2015]
- ALONSO, A. (2011). «Interpretación de la escala INES cuando se aplica a la calificación de accidentes en centrales nucleares. ¿Conviene modificar la escala?». Disponible en: <https://docplayer.es/115137626-El-accidente-en-la-central-nuclear-fukushima-consecuencias-radiologicas.html> [Consultado 08-11-2014]
- ALPEROVITZ, G. (2013). *The Decision to Use the Atomic Bomb*. New York, Vintage Books. Disponible en: <http://rbdigital.oneclickdigital.com> [Consultado 22-11-2014]
- ALTSHULER, E. (2009). «La dinámica de las hormigas como paradigma de auto-organización». *Pensando la complejidad*. 3 (5), 16-20.
- AMIR, S. y JURAKU, K. (2014). «Undermining Disaster: Engineering and Epistemological bias in the Fukushima Nuclear Crisis». *Engineering Studies*. 6, 210-226.
- ANDRÉS, G. E. (2008). «The International Atomic Energy Agency's Safeguards System. International Law». *Revista Colombiana de Derecho Internacional*. 87-118.
- ANDRESZ, S., MORGAN, J., CROÛAIL, P. y VERMEERSCH, F. (2018). «Conclusions and Recommendations from the 17th Workshop of the European ALARA Network. ALARA in Emergency Exposure Situations». *Journal of Radiological Protection*. 38, 434-439.

- ANTONSEN, M. y ELMKVIST NILSEN, R. (2013). «Strife of Brian. Science and Reflexive Reason as a Public Project. An Interview with Brian Wynne». *Nordic Journal of Science and Technology Studies*. 1(1), 30-40.
- AOKI, M. (2011). «Coordination Under Uncertain Conditions: An Analysis of the Fukushima Catastrophe». Disponible en: <http://hdl.handle.net/10419/53621> [Consultado 22-11-2013]
- ARNOLD, L. (1992). *Windscale, 1957: Anatomy of a Nuclear Accident*. New York, St. Martin's Press.
- ASHBY, W. (1984). «Sistemas y sus medidas de información». En: Bertalanffy von, L. (ed.). *Tendencias en la teoría general de los sistemas*. Madrid: Alianza Editorial.
- ASHLEY, S. F., PARKS, G., NUTTALL, B., BOXALL, C. y GRIMES, R. (2012). «Thorium Fuel has Risks». *Nature*, 492 (7427). 31-33.
- ASSELT VAN, M. B. A. (2000). «Perspectives on Uncertainty and Risk: The PRIMA Approach to Decision Support». Boston, Kluwer Academic Publishers.
- ASSELT VAN, M. B. A., ASTEN VAN, F., LANGENDONCK, R. y ROTMANS, J. (1999). «Uncertainty at Risk. Learning from the Dutch Environmental Outlooks». Paper presented at the Open Meeting of the Human Dimensions of Global Environmental Change Research Community, Japan, 26-29 de junio.
- ASSELT VAN, M. B. A., HUIJS, S. y KLOOSTER VAN T., S.A. (2003). «The Intriguing Relationship Between Uncertainty and Normativity: The Need for Pluralistic Assessment». Campus Verlag, 61-85. Disponible en: <http://purl.utwente.nl/publications/46244> [Consultado 22-11-2013]
- ASSELT VAN, M. B. A. y VOS, E. (2006). «The Precautionary Principle and the Uncertainty Paradox». *Journal of Risk Research*. 9, 313-336.
- ATLANTIC COUNCIL TASK FORCE ON US NUCLEAR ENERGY LEADERSHIP e ICHORD, R. F. (2019). «US Nuclear Energy Leadership: Innovation and the Strategic Global Challenge: Report of the Atlantic Council Task Force on US Nuclear Energy Leadership». Disponible en: [https://www.atlanticcouncil.org/images/publications/US\\_Nuclear\\_Energy\\_Leadership-.pdf](https://www.atlanticcouncil.org/images/publications/US_Nuclear_Energy_Leadership-.pdf) [Consultado 22-12-2019]
- AVEN, T. (2012). «On the Critique of Beck's View on Risk and Risk Analysis». *Safety Science*. 50, 1043-1048.
- AVEN, T. (2010). «On How to Define, Understand and Describe Risk». *Reliability Engineering & System Safety*. 95, 623-631.
- AVEN, T. (2009). «Safety is the Antonym of Risk for Some Perspectives of Risk». *Safety Science*. 47, 925-930.
- AVEN, T. (2007). «A Unified Framework for Risk and Vulnerability Analysis Covering Both Safety and Security». *Reliability Engineering & System Safety*. 92, 745-754.
- AVEN, T. y RENN, O. (2010). *Risk Management and Governance Concepts, Guidelines and Applications. (Risk, Governance and Society)*. Berlin, Springer.
- AVEN, T., RENN, O. y ROSA, E. (2011). «On the Ontological Status of the Concept of Risk». *Safety Science*. 49, 1074-1079.
- ÁVILA, J. P. (2015). «El programa de investigación sociopoiético: Una entrevista con Marcelo Arnold». *Revista Mad*. Universidad de Chile. 32, 116-135.
- AYYUB, B. M. (2003). *Risk Analysis in Engineering and Economics*. Boca Raton, Fla, Chapman & Hall/CRC.
- BADASH, L. (2000). «Science and McCarthyism». *Minerva*. 38, 53-80.
- BADINO, M. y NAVARRO, J. (2013). *A History of Quantum Physics through Textbooks*. Edition Open Access, Berlin.
- BAKER, B. (2012). «The Man Who Never Stopped». *EPRI Journal*. Spring, 14-17.



- BALOGH, B. (1991). *Chain Reaction: Expert Debate and Public Participation in American Commercial Nuclear Power, 1945-1975*. Cambridge, Cambridge University Press.
- BANKERBUS, N.J., FREEMAN, S.D. y WEINBERG, A. M. (1985). *Papers on the Nuclear Regulatory Dilemma*. Oak Ridge, Tenn, Oak Ridge Institute for Science and Education. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/6191883-EJArac>. [Consultado 20-12-2017]
- BANKSTON, J. (2003). *Enrico Fermi and the Nuclear Reactor*. Bear, Del, Mitchell Lane Publishers.
- BATESON, G. (1993). *Espíritu y naturaleza*. Buenos Aires: Editorial Amorrortu.
- BAUMAN, Z. (1991). *Modernity and Ambivalence*. Ithaca, N.Y., Cornell University Press. (*Modernidad y ambivalencia*. Barcelona, Rubí, Anthropos, 2005).
- BECHMANN, G. (2010). *Moderene Gesellschaft: Risikogesellschaft, Informationsgesellschaft, Wissensgesellschaft* (Publicado en ruso con el título *Sovremennoye obshestvo: obshestvoriska, informatsionnoye obshestvo, obshestvoznanii*. Moskva, Logos).
- BECHMANN, G. (2009). «Riesgo y sociedad post-moderna». En: Luján, J. L. y Echeverría, J. (ed.). *Gobernar los riesgos: Ciencia y valores en la sociedad del riesgo*. Madrid, Biblioteca Nueva.
- BECHMANN, G. (1995). «Riesgo y desarrollo técnico-científico. Sobre la importancia social de la investigación y valoración del riesgo». *Sociedad, ciencia y tecnología: Riesgos y beneficios sociales del desarrollo tecnológico*. Cuadernos de Sección. Ciencias Sociales y Económicas 2. Eusko Ikaskuntza, 59-98.
- BECK, U. (2016). *The Metamorphosis of the World How Climate Change is Transforming Our Concept of the World*. John Wiley & Sons.
- BECK, U. (2015). «Emancipatory Catastrophism: What Does it Mean to Climate Change and Risk Society?». *Current Sociology*. 63 (1): 75-88.
- BECK, U. (2009). «Critical Theory of World Risk Society: A Cosmopolitan Vision». *Constellations Oxford*, 16, 1, 3-22.
- BECK, U. (2008). *La sociedad del riesgo mundial: en busca de la seguridad perdida*. Barcelona, Paidós Ibérica S.A. (obra original: *Weltrisikogesellschaft: auf der Suche nach der verlorenen Sicherheit*. Frankfurt am Main, Suhrkamp, 2007; primera edición en inglés: *World at Risk: The Search for Lost Security*. Cambridge: Polity Press, 2009).
- BECK, U. (2006). «Living in the World Risk Society: A Hobhouse Memorial Public Lecture Given on Wednesday 15 February 2006 at the London School of Economics». *Economy and Society London*, 35, 329-345. («Vivir en la sociedad del riesgo». *Documentos CIDOB*, Dinámicas culturales 8. Barcelona, Edicions Bellaterra).
- BECK, U. (2002a). *La sociedad del riesgo global*. Madrid, Siglo Veintiuno. (primera edición en inglés: *World Risk Society*. Malden, MA, Polity Press y Blackwell Publishers, 1999).
- BECK, U. (2002b). «The Terrorist Threat: World Risk Society Revisited». *Theory, Culture & Society*. 19, 39-55.
- BECK, U. (2000). «Retorno a la teoría de la sociedad del riesgo». *Boletín de la A.G.E.* 30, 9-20.
- BECK, U. (1998). *La sociedad del riesgo. Hacia una nueva modernidad*. Ediciones Paidós América. (obra original: *Risikogesellschaft: auf dem Weg in eine andere Moderne*. Frankfurt am Main, Suhrkamp, 1986).
- BECK, U. (1997). «La reinención de la política. Hacia una teoría de la modernización reflexiva». En: Beck et al (1997). *Modernización reflexiva: Política, tradición y estética en el orden social moderno*. Madrid, Alianza.
- BECK, U. (1995). *Ecological Politics in an Age of Risk*. Cambridge: Polity Press.
- BECK, U. (1994). «The Reinvention of Politics: Towards a Theory of Reflexive Modernization». En: Beck, U., Giddens, A. y Lash, S. (Eds). *Reflexive Modernization: Politics, Tradition and Aesthetics in the Modern Social Order*. Cambridge: Polity Press.

- BECK, U. (1993). *Die Erfindung des Politischen: zu einer Theorie Reflexiver Modernisierung*. Frankfurt am Main, Suhrkamp.
- BECK, U. (1992). *Risk Society: Towards a New Modernity*. London, Sage Publications.
- BECK, U. (1987). «The Anthropological Shock: Chernobyl And The Contours Of The Risk Society». *Berkeley Journal of Sociology*. 32, 153-165.
- BECK, U. (1986). *Risikogesellschaft: auf dem Weg in eine andere Moderne*. Frankfurt am Main, Suhrkamp. (*La sociedad del riesgo. Hacia una nueva modernidad*. Ediciones Paidós América, 1998).
- BECK, U., GIDDENS, A. y LASH, S. (1997). *Modernización reflexiva: Política, tradición y estética en el orden social moderno*. Madrid, Alianza (*Reflexive modernization: politics, traditions and aesthetics in the modern social order*, Cambridge Polity, 1994).
- BECK, U. y OHNO, H. (2011). «Interview/Ulrich Beck: System of Organized Irresponsibility behind the Fukushima Crisis». *Asahi Shimbun*, 6 de julio.
- BELYAKOV, O. V. (2008). «Non-targeted Effects of Ionising Radiation: Proceedings of the RISC-RAD. Specialised Training Course: Non-targeted Effects of Ionising Radiation». STUK-Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, Finland, 14-16 February 2005. Helsinki, STUK.
- BELLVER, V. (2005). «Derecho y vulnerabilidad». En: Cayuela A (ed.). *Vulnerables. Pensar la fragilidad humana*. Madrid, Encuentro editores. 62-84.
- BERIAIN, J. (1996). *Las consecuencias perversas de la Modernidad*. Barcelona, Antrophos.
- BERTALANFFY, L. von (1968). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York, N.Y., Braziller. (Teoría general de sistemas. Madrid: Fondo de Cultura Económica, 1976).
- BETHE, H. A. (2000). «The German Uranium Project». *Physics Today*. 53, 34-36.
- BIJKER, W. E. (2009). *Vulnerability in Technological Cultures*. Maastricht, Maastricht University.
- BIJKER, W. E. (2008). «La vulnerabilidad de la cultura tecnológica». *Redes*. 14, 27, 117-140.
- BIJKER, W. E., HUGHES, T. P. y PINCH, T. J. (1987). *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*. Cambridge, Mass, MIT Press.
- BIRD, P. (1989). *Operation Hurricane: [A Personal Account of the British Nuclear Test at Monte Bello, 1952]*. Worcester, Square One.
- BIRD, K. y SHERWIN, M. J. (2005). *American Prometheus: The Triumph and Tragedy of J. Robert Oppenheimer*. New York, A.A. Knopf
- BLAIR, B. G. (1994). «Nuclear Inadvertence: Theory and Evidence». *Security Studies*. 33, 494-500.
- BLIX, H. (2004). *¿Desarmando a Iraq?: en busca de las armas de destrucción masiva*. Barcelona, Planeta.
- BODMER, W. F. (1986). *The Public Understanding of Science*. [Birkbeck College].
- BOHOLM, A. (1996). «Risk Perception and Social Anthropology: Critique of Cultural Theory». *Ethnos*. 61, 64-84.
- BOLADO, R., IBAÑEZ, J. y LANTARÓN, A. (1998). «El juicio de los expertos». *Colección Otros Documentos*. Consejo de Seguridad Nuclear, Madrid.
- BOURGEOIS, J., TANGUY, P. y COGNÉ, F. (1997). *La seguridad nuclear en Francia y en otros países del mundo*, CSN, Colección de Documentos, No. 3.
- BOURRIER, M. (2011). «The Legacy of Theory of High Reliability Organizations: At Ethnographic Endeavor». *Sociograph-working Paper*. 6.
- BRANT, A. (2012). «The New Radiobiology: Returning to Our Roots». *Dose-response*. 10, 593-609.
- BROWN, A. (1997). *The Neutron and the Bomb: A Biography of Sir James Chadwick*. Oxford University Press.

- BROOKS, G. L. (1993). *A Short History of the CANDU Nuclear Power System*. Mississauga, Ont, AECL CANDU.
- BROMET, E. J. (2014). «Emotional Consequences of Nuclear Power Plant Disasters». *Health Physics*. 106, 206-210.
- BROSED, A. (2011). *Medida de la radiación*. Madrid, Aula Documental de Investigación.
- BRYAN, R. (2012). *Hidden Truth: The Sodium Reactor Experiment Meltdown of 1959 at the Santa Susana Field Laboratory*. California State University, Northridge.
- BUCK, A. L. (1983). *A History of the Atomic Energy Commission*. Washington ( D.C.), U.S. Department of Energy.
- BUSBY, C. y BERTELL, R. (2003). *Recomendaciones del ECRR 2003: los efectos sobre la salud de la exposición a radiación de bajas dosis para propósitos de protección de la radiación*. Madrid, Asociación de Medicinas Complementarias.
- BYRNE, J. y HOFFMAN, S. M. (1996). *Governing the Atom: The Politics of Risk*. New Brunswick, N.J., Transaction Publishers.
- CALABRESE, E.J. (2015). «An Abuse of Risk Assessment: How Regulatory Agencies Improperly Adopted LNT for Cancer Risk Assessment». *Archives of Toxicology*. 89, 647-8.
- CALABRESE, E.J. y O'CONNOR, M. K. (2014). «Estimating Risk of Low Radiation Doses- a Critical Review of the BEIR VII Report and Its Use of the Linear No-Threshold (LNT) Hypothesis». *Radiation Research*. 182, 463-74.
- CALABRESE, E. J. (2012). «Muller's Nobel Prize Lecture: When Ideology Prevailed Over Science». *Toxicological Sciences*. 126, 1-4.
- CALCINES, A. (2021). «Chernóbyl como accidente postnormal. Una revisión crítica de sus causas tecnológicas». Publicación en proceso <https://revistas.usal.es//index.php/artefactos>
- CALCINES, A. (2018). «La comunicación del riesgo radiológico en los casos de emergencia nuclear. ¿Comunicar el peligro o comunicar la vulnerabilidad?» XI Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear. Congreso Regional IRPA «Cultura de Seguridad: un compromiso compartido». 16 al 20 de abril de 2018. La Habana.
- CALCINES, A. (1996). «Memorias del Minotauro». *Bohemia*, abril, 24-27.
- CALONGE RUIZ, J. (1969). *Transcripción del ruso al español*. Madrid, Editorial Gredos.
- CAMACHO, L. (1990). «Tendencias actuales de la Filosofía de la Tecnología». *Revista de Filosofía de la Universidad de Costa Rica*. XXVIII (67-68), 21-26.
- CAMPBELL, S. y CURRIE, G. (2006). «Against Beck: In Defence of Risk Analysis». *Philosophy of the Social Sciences*. 36, 149-172.
- CANTOR, R. y RAYNER, S. (1986). «The Fairness Hypothesis and Managing the Risks of Societal Technology Choices». Paper Delivered to the Annual Meeting of the Society for Risk Analysis, 1985, Washington, D.C.
- CANTRIL, S. T. y PARKER, H. M. (1945). *The Tolerance Dose*. Oak Ridge, Tenn, United States Atomic Energy Commission.
- CARDIS, E. y HATCH, M. (2011). «The Chernobyl Accident-an Epidemiological Perspective». *Clinical Oncology*. 23, 251-260.
- CARLSON, J., BARDSLEY, J., BRAGIN, V. y HILL, J. (1997). *Plutonium Isotopics-Non-Proliferation and Safeguards Issues*. Paper presented to the IAEA Symposium on International Safeguards, Viena, Austria, 13-17 de octubre.
- CARPENTER, K. y HEATH, M. (2013). «Radiation Stigma, Mental Health and Marriage Discrimination: The Social Side-Effects of the Fukushima Daiichi Nuclear Disaster». University of Oregon. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1794/12994>. [Consultado 22-03-2014]

- CARTER, J. (1979). «Clinch River Breeder Reactor: Communication from the President of the United States Transmitting his Views on the Termination of the Clinch River Breeder Reactor Project and Alternatives for Breeder Reactor Research and Development». Washington, U.S. G.P.O.
- CASTRO DIAZ-BALART, F. (1991). *Energía nuclear y desarrollo: realidades y desafíos en los umbrales del siglo XXI*. Buenos Aires, Colihue.
- CAUFIELD, C. (1990). *Multiple Exposures: Chronicles of the Radiation Age*. Chicago, University of Chicago Press.
- CHERNILO, D. (2006). «La teorización de la coordinación social en sociedades diferenciadas. La teoría de los medios simbólicamente generalizados en Parsons, Luhmann y Habermas». En: Fariás, I. y Ossandón, J. (Ed.). *Observando sistemas. Nuevas apropiaciones y usos de la teoría de Niklas Luhmann*. Santiago. Ril editores. Fundación Soles.
- CHERNOBYL FORUM. (2006). *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*. Vienna, IAEA. Disponible en: <https://www.iaea.org/publications/7382/environmental-consequences-of-the-chernobyl-accident-and-their-remediation-twenty-years-of-experience> [Consultado 22-03-2013]
- CHERNUS, I. (2002). *Eisenhower's Atoms for Peace*. College Station, Texas A & M University Press. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=72034> [Consultado 22-03-2013]
- CHIERICI, L., FIORINI, G. L., ROVERE, S. L. y VESTRUCCI, P. (2016). «The Evolution of Defense in Depth Approach: A Cross Sectorial Analysis». *Open Journal of Safety Science and Technology*. 06, 35-54.
- CHUMAK, V. V. et al. (2007). «Dosimetry for a Study of Low-dose Radiation Cataracts among Chernobyl Clean-up Workers». *Radiation Research*. 167, 606-614.
- CIA (1984). *French Nuclear Reactor Fuel Reprocessing Program*. Directorate of Intelligence. Office of Scientific and Weapons Research.
- CLARK, R. (1971). *Einstein: Life and Times*. New York, World Pub. Co.
- CLARK, D. y HOBART, D. (2000). «Reflections on the Legacy of a Legend. Glenn T. Seaborg (1912–1999)». *Challenges in Plutonium Science*. 1, 56-60.
- CLARKE, L. (2005). *Worst Cases: Terror and Catastrophe in the Popular Imagination*. University of Chicago Press.
- CLARKE, R.H. y VALENTIN, J. (2009). «The History of ICRP and the Evolution of its Policies». *Annals of the ICRP*. 39, 75-110.
- CLAYTON, E. D., PRICHARD, A. W., DURST, B. M., ERICKSON, D. G. y PUIGH, R. J. (2010). *Anomalies of Nuclear Criticality Revision 6*. Richland, Wash, Pacific Northwest National Laboratory.
- COCHRAN, T. B., NORRIS, R. S., y BUKHARIN, O. (1995). *Making the Russian Bomb: from Stalin to Yeltsin*. Boulder, Colo, Westview Press.
- COHEN, B. L. (2005). «Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective». *Physics Today*. 58.
- COLE, N.M., LIPFORD, B.L. y FRIDERICHS, T.J. (1990). *TMI-2 Reactor Vessel Lower Head Sampling Project Techniques and Results*. United States: American Society of Mechanical Engineers.
- COLEMAN, D. G. y SIRACUSA, J. M. (2006). *Real-world Nuclear Deterrence the Making of International Strategy*. Westport, Conn, Praeger Security International.
- COLLINS, H.M. y EVANS, R. (2017). *Why Democracies Need Science*. Polity Press. Cambridge.
- COLLINS, H.M. y EVANS, R. (2007). *Rethinking Expertise*. Chicago/London: University of Chicago Press.

- COLLINS, H.M. y EVANS, R. (2002). «The Third Wave of Science Studies: Studies of Expertise and Experience». *Social Studies of Science*. 32 (2), 235-296. Chicago Press.
- COROMINES, J. y PASCUAL, J. A. (1983). *Diccionario crítico etimológico castellano e hispánico*. Madrid, Gredos.
- CORRIENTE, F. (1985). «Apostillas de lexicografía hispano-árabe». Actas de las II Jornadas de Cultura Árabe e Islámica. Madrid, 119-162.
- CORSI, G., ESPOSITO, E. y BARALDI, C. (1996). *Glosario sobre la teoría social de Niklas Luhmann*. Barcelona, Anthropos.
- COSTER-MULLEN, J. (2008). *Atom Bombs: The Top Secret Inside Story of Little Boy and Fat Man*. [United States], J. Coster-Mullen.
- COWAN, R. (1990). «Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-in». *The Journal of Economic History*. Vol. 50, No. 3, 541-567.
- CRICK, M. (1996). «Seguridad nuclear y radiológica: orientación para la respuesta a emergencias». *OIEA Boletín: Revista Trimestral del Organismo Internacional de Energía Atómica*. 38, 23-27.
- CUBADEBATE (2015). «Central Nuclear de Cienfuegos será confinador de desechos peligrosos», 21 de diciembre. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2015/12/21/central-nuclear-de-cienfuegos-sera-confinatorio-de-desechos-peligrosos/> [Consultado 22-12-2015]
- DAVIS, Z. S. y FRANKEL, B. (1993). *The Proliferation Puzzle: Why Nuclear Weapons Spread (and what results)*. London: Frank Cass.
- DAW, H. T. y AHMED, J. U. (1980). «El análisis de coste-beneficio y la protección radiológica». *Boletín del OIEA*. 22 (5/6).
- DEL SESTO, S. L. (1983). «Uses of Knowledge and Values in Technical Controversies: The Case of Nuclear Reactor Safety in the US». *Social Studies of Science*. 133, 395-416.
- DE MARCHI, B., FUNTOWICZ, S. O. y RAVETZ, J. (1993). *The Management of Uncertainty in the Communication of Major Hazards*. Commission of the European Communities.
- DE PAOLI, L. (2011). *L'energia nucleare*. Bologna, Il mulino. (*La energía nuclear: elementos para un debate*. Madrid, Alianza Editorial, 2013).
- DETTMER, G. J. (2001). «Problemas fundamentales en la articulación macro-micro. Reflexiones sobre algunos intentos no consumados». *Estudios Sociológicos*. 19, 79-100.
- DHARA, V. R. y DHARA, R. (2002). «The Union Carbide Disaster in Bhopal: A Review of Health Effects». *Archives of Environmental Health*. 57. 391-404.
- DMITRIEV, A. (1994). «Converting Russian Plutonium-Production Reactors to Civilian Use». *Science and Global Security*. 5, 37-46.
- DOSS, M. (2013). «Linear No-threshold Model vs. Radiation Hormesis». *Dose-response: A Publication of International Hormesis Society*. 11, 480-97.
- DOUGLAS, M. (2002). *Purity and Danger: An Analysis of Concept of Pollution and Taboo* Routledge classics.
- DOUGLAS, M. (1998). *Estilos de pensar*. Gedisa Editorial.
- DOUGLAS, M. (1996). *La aceptabilidad del riesgo según las ciencias sociales*. Barcelona, Paidós, (obra original: *Risk Acceptability According to the Social Sciences*. New York, Routledge, 1985).
- DOUGLAS, M. (1992). *Risk and Blame. Essays in Cultural Theory*. London. Routledge.
- DOUGLAS, M. (1966). *Purity and Danger: An Analysis of Concept of Pollution and Taboo*. New York, Routledge (*Pureza y peligro: un análisis de los conceptos de contaminación y tabú*. Madrid, Siglo Veintiuno de España Editores, 2008).

- DOUGLAS, M. y WILDAVSKY, A. (1983). *Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technical and Environmental Dangers*. Berkeley, University of California Press.
- DOUPLE, E., MABUCHI, K., CULLINGS, H.M. *et al* (2011). «Long-term Radiation Related Health Effects in a Unique Human Population: Lessons Learned from the Atomic Bomb Survivors of Hiroshima and Nagasaki». *Disaster Medicine and Public Health Preparedness* 5 (1), 122–133.
- DOWNER, J. (2010). «Anatomy of a Disaster: Why Some Accidents are Unavoidable». CARR Discussion Papers, DP 61. Centre for Analysis of Risk and Regulation, London School of Economics and Political Science, London, UK.
- DROUIN, M., WAGNER, B. J., LEHNER, J. y MUBAYI, V. (2016). *Historical Review and Observations of Defense-in-depth*. Washington, DC, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.
- DURANT, D. (2008). «Accounting for Expertise: Wynne and the Autonomy of the Lay Public Actor». *Public Understanding of Science*. 17 (1), 5–20.
- EISENHOWER, D. (1953). *Atoms for peace*. Disponible en: [http://www.iaea.org/About/atomsforpeace\\_speech.html](http://www.iaea.org/About/atomsforpeace_speech.html) [Consultado 22-03-2014]
- ENTESSAR, N. y AFRASIABI, K. L. (2018). *Iran Nuclear Accord and the Remaking of the Middle East*. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1638188> [Consultado 22-08-2019]
- EPALZA, M. (1989). «Nota sobre la etimología árabe-islámica de ‘riesgo’». *Sharq Al-Andalus*, 6, 185-192.
- ERGEN, W. K. (1967). *Emergency Core Cooling: Report of Advisory Task Force on Power Reactor Emergency Cooling*. Atomic Energy Commission, Washington, D. C.
- ESPOSITO, S. y PISANTI, O. (2008). «Enrico Fermi and the Physics and Engineering of a Nuclear Pile: The Retrieval of Novel Documents». Disponible en: <http://arxiv.org/abs/0803.1145>. [Consultado 22-08-2014]
- FAIRLIE, I. y SUMNER, D. (2006). *The Other Report on Chernobyl (TORCH): An Independent Scientific Evaluation of Health and Environmental Effects 20 Years After the Nuclear Disaster Providing Critical Analysis of a Recent Report by the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the World Health Organisation (WHO)*. Berlin, Greens/EFA in the European Parliament.
- FARDON, R. (2002). *Mary Douglas: An Intellectual Biography*. Disponible en: <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=165453>. [Consultado 22-08-2017]
- FARMER, F. (1967). *Siting Criteria: A New Approach*. Proc. Symp. on the Containment and Siting of NPPs. Vienna: IAEA.
- FASSETT, CH. (2017). *Une revue de la littérature sur les thèmes de la confiance et de l'expertise en radioprotection. Rapport final de la tâche 1 du projet SHINRAI*. Disponible en: <https://www.irsn.fr/EN/Research/Research-organisation/Research-programmes/SHINRAI-project/Pages/SHINRAI-project.aspx> [Consultado 18-08-2018]
- FASSETT, CH. y HASEGAWA, R. (2019). *Shinrai Research Project: The 3/11 Accident and its Social Consequences Case Studies from Fukushima Prefecture*. Disponible en: <https://www.irsn.fr/EN/Research/Research-organisation/Research-programmes/SHINRAI-project/Pages/SHINRAI-project.aspx> [Consultado 20-02-2020]
- FEIVENSON, H.A., GLASER, A., MIAN, Z. y HIPEL, F. (2014). *Unmarking the Bomb*. MIT Press.
- FELDHOFF, T. (2018). «Visual Representations of Radiation Risk and the Question of Public (Mis-)Trust in Post-Fukushima Japan». *Societies*. 8, 32.
- FERRANDO, M. G. (1981). «El debate público sobre el uso de la energía nuclear». *Reis*, 57-90.

- FERRER SORIA, A. (2015). *Física nuclear y de partículas*. Disponible en: <http://www.digitaliapublishing.com/a/38884/> [Consultado 22-04-2018]
- FISCHER, L. y BROWN, N. (1995). «Risk-Based and Deterministic Regulation». Conference: Joint American Society of Mechanical Engineers (ASME)/Japan Society of Mechanical Engineers (JSME) pressure vessels and piping.
- FISCHER, D. (1997). *History of the International Atomic Energy Agency: The First Forty Years*. Vienna, IAEA.
- FISCHHOFF, B. (1980). *Approaches to Acceptable Risk: Preliminary Draft of a Report to the Nuclear Regulatory Commission*. Eugene, Or, Decision research.
- FISCHHOFF, B., SLOVIC, P., LICHTENSTEIN, S., READ, S. y COMBS, B. (1978). «How Safe is Safe Enough?: A Psychometric Study of Attitudes Towards Technological Risks and Benefits». *Policy Science*. 9(2), 127-152.
- FLANK, S. (1994). «Exploding the Black Box: The Historical Sociology of Nuclear Proliferation». *Security Studies*. 32, 259-294.
- FLEMING, K. (1986). «A Systematic Procedure for the Incorporation of Common Cause Events into Risk and Reliability Models». *Nuclear Engineering and Design*. 93, 245-273.
- FLEMING, K. y SILADY, F. A. (2002). «A Risk Informed Defense-in-depth Framework for Existing and Advanced Reactors». *Reliability Engineering and System Safety*. 78, 205-225.
- FLORIN, M. y BÜRKLER, M. T. (2017). «Introduction to the IRGC Risk Governance Framework». International Risk Governance Center (IRGC). Disponible en: <http://infoscience.epfl.ch/record/233739>. [Consultado 14-03-2017]
- FOASSO, C. (2003). *Histoire de la sûreté de l'énergie nucléaire civile en France (1945-2000). Technique d'ingénieur, processus d'expertise, question de société*. Lyon, Université Lumière Lyon 2.
- FOERSTER, H. von (2003). *Understanding Understanding: Essays on Cybernetics and Cognition*. Nueva York: Springer.
- FOERSTER, H. von (1981). *Observing Systems*. Seaside, California, Intersystems Publications.
- FOERSTER, H. von (1979). «Cybernetics of Cybernetics». En: Klaus Krippendorff (comp.), *Communication and Control in Society*. Nueva York.
- FORD, D. F. (1984). *The Cult of the Atom: The Secret Papers of the Atomic Energy Commission*. New York, Simon & Schuster.
- FORLAND, A. (1997). *Negotiating Supranational Rules: The Genesis of the International Atomic Energy Agency Safeguards System*. Bergen, University of Bergen.
- FRAME, B. y BROWN, J. (2008). «Developing Post-Normal Technologies for Sustainability». *Ecological Economics*. 65, 225-241.
- FRY, R. M. (1982). *ICRP-Radiation Protection Principles and Practice*. Boas, J.F. (Ed.). Australia.
- FUHRMANN, M. (2010). «Spreading Temptation: Proliferation and Peaceful Nuclear Cooperation Agreements». *Going Nuclear: Nuclear Proliferation and International Security in the 21st Century*. 109-143.
- FUNTOWICZ, S. O. y MARCHI, B. (2003). «Ciencia posnormal, complejidad reflexiva y sustentabilidad». En: Leff, E. et al. (2003). *La complejidad ambiental*. México, PNUMA.
- FUNTOWICZ, S. O. y RAVETZ, J. R. (2000). *La ciencia posnormal. Ciencia con la gente*. Barcelona, Icaria.
- FUNTOWICZ, S. O. y RAVETZ, J. R. (1992). «Three Types of Risk Assessment and the Emergence of Post-normal Science». En Krinsky, S. y Golding, D. (Eds.) (1992). *Social Theories of Risk*. Westport, Conn, Praeger, 251-273.

- FUNTOWICZ, S. O. y RAVETZ, J. R. (1990). *Uncertainty and Quality in Science for Policy*. Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- GABRIEL CALISE, S. (2013). «Tiempo y nuevas tecnologías desde la perspectiva de la teoría de sistemas». *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad-CTS*. 8 (23), 89-111.
- GADDIS, J. L. (1999). *Cold War Statesmen Confront the Bomb: Nuclear Diplomacy since 1945*. Oxford, Oxford University Press.,
- GARCÍA SÁNCHEZ, A. (1999). «Apuntes para una crítica ilustrada a Niklas Luhmann». *Endoxa: Series Filosóficas*. 11, 271-295.
- GARRIDO REBOLLEDO, V. y MARQUINA BARRIO, A. (1995). *El régimen de no-proliferación nuclear participación e implicaciones para España*. Madrid, Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10079244>. [Consultado14-03-2014]
- GEHIN, J. C. (2015). «The History of Molten Salt Program». Workshop on Molten Salt Technologies. Commemorating the 50th Anniversary of the Startup of MSRE Oak Ridge National Laboratory, October 15.
- GELLER, R. (2013). «A Seismologist's View of Nuclear Safety Issues in Japan». *Forum on Energy*. Disponible en: <http://forumonenergy.com/2013/08/15/robert-j-geller-a-seismologists-view-of-nuclear-safety-issues-in-japan-part-i/> [Consultado14-03-2017]
- GIDDENS, A. (1994). «Living in a Post-traditional Society». En Beck, U., Giddens, A. y Lash, S. (Eds.). (1994). *Reflexive Modernization: Politics, Traditions and Aesthetics in the Modern Social Order* (56–109). Cambridge Polity. (*Modernización reflexiva: Política, tradición y estética en el orden social moderno*. Madrid, Alianza, 1997).
- GIL CALVO, E. (1995). *El destino. Progreso, albur y albedrío*. Barcelona, Paidós.
- GLASER, A. (2008). «Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation». *Science and Global Security*. 16 (1-2).
- GOLDBERG, S. y ROSNER, R. (2011). «Nuclear Reactor: Generation to Generation. American Academy of Arts and Sciences». Disponible en: <http://www.amacad.org/pdfs/nuclearreactors.pdf> [Consultado23-03-2014]
- GONZÁLEZ, A. (2018). «Protección contra la exposición a bajas dosis de radiación ionizante: Un paradigma en evolución (Una aproximación a qué y cuánto es una dosis baja)». *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*. 23 (2), 175-198.
- GONZÁLEZ, A. (2017). The Dose and the Dose-rate Efficiency Factor (DDREF): Unneeded, Controversial and Epistemologically Questionable. *Meditsinskaya Radiologiya*. 62(2), 13-26.
- GONZÁLEZ, A. (2014). «Clarifying the Paradigm on Radiation Effects & Safety Management: UNSCEAR Report on Attribution of Effects and Inference of Risks». *Nuclear Engineering and technology*. 46, 467-474.
- GONZÁLEZ, A. (2012). «Fortalecimiento de la protección radiológica: aprendiendo de los accidentes». Jornadas Nacionales de Protección Radiológica. Buenos Aires, 23 y 24 de Agosto del 2012.
- GONZÁLEZ, A. (2011). «La Seguridad Nuclear: escenarios posibles post-Fukushima». Buenos Aires, Argentina, ANI. Academia Nacional de Ingeniería. Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10721558> [Consultado14-08-2018]
- GONZÁLEZ, A. (2011). «Las recomendaciones vis-à-vis las secuelas del accidente de Fukushima Daiichi: Algunas lecciones preliminares» Disponible en: <http://www.foroiberam.org/documents> [Consultado14-08-2017]
- GONZÁLEZ, A. (2002). «The Debate on the Health Effects Attributable to Low Radiation Exposure». *Pierce Law Review*. 1(1-2), 39-67.



- GONZÁLEZ, A. (1994). «Los efectos biológicos de las dosis bajas de radiación ionizante: Una visión más completa». *Boletín del OIEA*, No. 4, pp. 37-45.
- GONZÁLEZ, A. J., AKASHI, M., BOICE, J.D. *et al* (2013). «Radiological Protection Issues Arising During and After the Fukushima Nuclear Reactor Accident. *Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection*. 33 (3), 497–571.
- GONZÁLEZ GARCÍA, J. M. (2006). *La diosa Fortuna: metamorfosis de una metáfora política*. Boadilla del Monte, Madrid, Antonio Machado Libros.
- GONZÁLEZ GARCÍA, J. M. (1998). *Metáforas del Poder*. Madrid, Alianza Editorial, 1998.
- GONZÁLEZ GARCÍA, M., LÓPEZ CERREZO, J.A, y LÓPEZ LUJÁN, J. L (1997). *Ciencia, tecnología y sociedad*. Barcelona, Ariel.
- GONZÁLEZ, W. J. (2010). *La predicción científica: concepciones filosófico-metodológicas desde H. Reichenbach a N. Rescher*. Barcelona, Montesinos.
- GORBACHEV, M. (2006). «Turning Point at Chernobyl». Disponible en: [https://www.gorby.ru/en/presscenter/publication/show\\_25057/](https://www.gorby.ru/en/presscenter/publication/show_25057/) [Consultado14-08-2014]
- GORINSON, S. M. (1980). *Staff Report to the President's Commission on the Accident at Three Mile Island: the Nuclear Regulatory Commission*. Washington, D.C., [Nuclear Regulatory Commission].
- GOWING, M. (1987). *How Nuclear Power Began*. Southampton, University of Southampton.
- GRANT, P. (2007). «Chauncey Starr: A Personal Memoir». *Power*. 151 (6), 20-21.
- GREENPEACE (2015). *Los efectos de Fukushima*. Disponible en: <http://www.archivo-es.greenpeace.org> [Consultado17-03-2016]
- GREENPEACE (2012). *Lessons from Fukushima*. Disponible en: <http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/nuclear/2013/BeyondNuclear.pdf>. [Consultado17-03-2014]
- GREENSTOCK, J. (2008). «The Security Council in the Post-Cold War World». *United Nations Security Council and War : the Evolution of Thought and Practice Since 1945*. 248-262.
- GRELLIER, J. *et al*. (2017). «Risk of Lung Cancer Mortality in Nuclear Workers from Internal Exposure to Alpha Particle-emitting Radionuclides». *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*. 28, 675-684.
- GRIMSTON, M., NUTTALL, W. J. y VAUGHAN, G. (2014). «The Siting of UK Nuclear Reactors». *Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection*. 34, 1-24.
- GRIMVALL, G., HOLMGREN, A. J., JACOBSSON, P. y THEDÉEN, T. (Eds.) (2010). *Risks in Technological Systems*. London, Springer-Verlag London. Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10351744>. [Consultado14-10-2013]
- GRUNDMANN, R. (2017). «The Problem of Expertise in Knowledge Societies». *Minerva: A Review of Science, Learning and Policy*. 55, 25-48.
- GÜELL, R., VERA, M., PIÑEIRO, R., HERNÁNDEZ, C., ARAUJO, O., MEDINA, J., HERNÁNDEZ, J., VIÑALS, J., ESPINOSA, T. y CASTELLO, L. (2004). «Proyecto de ayuda a niños afectados por el accidente de Chernobyl. Aspectos endocrinos». Disponible en: <http://files.sld.cu/chernobil/files/2009/04/proyecto-de-ayuda-a-ninos-afectados-por-el-accidente-de-chernobil-aspectos-endocrinos.pdf> [Consultado14-08-2012]
- GUIDEZ, J., y PRÊLE, G. (2017). *Superphenix: Technical and Scientific Achievements*. Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1452509>. [Consultado10-03-2017]
- GUSTERSON, H. (1998). *Nuclear Rites: A Weapons Laboratory at the End of the Cold War*. University of California Press, California.

- HABERMAS, J. (1990). «Discusión con Niklas Luhmann (1971): ¿teoría sistémica de la sociedad o teoría crítica de la sociedad? En Habermas, J.: *La lógica de las ciencias sociales*. Madrid. Tecnos.
- HABERMAS, J. (1989). *El discurso filosófico de la Modernidad*. Taurus, Madrid.
- HABERMAS, J. (1987). *The Theory of Communicative Action*. Vol.2.: *Lifeworld and System: A Critique of Functionalist Reason*. Cambridge, Polity Press. (*Teoría de la acción comunicativa*. T. II: *Crítica de la razón funcionalista*. Taurus, Madrid, 1987).
- HABERMAS, J. (1984). *The Theory of Communicative Action*. Vol.1.: *Reason and the Rationalization of Society*. London, Heinemann. (*Teoría de la acción comunicativa*. T. I: *Racionalidad de la acción y racionalización social*. Taurus, Madrid, 1987).
- HABERMAS, J. y LUHMANN, N. (1971). *Theorie der Gesellschaft Oder Sozialtechnologie*. Frankfurt a. M., Shurkamp Verlag.
- HACKER, B. C. (1987). *The Dragon's Tail: Radiation Safety in the Manhattan Project, 1942-1946*. Berkeley, University of California Press.
- HAGEN, E. W. (1980). «Common-mode/Common-cause Failure: A Review». *Annals of Nuclear Energy*. 7(9), 509-517.
- HATANAKA, T., YOSHIDA, S., OJINO, M. y ISHII, M. (2014). «The Communication of Information such as Evacuation Orders at the Time of a Nuclear Power Station Accident: Recommendations for Responses by the National Government and Electric Power Utilities to the 'Information Disaster'». *JMAJ*. 57 (5-6), 293-319.
- HAYAKAWA, M. (2016). «Increase in Disaster-related Deaths: Risks and Social Impacts of Evacuation». *Annals of the ICRP*. 45 (2\_suppl): 123-128.
- HAYNS, M.R. (1999). «The Evolution of Probabilistic Risk Assessment». *ICChemE*. 77, 117-142.
- HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE, LONDON. (1988). *The Tolerability of Risk from Nuclear Power Stations*. London, H.M.S.O.
- HECHT, G. (2012). «An Elemental Force: Uranium Production in Africa, and What it Means to be Nuclear». *Bulletin of the Atomic Scientists*. 68, 22-33.
- HECHT, G. (2006). «Nuclear Ontologies». *Constellations*. 13, 320-331.
- HECHT, G. (1998). *The Radiance of France Nuclear Power and National Identity After World War II*. Cambridge, Mass, MIT Press.
- HECHT, G. (1992). *The Reactor in the Vineyard: Technological Choice and Cultural Change in the French Nuclear Program, 1945-1969*. Thesis (Ph. D.). University of Pennsylvania, 1992.
- HECHT, G. y EDWARDS, P.N. (2007). *The Technopolitics of Cold War: Toward a Transregional Perspective*. Washington, D.C., American Historical Association.
- HEISENBERG, W. (1959). *Física y filosofía*. Disponible en: <http://quijote.biblio.iteso.mx/dc/ver.aspx?ns=000008495> [Consultado 10-02-2013] (obra original: *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. New York, Harper, 1958).
- HEWLETT, R. G. y DUNCAN, F. (1974). *Nuclear Navy, 1946-1962*. University of Chicago Press.
- HEWLETT, R. G. y HOLL, J. M. (1989). *Atoms for Peace and War, 1953-1961: Eisenhower and the Atomic Energy Commission*. Berkeley, University of California Press.
- HERKEN, G. (2002). *Brotherhood of the Bomb: the Tangled Lives and Loyalties of Robert Oppenheimer, Ernest Lawrence, and Edward Teller*. New York, Henry Holt and Co.
- HERMSMEYER, S. et al. (2015). «Review of Current Severe Accident Management (SAM) Approaches for Nuclear Power Plants in Europe». Luxembourg, Publications Office. Disponible en: <http://bookshop.europa.eu/uri?target=EUB:NOTICE:LDNA26967:EN:HTML>. [Consultado 10-02-2017]

- HILGARTNER, S. (2009). «Las dimensiones sociales del conocimiento experto del riesgo». En: Moreno Castro (Ed.) *Comunicar los riesgos. Ciencia y tecnología en la sociedad de la información*. Madrid, Biblioteca Nueva, OEI, 159-170.
- HILL, A. B. (1965). «The Environment and Disease: Association or Causation?» *Proceedings of the Royal Society of Medicine*. 58, 295-300.
- HIPPEL, F. von (2011). «The Radiological and Psychological Consequences of the Fukushima Daiichi Accident». *Bulletin of the Atomic Scientists*. 67, 27-36.
- HOOKER, A.M. (2011). «Radiation and Risk: Is it Time for a Regulatory Threshold Dose?». *Australasian Physical and Engineering Sciences in Medicine*. 34 (3): 299-301.
- HOLLOWAY, D. (1994). *Stalin and the Bomb: The Soviet Union and Atomic Energy, 1939-1956*. New Haven, Yale University Press.
- HOMMA, T. (2018). «Modern Emergency Planning and Response: Lessons Learned After Fukushima». Disponible en <https://inla2018uae.com/wp-content/uploads/sites/23/2018/10/INLA-CP-Modern-emergency-planning-and-response-leassons-learned-after-Fukushima-by-Homma.pdf> [Consultado 30-04-2019]
- HOPKINS, A. (2007). «The Problem of Defining High Reliability Organisations». National Research Centre of Regulation. The Australian National University. Disponible en <https://ohs.anu.edu.au/publications/pdf/wp%2051%20-%20Hopkins.pdf> [Consultado 30-04-2013]
- HUGHES, T. P. (1989). *American Genesis: A Century of Invention and Technological Enthusiasm, 1870-1970*. New York, N.Y., U.S.A., Viking.
- HUGHES, T. P., HUGHES, A. C., ALLEN, M. T. y HECHT, G. (2001). *Technologies of Power Essays in Honor of Thomas Parke Hughes and Agatha Chipley Hughes*. Cambridge, Mass, MIT Press.
- HYMANS, J. (2006). «Theories of Nuclear Proliferation». *The Nonproliferation Review*. 13, 455-465.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2016a). *Site Evaluation for Nuclear Installations*. Safety Requirements NS-R-3 (Rev. 1).
- IAEA (2016). *Seismic Hazard Assessment in Site Evaluation for Nuclear Installations: Ground Motion Prediction Equations and Site Response*. A TECDOC No. 1796. Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1796\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1796_web.pdf) [Consultado 30-04-2017]
- IAEA (2015a). *The Fukushima Daiichi Accident*. Disponible en: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1710-ReportByTheDG-Web.pdf>. [Consultado 14-01-2015]
- IAEA (2015b). *Vienna Declaration on Nuclear Safety*. Disponible en: [https://www.iaea.org/sites/default/files/infocirc872\\_sp.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/infocirc872_sp.pdf) [Consultado 14-01-2015]
- IAEA (2015c). *Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency: General Safety Requirements*. Safety Standards Series No. GSR Part 7. Disponible en: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/6477/Preparedness-and-Response-for-a-Nuclear-or-Radiological-Emergency> [Consultado 20-03-2015]
- IAEA (2015d). *The Contribution of Palaeoseismology to Seismic Hazard Assessment in Site Evaluation for Nuclear Installations*. IAEA-TECDOC-1767. Disponible en: <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10887/The-Contribution-of-Palaeoseismology-to-Seismic-Hazard-Assessment-in-Site-Evaluation-for-Nuclear-Installations> [Consultado 30-03-2015]
- IAEA (2014). *The Use of the International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) for Event Communication. Guidelines and Good Practices for Setting up a National Framework on the Effective Use of INES for Event Communication*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2010a). *Technical Features to Enhance Proliferation Resistance of Nuclear Energy Systems*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2010b). *Site Evaluation for Nuclear Installations*. Vienna, International Atomic Energy Agency.

- IAEA (2010c) *Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2006). *Characterization, Treatment and Conditioning of Radioactive Graphite from Decommissioning of Nuclear Reactors*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2005). *Management of High Enriched Uranium for Peaceful Purposes: Status and Trends*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1996a). *Defence in Depth in Nuclear Safety: INSAG 10: a report*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1996b). *International basic safety standards for protection against ionizing for the safety of radiation sources*. Vienna: IAEA.
- IAEA (1992). *The Chernobyl accident: updating of INSAG-1: INSAG-7: a report*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1991a). *Safety culture: a report: INSAG-4*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1991b). *Safety report: a report by the International Nuclear Safety Advisory Group*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1991c). *The International Chernobyl Project: Technical Report*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1990). *The International Nuclear Event Scale, (INES): User's Manual*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1989). *Report on a Radiological Accident in the Southern Urals on 29 September 1957*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1986). *Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident*. Safety Guides No. 72. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA (1985a). *Principles for Establishing Intervention Levels for the Protection of the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency*. Safety Series. No. 75. Vienna.
- IAEA (1985b). *Principles for Establishing Intervention Levels for the Protection of the Public in the Event of a Nuclear Accident or Radiological Emergency*. Safety Series. No. 72. Vienna.
- IAEA e ICRP (1979). *Application of the Dose Limitation System for Radiation Protection: Practical Implications: Proceedings of a Topical Seminar on the Practical Implications of the ICRP Recommendations (1977), Vienna, 5-9 March 1979*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) y OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY. (2013). *INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale User's Manual*. Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCDD/Publications/PDF/INES2008\\_Rev\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCDD/Publications/PDF/INES2008_Rev_web.pdf). [Consultado 30-04-2020]
- IAEA y OECD/NEA (2009). *INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale: User's Manual*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA y OECD/NEA (2001). *INES: The International Nuclear Event Scale User's Manual*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- IAEA y OECD/NEA (1992). *INES: The International Nuclear Event Scale User's Manual*. Vienna, International Atomic Energy Agency.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2019). *World Energy Outlook 2019*.
- ICRP (2018). *Ethical Foundations of the System of Radiological Protection*. ICRP Publication 138. *Annals of the ICRP*. 47(1).
- ICRP (2012a). *ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs-Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context*. Publication 118. *Annals of the ICRP*. 41(1-2). Amsterdam-New York: Elsevier.

- ICRP (2012b) *Report of ICRP Task Group 84 on Initial Lessons Learned from the Nuclear Power Plant Accident in Japan vis à vis the ICRP System of Radiological Protection*. Ottawa.
- ICRP (2011). *Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency*. Publication 111. *Annals of the ICRP*. 39 (3).
- ICRP (2009). *Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations*. Publication 109. *Annals of the ICRP*. 39 (1).
- ICRP (2007). *The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publication 103. *Annals of the ICRP*. 37 (2-4), Ottawa. (*Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Publicación 103. Madrid, Sociedad Española de Protección Radiológica).
- ICRP (1999). *Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure*. Publication 82. *Annals of the ICRP*. 29 (1-2).
- ICRP, (1992). *Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency*. ICRP Publication 63. *Annals of the ICRP*. 22 (4).
- ICRP (1991). *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publication 60. *Annals of the ICRP*. 21 (1-3).
- (ICRP, 1984). *Protection of the Public in the Event of Major Radiation Accidents-Principles for Planning*. ICRP Publication 40. *Annals of the ICRP*. 14 (2).
- ICRP (1983). *Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection*. ICRP Publication 37. *Annals of the ICRP*. 10 (2-3).
- ICRP (1977). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publication 26. *Annals of the ICRP*. 1 (3).
- ICRP (1964). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP. Publication 6. Pergamon Press, Oxford
- ICRP (1959). *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Now known as ICRP Publication 1. Pergamon Press, New York
- IGUCHI, S. (2019). *Risk Sociology and the Fukushima Nuclear Disaster*. Kyoto University.
- IKEDA, S. (2013). «Beyond Conventional Scope of Risk Analysis: Lessons from the 3.11 Earthquake, Tsunami, and Fukushima Nuclear Disaster». En Ikeda, S. y Maeda, Y. (Eds.) *Emerging Issues Learned from the 3.11 Disaster as Multiple Events of Earthquake, Tsunami and Fukushima Nuclear Accident*. The Society for Risk Analysis, Japan.
- INMAN, J. W. (2015). «Nimby Politics and Nuclear Power. Applying the Lessons From Three Mile Island». *The Journal of Purdue Undergraduate Research*. Vol. 5.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (IOS) (2007). *Ionizing-Radiation Warning*. Geneva, Switzerland, International Organization for Standardization.
- INTERNATIONAL SEISMIC SAFETY ORGANIZATION (ISSO) (2012). *Position Statement of Earthquake Hazard Assessment and Design Load for Public Safety*.
- IONESCU, T. (2019). «Simulation, Epistemic Opacity, and 'Envirothecnical Ignorance' in Nuclear Crisis». *Minds and Machines*. 29, 61-86.
- JAEGER, C. C., RENN, O., ROSA, E. A. y WEBLER, T. (2001) *Risk, Uncertainty and Rational Action*. London, Earthscan.
- JANKOWITSCH, O. y FLAKUS, F. N. (1994). «Convención internacional sobre seguridad nuclear: Un hito jurídico». *Boletín del OIEA*. 3, 36-40.
- JAPAN (2012). *The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission: Executive Summary*. Disponible en: <http://www.aspresolver.com/aspresolver.asp?ENGV;2106023>. [Consultado 20-03-2013]

- JAWOROWSKI, Z. (2010). «Observations on the Chernobyl Disaster and LNT». *Dose-Response*. 8, 148-17.
- JASANOFF, S. (2005). *Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United State*. Princeton/Oxford: Princeton University Press.
- JASANOFF, S. (2003). «Breaking the Waves in Science Studies». *Social Studies of Science*. 33, 389-400.
- JASANOFF, S. (1990). *The Fifth Branch: Science Advisors as Policymakers*. London, Harvard University Press.
- JASPER, U. (2014). *The Politics of Nuclear Non-proliferation: A Pragmatist Framework for Analysis*. London, Routledge.
- JENSEN, S. E. y ØLGAARD, P. L. (1996). *Description of the Prototype Fast Reactor at Dounreay*. Roskilde, NKS.
- JONAS, H. (1995). *El principio de responsabilidad: ensayo de una ética para la civilización tecnológica*. Barcelona, Herder.
- JONES, S. (2007). «Windscale and Kyshtym: a Double Anniversary». *Journal of Environmental Radioactivity*. 99, 1-6.
- JORDAN, T. H. (2014). «The Prediction Problems of Earthquake System Science». *Seismological Research Letters*. 85, 767-769.
- NÖGGERATH, J., GELLER, R. J. y GUSIAKOV V. K. (2011). «Fukushima: The Myth of Safety, the Reality of Geoscience». *Bulletin of the Atomic Scientists*. 67, 37-46.
- KAI, M. (2013). «Experience and Current Issues with Recovery Management from the Fukushima Accident». *Annals of the ICRP*.
- KAISER, D. (2005). «The Atomic Secret in Red Hands? American Suspicions of Theoretical Physicists During the Early Cold War». *Representations*. 90, 28-60.
- KANETAKE, M. (2017). «The Dual Vulnerability of Transnational, Science-Based Standards in the National Legal Order». Disponible en: <http://hdl.handle.net/1874/347759>. [Consultado 30-04-2018]
- KAWASE, H. et al. (2012). «Earthquake, Geology, and Tsunami». *Earthquake, Geology, and Tsunami. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 23, 29-113.
- KAMIYA, K., OZASA, K., AKIBA, S., NIWA, O., KODAMA, K., TAKAMURA, N., ZAHARIEVA, E. K., KIMURA, Y. y WAKEFORD, R. (2015). «Long-term Effects of Radiation Exposure on Health». *Lancet*. Disponible en: [https://nls.ldls.org.uk/welcome.html?ark:/81055/vdc\\_100042385370.0x00003c](https://nls.ldls.org.uk/welcome.html?ark:/81055/vdc_100042385370.0x00003c). [Consultado 20-03-2018]
- KASPERSON, R. (2012) «The Social Amplification of Risk and Low-level Radiation». *Bulletin of the Atomic Scientists*. SAGE Publications.
- KASPERSON, J. X. y KATES, R. W. (1983). «Comparative Risk Analysis of Technological Hazards (A Review)». *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 80, 7027.
- KASPERSON, J. X., KASPERSON, R. E., HOHENEMSER, C. y KATES, R. W. (1979). «Institutional Responses to Three Mile Island». *Bulletin of the Atomic Scientists*. 35, 20-24.
- KASPERSON, R., RENN, O., SLOVIC, P., BROWN, H., EMEL, J., GOBLE, R., KASPERSON, J. y RATICK, S. (1988). «Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework». *Risk Analysis*. 8:2, 177-187.
- KATHREN, R. L. (2012). «Historical Development of the Linear Nonthreshold Dose-Response Model as Applied to Radiation». *Pierce Law Review*. 1: 1/2, 5-30. Disponible en: [http://scholars.unh.edu/unh\\_lr/vol1/iss1/5](http://scholars.unh.edu/unh_lr/vol1/iss1/5) [Consultado 20-03-2017]
- KATO, H. y SHIGEMATSU, I. (1984) *Efectos tardíos de las radiaciones de la bomba atómica: Hiroshima y Nagasaki*. Ginebra, CH.

- KELLY, C. C. (2007). *The Manhattan Project: the Birth of the Atomic Bomb in the Words of its Creators, Eyewitnesses, and Historians*. New York, Black Dog & Leventhal Publishers.
- KELLER, W. y MODARRES, M. (2005). «A Historical Overview of Probabilistic Risk Assessment Development and Its Use in the Nuclear Power Industry: A Tribute to the Late Professor Norman Carl Rasmussen». *Reliability Engineering and System Safety*. 89, 271-285.
- KEMENY, J. G. (1980). *Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island: the Need for Change: The Legacy of TMI*, October 1979, Washington, D.C.
- KENNEDY-PIPE, C. (2007). *The Origins of the Cold War*. Basingstoke, Hampshire, Palgrave Macmillan.
- KERMISCH (2011). «Questioning the INES Scale After the Fukushima Daiichi Accident». *Ethics, Policy X Environment*. 14 (3), 279-283.
- KERMISCH y Labeau (2013). «Communicating About Nuclear Events: Some Suggestion to Improve INES». *Reliability Engineering X Sistem Safety*. 119, 165-171.
- KERR, A. (2004). *Genetics and Society: a Sociology of Disease*. London and New York: Routledge.
- KINOSHITA, T. (2011). «Rethinking Assumptions: The Post-Fukushima Risk Assessment Controversy. Emerging Issues Learned from the 3.11 Disaster as Multiple Events of Earthquake, Tsunami and Fukushima Nuclear Accident». Disponible en: <http://www.sra-japan.jp/cms/uploads/311Booklet.pdf> [Consultado 23-04-2014]
- KINSELLA, W. J. (2015). «Being “Post-Fukushima”: Divergent Understandings of Sociotechnical Risk». Fukushima Global Communication Programme Working Paper Series. 18. UNU-IAS.
- KLINKE, A. y RENN, O. (2002). «A New Approach to Risk Evaluation and Management: Risk-Based, Precaution-Based, and Discourse-Based Strategies». *Risk Analysis*. 22, 1071-1094.
- KLINKE, A. y RENN, O. (2012). «Systemic Risks as Challenge for Policy Making in Risk Governance». Deutschland. Disponible en: <http://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/8754> [Consultado 23-04-2014]
- KLUGËL, J. (2011). «Uncertainty Analysis and Expert Judgment in Seismic Hazard Analysis». *Pure and Applied Geophysics*. 168, 27-53.
- KNIGHT, F. H. (1921). *Risk, Uncertainty and Profit: With an additional Introductory Essay Hitherto Unpublished*. Boston, Houghton Mifflin. (*Riesgo, incertidumbre y beneficio*. Madrid, M. Aguilar, 1947).
- KNORR-CETINA, K. (2009). *The micro-sociological Challenge of Macro-sociology Towards a Reconstruction of Social Theory and Methodology*. Konstanz, Bibliothek der Universität Konstanz.
- KOCHER, D. C. (1991). «Perspective on the Historical Development of Radiation Standards». *Health Physics*. 61, 519-527.
- KOHLER, B. P. (2012). *Dirty Bombs: Elements, Prevention and Response*. Hauppauge, N.Y., Nova Science Publishers.
- KRIMSKY, S. (2007). «Risk Communication in the Internet Age: The Rise of Disorganized Skepticism». *Environmental Hazards*. 7(2), 157-164.
- KRIMSKY, S. y GOLDING, D. (1992). *Social Theories of Risk*. Westport, Conn, Praeger.
- KUHN, T. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Editorial Fondo de Cultura Económica.
- KUSCH, M. (2007). «Towards a Political Philosophy of Risk». En: T. Lewens (Ed.). *Risk: Philosophical Perspectives*. London: Routledge, 131-55.
- LAKATOS, I. (1970). «Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes». En: Lakatos, I. y Musgrave, A. (Eds.): *Criticism and the Growth of Knowledge*. New York, Cambridge University Press, 1970, 91-196.

- LAKOFF, G. y JOHNSON, M. (1980). *Metaphors We Live by*. Chicago, University of Chicago Press. (*Metáforas de la vida cotidiana*. Madrid, Cátedra, 2009).
- LANOUILLE, W. y SILARD, B. A. (1992). *Genius in the Shadows: A Biography of Leo Szilard: the Man Behind the Bomb*. New York, C. Scribner's Sons.
- LA PORTE, T. (1982). «On the Design and Management of Nearly Error-Free Organizational Control Systems». En: Sils, D., Wolf, C. y Shelanski, V. (eds.): *Accident at Three Mile Island: The Human Dimensions*, Westview, Boulder, pp- 185-198.
- LASH, S. (2000). «Risk Culture». En: Adam, B., Beck, U., y Van Loon, J. (Eds.). *The Risk Society and Beyond: Critical Issues for Social Theory*, London, SAGE, 47-62.
- LAURETO, J. y PEARCE, J. (2016). «Nuclear Insurance Subsidies Cost from Post-Fukushima Accounting Based on Media Sources». *Sustainability*. 8, 1301.
- LAZO, T. (2016). «Involving Stakeholders in Radiological Protection Decision Making: Recovery History and Lessons from the People of Fukushima». *Annals of the ICRP*. 45, 105-109.
- LEA, D. (1946). «The Inactivation of Viruses by Radiations». *The British Journal of Radiology*. 19, 205-12.
- LEDERMAN, L. (1996). «Seguridad de los reactores RBMK: establecimiento del marco técnico». *Boletín del OIEA*. 1, 10-17.
- LEISS, W. (1996). «Three Phases in the Evolution of the Risk Communication Practice». *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*. 545 (1), 85-94.
- LEMMERICH, J. y HENTSCHEL, A. (2011). *Science and Conscience: The Life of James Franck*. Stanford, California, Stanford University Press.
- LEWIS, H. W. (1978). *Risk Assessment Review Group Report to the U. S. Nuclear Regulatory Commission*. [PWR; BWR].
- LEWKOW, L. (2012). «Luhmann como intérprete de Husserl: el problema del sentido». *Nómadas. Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas*. 34. Disponible en: [http://http://dx.doi.org/10.5209/rev\\_NOMA.2012.v34.n2.40738](http://dx.doi.org/10.5209/rev_NOMA.2012.v34.n2.40738) [Consultado 20-02-2017]
- LINDELL, B. (1999). «A Brief History of ICRP. Part 1-the Early Years (1928-1958)». *Radiological Protection Bulletin*. 1999, 5-9.
- LINDØE, P. y OLSEN, O. E. (2009). «Conflicting goals and mixed roles in risk regulation: a case study of the Norwegian Petroleum Directorate». *Journal of Risk Research*. 12, 3-4.
- LLORY, M. (2004). «Una nueva perspectiva para la seguridad y la prevención. Más allá de los riesgos del error humano, los riesgos organizativos». En: *Jornada técnica «Nuevos riesgos emergentes»*. Madrid, Asepeyo, 23-38.
- LOCATELLI, G. y TODESCHINI, N. (2013). «Generation IV Nuclear Reactors: Current Status and Future Prospects». *Energy Policy*. 51, 1503-1520.
- LOCHARD, J. (2015). «Application of the Commission's Recommendations: The 2013-2017 Committee 4 Programme of Work». *Annals of the ICRP*. 44, 33-46.
- LOCHARD, J. (2014). «An Introduction to the Ethical Foundations of the Radiological Protection Systems». *First IRPA North American Workshop on the Ethics of Radiological Protection Baltimore*, Maryland, USA, 17-18 julio.
- LOCHARD, J. (2011). «Fundamentos y aplicación del sistema de protección radiológica en los usos médicos». En: *Encuentro sobre la protección radiológica en salud*. Universidad Internacional Menéndez Pelayo, 4-6 de julio. Consejo de Seguridad Nuclear.
- LOMBARDI, O. y PÉREZ, A. R. (2010). «En defensa de la autonomía de la química frente a la física. Discusión de un problema filosófico». En: Chamizo, J. A. (Coord.). *Historia y filosofía de la química. Aportes para la enseñanza*, México, Siglo XXI Editores, 95-209.



- LÓPEZ CERREZO, J. A. y LUJÁN, J. L. (2000). *Ciencia y política del riesgo*. Madrid, Alianza Editorial.
- LÓPEZ CERREZO, J. A. y GONZÁLEZ GARCÍA, M.I (2002). *Políticas del bosque*. Madrid, Cambridge University.
- LOWE, A. V. (2008). *The United Nations Security Council and War the Evolution of Thought and Practice Since 1945*. Oxford, UK, Oxford University Press.
- LUHMANN, N. (2012). «¿Puede la sociedad moderna evitar los peligros ecológicos?» *Argumentos. Estudios críticos de la sociedad* (24), 81-97.
- LUHMANN, N. (2006). *La sociedad de la sociedad*. Ciudad de México: Universidad Iberoamericana-Herder.
- LUHMANN, N. (2005): *El arte de la sociedad*. México: Universidad Iberoamericana.
- LUHMANN, N. (2002a). *Introducción a la teoría de los sistemas*. Madrid, España: Anthropos.
- Luhmann, N. (2002b). «What is Communication?». En: N. Luhmann. *Theories of distinction: redescribing the descriptions of modernity*. Palo Alto, CA: Stanford University Press.
- LUHMANN, N. (2000): *La realidad de los medios de masas*. Barcelona: Universidad Iberoamericana/ Anthropos Editorial
- LUHMANN, N. (1997). *Observaciones de la modernidad: racionalidad y contingencia en la sociedad moderna*. Barcelona, Paidós (obra original: *Beobachtungen der Moderne. Opladen, Westdeutscher Verlag, 1992*).
- LUHMANN, N. (1996a). «La contingencia como atributo de la sociedad moderna». En: BERIAÍN, J. (comp.). *Las consecuencias perversas de la modernidad. Modernidad, contingencia y riesgo*. Barcelona, Anthropos.
- LUHMANN, N. (1996b). «El concepto de riesgo». En: BERIAÍN, J. (comp.). *Las consecuencias perversas de la modernidad. Modernidad, contingencia y riesgo*. Barcelona, Anthropos, 123-153.
- LUHMANN, N. (1996c). *La ciencia de la sociedad*. México: Universidad Iberoamericana
- LUHMANN, N. (1995). «¿Cómo se pueden observar estructuras latentes?» En: WATZLAWICK, P. y KRIEG, P. (comp.). *El ojo del observador. Contribuciones al constructivismo*. Editorial Gedisa, Barcelona.
- LUHMANN, N. (1992). *Sociología del riesgo*. Universidad Iberoamericana, México. (obra original: *Soziologie des Risikos*. Berlin, W. de Gruyter, 1991).
- LUHMANN, N. (1991). *Sistemas sociales, Lineamientos para una Teoría General*. México, Alianza Iberoamericana.
- LUHMANN, N. (1986). *Ökologische Kommunikation*. The University Chicago Press.
- LUHMANN, N. (1996). «¿Puede la sociedad moderna evitar los peligros ecológicos?» *Argumentos. Estudios críticos de la sociedad* (24), 81-97.
- LUHMANN, N. (1984). *Soziale Systeme: Grundriss Einer Allgemeinen Theorie*. Frankfurt am Main, Suhrkamp.
- LUHMANN, N. y DE GIORGI, R. (1993). *Teoría de la sociedad*. Guadalajara, México: Universidad de Guadalajara/Universidad Iberoamericana/Iteso.
- LUJÁN, J. L. y ECHEVERRÍA, J. (2009). *Gobernar los riesgos: ciencia y valores en la sociedad del riesgo*. Madrid, Biblioteca Nueva.
- LUPTON, D. (1991). *Risk and Sociocultural Theory*. Cambridge, Cambridge University Press.
- MACKENZIE, D. A. (1990). *Inventing Accuracy: A Historical Sociology of Nuclear Missile Guidance*. Cambridge, Mass, MIT Press.

- MAEDA, M., OE, M. y SUZUKI, Y. (2018). «Psychosocial Effects of the Fukushima Disaster and Current Tasks: Differences between Natural and Nuclear Disasters». *Hoken Iry Kagaku*. 67, 50-58.
- MALIK, J. (1985). *The Yields of the Hiroshima and Nagasaki Nuclear Explosions*. Los Alamos National Laboratory.
- MALLOY, S. L. (2012). «‘A Very Pleasant Way to Die’: Radiation Effects and the Decision to Use the Atomic Bomb against Japan». *Diplomatic History*. 36, 515-545.
- MANGANO, J. J. y SHERMAN, J. D. (2011). «Elevated in Vivo Strontium-90 from Nuclear Weapons Test Fallout among Cancer Decedents: A Case-Control Study of Deciduous Teeth». *International Journal of Health Services*. 41, 137-158.
- MARCHI, B. (1995). «Uncertainty in Environmental Emergencies: A Diagnostic Tool». *Journal of Contingencies and Crisis Management*. 3 (2), 103-112.
- MARCOS, A. (2016). «Vulnerability as a Part of Human Nature». En: Masferrer, A. y García-Sánchez, E. (Eds.). *Human Dignity of the Vulnerable in the Age of Rights*. Springer International Publishing. 29-44.
- MARCOS, A. (2015). «Neuroética y vulnerabilidad humana en perspectiva filosófica». *Cuadernos de Bioética: Revista oficial de la Asociación Española de Bioética y Ética médica*. 26.
- MARCOS, A. (2010). *Ciencia y acción. Una filosofía práctica de la ciencia*. México, Fondo de Cultura Económica.
- MARCOS, A. (2000). *Hacia una filosofía de la ciencia amplia: descubrimiento, justificación y otras artes*. Madrid, Tecnos.
- MARCOS, A. (1995). «Biología, realismo y metáfora». *Ágora-Papeles de Filosofía*. 14 (1), 77-97.
- MARCU, L. (2009). «Cellular Bystander Effects and Radiation Hormesis». *Analele Universitatii Din Oradea: Fascicula Biologie*. XVI, 66-70.
- MARK, J.C., HIPPEL, F. V. y LYMAN, E. (2009). «Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium», *Science & Global Security*. 17 (2-3), 170-185.
- MARTÍNEZ-BETANCUR, O. (2010). «Leucemias y radiación: juicio causal según los criterios de Sir Austin Bradford Hill». *Revista Facultad de Medicina*. 58, 236-249.
- MARZOCCHI, W. y ZECHAR, J. D. (2011). «Earthquake Forecasting and Earthquake Prediction: Different Approaches for Obtaining the Best Model». *Seismol. Res. Lett.* 82, 442-448.
- MATTSSON, S. y HOESCHEN, C. (2013). *Radiation Protection in Nuclear Medicine*. Heidelberg, Springer.
- MATURANA, H. y VARELA, F. (1984). *El árbol del conocimiento: las bases biológicas del entendimiento humano*. Santiago, Universitaria.
- MATURANA, H. y VARELA, F. (1980). *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*. Dordrecht-Boston, D. Reidel.
- MATURANA, H. y VARELA, F. (1973). *De máquinas y seres vivos*. Santiago, Editorial Universitaria.
- MAZUR, A. (1985) «Bias in Risk-Benefit Analysis». *Technology in Society*. 12 (1), 25-30.
- MAZUR, A. (1973). «Disputes Between Experts». *Minerva*. 11 (2), 243-262.
- McCULLOUGH, R., MILLS, M. y TELLER, E. (1955). «The Safety of Nuclear Reactor». *Proc. Ist. United Nation International Conference on the Peaceful Uses of Nuclear Energy*. United Nation. New York.
- McGEOGHEGAN, D. y BINKS, K. (2000). «Mortality and Cancer Registration Experience of the Sellafield Employees Known to Have Been Involved in the 1957 Windscale Accident». *Journal of Radiological Protection*. 20, 261-274.

- McGLINCHEY, S. (2016). «International Monitoring of North Korea's 2016 Nuclear Test». *E-International Relations*. 2016-02.
- MCLAUGHLIN, T., MONAHAN, S., PRUVOST, N., FROLOV, V., RYAZANOV, B. y SVIRIDOV, V. (2006). *A Review of Criticality Accidents 2000 Revision*. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/758324-OEi2LJ/webviewable/> [Consultado 20-03-2014]
- MEDINA, J. y GARCÍA, O. (2016). «Resultados finales del programa cubano con niños de territorios afectados por el accidente de Chernobil». *Nucleus*. 60. Disponible en: <http://www.nucleus.cubaenergia.cu> [Consultado 20-08-2018]
- MEDHURST, M. J. (1997). *Cold War Rhetoric Strategy, Metaphor and Ideology*. East Lansing, Mich, Michigan State University Press.
- MEIJERS, A. (2009). *Philosophy of Technology and Engineering Sciences*. Amsterdam, Elsevier/ North Holland.
- MÉNDEZ, R. (2012). «Japón se queda por primera vez sin nucleares desde 1970». *El País*, 5 de mayo.
- MERTON, R. (1974). *Teoría y estructuras sociales*. México: Editorial Fondo de Cultura Económica.
- MIAN, Z., NAYYAR, A. y RAJARAMAN, R. (2009). «Exploring Uranium Resource Constraints on Fissile Material Production in Pakistan». *Science & Global Security*. 17 (2-3).
- MIKAMI, H., SHONO, A. e HIROI, H. (1996). «Sodium Leak at Monju-Cause and Consequences». Disponible en: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/31/044/31044840.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/31/044/31044840.pdf?r=1) [Consultado 20-08-2017]
- MINOURA, K., IMAMURA, F., SUGAWARA, D., KONO, Y. y YIWASHITA, T. (2001). «The 869 Jogan Tsunami Deposit and Recurrence Interval of Large-Scale Tsunami on the Pacific Coast of Northeast Japan». *Journal of Natural Disaster Science*. 23 (2), 83-88.
- MIRANDA REBECO, R. (2012) *La precomprensión de lo humano en la sociología de Luhmann. Raíces antropológicas del antihumanismo teórico luhmanniano*. Ediciones Universidad Alberto Hurtado.
- MITCHAM, C. (1994). *Thinking Through Technology: The Path Between Engineering and Philosophy*. Chicago, University of Chicago Press.
- MITCHAM, C. (1989). *¿Qué es la filosofía de la tecnología?*. Barcelona, Anthropos, Editorial del Hombre.
- MOEHRLE, S. y RASKOB, W. (2015). «Structuring and Reusing Knowledge from Historical Events for Supporting Nuclear Emergency and Remediation Management». *Engineering Applications of Artificial Intelligence: Part B*. 46, 303-311.
- MÖLLER, N., HANSSON, S. O. y PETERSON, M. (2006). «Safety is More Than the Antonym of Risk». *Journal of Applied Philosophy*. 23, 419-432.
- MÖLLER, N. y WIKMAN-SVAHN, P. (2011). «Black Elephants and Black Swans of Nuclear Safety». *Ethics, Policy & Environment: A Journal of Philosophy and Geography*. 14 (3). 273-278.
- MONTUSCHI, E. (1993). *Le metafore scientifiche*. Franco Angeli. Milán.
- MORABIA, A. (1991). «On the Origin of Hill's Causal Criteria». *Epidemiology*. 2, 367- 369.
- MOULINES, C. U. (1991). *Pluralidad y recursión. Estudios epistemológicos*. Madrid, Alianza Editorial.
- MUALCHIN, L. (2014). «Seismic Hazard and Public Safety. International Seismic Safety Organization». Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/262878261\\_Seismic\\_Hazard\\_and\\_Public\\_Safety](https://www.researchgate.net/publication/262878261_Seismic_Hazard_and_Public_Safety) [Consultado 23-12-2014]
- MULLER, H. (1946). *The Production of Mutations*. Nobel Lecture. Disponible en: [Consultado 13-12-2017]

- MUNSTER, R. V. y SYLVEST, C. (2013). «Beyond Deterrence: Nuclear Realism, the H-Bomb and Globality». Paper prepared for the ISA Annual convention. Disponible en: [http://research.ncl.ac.uk/media/sites/researchwebsites/classicalrealism/vanMunster&Sylvest\\_NuclearRealism\\_ISA2013.pdf](http://research.ncl.ac.uk/media/sites/researchwebsites/classicalrealism/vanMunster&Sylvest_NuclearRealism_ISA2013.pdf) [Consultado 23-04-2014]
- MUTIS GÓMEZ, E. R. (2019). «La Ley Helms-Burton y la central electronuclear de Juraguá». *CEN de Juraguá: un sueño del siglo XX*. Disponible en: <http://www.cenjuragua.com/articulos/6/detalles> [Consultado 23-04-2020]
- MYTHEN, G. (2004). *Ulrich Beck a critical introduction to the risk society*. London, Pluto Press.
- NAONO (2019). «The Origins of ‘Hibakusha’ as a Scientific and Political Classification of the Survivor». *Japanese Studies*. 39, 333-352.
- NASSAUER, O. y SOKOLSKI, H. D. (2010). *Nuclear Proliferation: A Civilian and a Military Dilemma*. Heinrich Böll Stiftung. The Green Political Foundation.
- NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION (NCRP) (1954). *Permissible Dose from External Sources of Ionizing Radiation; Recommendations*. Washington, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- NCRP (2018). *Implications of Recent Epidemiologic Studies for the Linear Nonthreshold Model and Radiation Protection*.
- NAVARRO VIVES, J. (2014). *El neutrón de Chadwick y su interpretación*. CSIC-UV- Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero (IHMC). Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/101259> [Consultado 23-04-2015]
- NAYYAR, A., TOOR, A. y MIAN, Z. (1997). «Fissile Material Production Potential in South Asia». *Science & Global Security*. 6, 189-203.
- NEIDELL, M., UCHIDA, S. y VERONESI, M. (2019). «Be Cautious with the Precautionary Principle: Evidence from Fukushima Daiichi Nuclear Accident». Disponible en: <http://www.nber.org/papers/w26395> [Consultado 10-01-2020]
- NELKIN, D. (1979). *Controversy Politics of Technical Decision*. Beverly Hills, Sage Publ.
- NELKIN, D. (1981). «Some Social and Political Dimensions of Nuclear Power: Examples from Three Mile Island». *American Political Science Review*. 75, 132-142.
- NERLICH, B., ELLIOTT, R. y LARSON, B. (2009). «Communicating Biological Sciences Ethical and Metaphorical Dimensions». *Farnham*, England, Ashgate. Disponible en: <http://public.eblib.com/EBLPublic/PublicView.do?ptiID=449215> [Consultado 20-03-2017]
- NIKITIN, M. B. D. (2013). *North Korea's Nuclear Weapons Technical Issues*. [Washington, DC], Congressional Research Service, Library of Congress. Disponible en: <http://www.fas.org/sgp/crs/nuke/RL34256.pdf> [Consultado 10-03-2014]
- NIKITIN, M. B. D. y WELT, C. (2016). «Recent Developments in U.S.-Russian Nonproliferation Cooperation». Disponible en: <http://ezproxy.library.yorku.ca/login?url=https://www.heinonline.org/HOL/Page?handle=hein.crs/crsmthmanxx0001&id=1&size=2&collection=congregrec&index=crs>. [Consultado 13-03-2017]
- NISA (2011). Press Release. INES (the International Nuclear and Radiological Event Scale) Rating on the Events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku District-off the Pacific Ocean Earthquake, 12 de abril.
- NODA, C., FERNÁNDEZ, J., PEREZ-PENICHER, C. y ALTSHULER, E. (2006). «Measuring Activity in Ant Colonies». *Review of Scientific Instruments*. 77, 126102. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2400215>. [Consultado 20-04-2013]
- NOVARKA (2018). «The Final Movement Chernobyl New Safe Confinement Sarcophagus Skidding». [Deauville], Deauville Green Awards.

- NUTTALL, W. J. y WILSON, B. (2005). *Nuclear renaissance: technologies and policies for the future of nuclear power*. Bristol: Institute of Physics Publishing. NUTTALL, W. J., ASHLEY, S. F., y HEFFRON, R. J. (2017). «Compensating for severe nuclear accidents: An expert elucidation». *Process Safety and Environmental Protection*. 112, 131-142.
- OBODOVSKY, I. (2019). «Radiation: Fundamentals, Applications, Risks and Safety». Disponible en: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=1929723>. [Consultado 02-02-2020]
- OE, K. (2011). «La responsabilidad por el desastre de Fukushima». *El País*, 30 de septiembre. Disponible en: [https://elpais.com/diario/2011/09/30/opinion/1317333605\\_850215.html](https://elpais.com/diario/2011/09/30/opinion/1317333605_850215.html) [Consultado 30-10-2011].
- ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OCDE) (2012). *Japan's Compensation System for Nuclear Damage: As Related to the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Accident*. Paris, OECD Publishing.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT / NUCLEAR ENERGY AGENCY (OECD/NEA) (2016a). *Radiological Protection Science and Application*. Paris, OECD Publishing. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264256880-en> [Consultado 14-10-2017]
- OECD/NEA (2016b). *Management of Radioactive Waste After a Nuclear Power Plant Accident*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264268456-en> [Consultado 14-10-2017]
- OECD/NEA (2016c). *Implementation of Defence in Depth at Nuclear Power Plants: Lessons Learnt from the Fukushima Daiichi Accident*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264253001-en> [Consultado 21-10-2018]
- OECD/NEA (2011). «Evolution of ICRP Recommendations 1977, 1990 and 2007». OCDE. Disponible en: <https://www.oecd-nea.org/rp/pubs/2011/6920-icrp-recommendations.pdf> [Consultado 22-10-2013]
- OFFICE OF TECHNOLOGY ASSESSMENT (1984). *Nuclear Power in an Age of Uncertainty*. Washington, D.C., Congress of the U.S.
- OGILVIE-WHITE, T. (1996). «Is There a Theory of Nuclear Proliferation? An Analysis of the Contemporary Debate». *The Nonproliferation Review*. Spring-Summer, 43-60.
- OHNO, H. (2011). «Interview/Ulrich Beck: System of Organized Irresponsibility behind the Fukushima Crisis». *Asahi Shimbun*, 6 de julio. Disponible en: <http://ajw.asahi.com/article/0311disaster/opinion/AJ201107063167> [Consultado 22-08-2012]
- OIEA (2016a). *Medidas para proteger al público en una emergencia debida a condiciones graves en un reactor de agua ligera*. Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/EPR-NPP\\_PPA\\_S\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/EPR-NPP_PPA_S_web.pdf) [Consultado 14-08-2017]
- OIEA (2016b). *Programas de gestión de accidentes muy graves para centrales nucleares. Guía de seguridad N° NS-G-2.15*. Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1376s\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1376s_web.pdf) [Consultado 20-08-2017]
- OIEA (2015). *El accidente de Fukushima Daiichi*. Disponible en: [https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC59/GC59Documents/Spanish/gc59-14\\_sp.pdf](https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC59/GC59Documents/Spanish/gc59-14_sp.pdf) [Consultado 20-12-2015]
- OIEA (2014). «Comunicación de fecha 19 de septiembre de 2014 recibida de la Misión Permanente de la República Islámica del Irán ante el Organismo en relación con el informe del Director General sobre la aplicación de salvaguardias en el Irán». Disponible en: [https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc868\\_sp.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc868_sp.pdf) [Consultado 22-12-2014]
- OIEA (2013a). *Guía para la aplicación de salvaguardias en los Estados con protocolos sobre pequeñas cantidades*. Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SVS-22\\_S\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SVS-22_S_web.pdf) [Consultado 14-11-2014]
- OIEA (2013b). *Criterios aplicables a la preparación y respuesta a situaciones de emergencia nuclear o radiológica*. En: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/> [Consultado 14-11-2017]

- OIEA (2012). *Comunicación con el público en caso de emergencia nuclear o radiológica*, IAEA, Viena (2012).
- OIEA (1998). *El sistema de salvaguardias del OIEA a punto para el siglo 21*. Viena, OIEA.
- OIEA (1994). *Criterios de intervención en caso de emergencia nuclear o radiológica*. Colección Seguridad. Vol. N° 109.
- OIEA y AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE (OIEA y AEN/OECD) (2010). *INES: La Escala Intencional de Sucesos Nucleares y Radiológicos. Manual del Usuario*. Edición revisada y ampliada 2008. OIEA. Viena
- OIEA y AEN/OECD (2001): *INES: La Escala Intencional de Sucesos Nucleares. Manual del Usuario*. Edición revisada y ampliada 2001. OIEA. Viena.
- OIEA y AEN/OECD (1992). *INES: La Escala Intencional de Sucesos Nucleares. Manual del Usuario*. Edición revisada y ampliada 1992. OIEA. Viena.
- OKRENT, D. (1981). *Nuclear Reactor Safety: On the History of the Regulatory Process*. Madison, Wis, University of Wisconsin Press.
- OKHOVAT, S. (2012). *The United Nations Security Council its Veto Power and its Reform*. Sydney, Centre for Peace and Conflict Studies, The University of Sydney.
- OLDROYD, D. (1986). «Grid/Group Analysis for Historians of Science». *History of Science*. 24, 145-171.
- OPPENHEIMER, J. R. (1947). *Physics in the Contemporary World*. Portland, Me, Anthoensen Press.
- O'RIORDAN, T., KEMP, R. y PURDUE, M. (1985). «How the Sizewell B Inquiry is Grappling with the Concept of Acceptable Risk». *Journal of Environmental Psychology*. 5, 69-85.
- ORTEGA y GASSET, J. (1997). *Meditación de la técnica*. Madrid, Santillana.
- ORWELL, G. (1945). «You and the Atomic Bomb». Disponible en: [http://orwell.ru/library/articles/ABomb/english/e\\_abomb](http://orwell.ru/library/articles/ABomb/english/e_abomb) [Consultado 21-09 -2014]
- OSAZA, K., GRANT, E. y KODAMA, K. (2018). «Japanese Legacy Cohorts: The Life Span Study Atomic Bomb Survivor Cohort and Survivors' Offspring». *Journal Epidemiology* 28(4), 162-169.
- OUGHTON, D. H. y HANSSON, S. O. (Ed.) (2013). *Social and Ethical Aspects of Radiation Risk Management*. Kidlington, Oxford: Elsevier
- OUGHTON, D. y HOWARD, B. J. (2012). «The Social and Ethical Challenges of Radiation Risk Management». *Ethics Policy and Environment*. 15, 71-76.
- PAPAMICHAIL, K. N. y FRENCH, S. (2013). «25 Years of MCDA in Nuclear Emergency Management». *IMA Journal of Management Mathematics*. 24, 481-503
- PARK, C. O. (2011). *Mitigation of Hydrogen Hazards in Severe Accidents in Nuclear Power Plants*. Vienna, International Atomic Energy Agency. Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE\\_1661\\_Web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1661_Web.pdf) [Consultado 21-02 -2017]
- PARSONS, T. (1968). *Structure of Social Action, a Study in Social Theory*. Free Press.
- PATTERSON, W. C. (1976). *Nuclear Power*. Harmondsworth, Penguin (*La energía nuclear*. Madrid, H. Blume, 1982).
- PEDATZUR, R. (2007). «The Iranian Nuclear Threat and the Israeli Options». *Contemporary Security Policy*. 28, 513-541 [Consultado 21-02 -2018]
- PERROW, C. (2011). Fukushima, Risk, and Probability: Expect the Unexpected». *Bulletin of the Atomic Sciences*, 1 de abril. Disponible en: <http://www.thebulletin.org/node/8702>
- PERROW, C. (1999). *Living With High-Risk Technologies*. New Jersey, Princeton University Press.
- PERROW, C. (1984). *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. New York, Basic Books.

- PERROW, C. (1982). «The President's Commission and the Normal Accident». En: Sils, D., Wolf, C. y Shelanski, V. (Eds.): *Accident at Three Mile Island: The Human Dimensions*, Westview, Boulder, 173-184.
- PETERS, H. P., ALBRECHT, G., HENNEN, L. y STEGELMANN, H. U. (1990). «Chernobyl and the Nuclear Power Issue in West German Public Opinion». *Journal of Environmental Psychology*. 10, (2), 121-134.
- PETROSIAN, A. M. (1985). *La energía atómica en la ciencia y la industria*. La Habana, Cuba, Editorial Pueblo y Educación.
- PIGNUOLI-OCAMPO, S. (2013a). «El modelo sintético de comunicación de Niklas Luhmann». *Cinta de Moebio*. 47.
- PIGNUOLI-OCAMPO, S. (2013b). «Doble contingencia y orden social desde la teoría de Niklas Luhmann». *Sociológica*. 78, 7-40.
- PIGNUOLI-OCAMPO, S. (2015). «El programa sociológico de Niklas Luhmann y su contexto». *Revista Mexicana de Sociología*. 77 (2), 301-328.
- PIGNUOLI-OCAMPO, S. y ZITELLO, M. (2011). «Tensiones y quiebres teóricos del concepto de comunicación de Luhmann». *Estudios sociológicos*. 87, 925-947.
- PICKARD, P., COCHRAN, T. y DENNING, R. (2009). «Diverse Perspectives on the July 1959 Sodium Reactor Experiment Accident». Disponible en: [http://www.etc.energy.gov/Community\\_Involvement/Public%20Meetings/SRE\\_Workshop.html](http://www.etc.energy.gov/Community_Involvement/Public%20Meetings/SRE_Workshop.html) [Consultado 21-09 -2014]
- PILAT, J. (2009). *Proliferation Resistance Issues, Initiatives and Evaluation*. Washington, D.C., United States. Dept. of Energy. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/962336-OyUhBL/> [Consultado 19-12 -2013]
- PINTOS, J. L. (2007). «La nueva plausibilidad. (La observación de segundo orden en Niklas Luhmann)». *Revista Anthropos*, Barcelona, 173-174, 126-127.
- PIRON, S. (2004). «L'apparition du resicum en Méditerranée Occidentale, XIIe-XIII siècles». En: Collas Heddeland, E. (2004). *Pour une histoire culturelle du risque: genèse, évolution, actualité du concept dans les sociétés occidentales*. Strasbourg, Editions Histoire et Anthropologie. 59-76.
- PLOKHY, S. y LISTER, R. (2018). «Chernobyl: The History of a Nuclear Catastrophe». [Ashland, Oregon], Blackstone Audio. Disponible en: <https://www.overdrive.com/search?q=1E1E93F8-5E4D-4551-8DAC-2D7DA9B66383> [Consultado 10-01-2019]
- POCHIN, E. E. (1979). «Importancia de la evaluación de riesgos radiológicos». *Boletín del OIEA*. 21 (4).
- POLMAR, N. y ALLEN, T. B. (1984). *Rickover: Controversy and Genius, a Biography*. New York, Simon and Schuster.
- PRADIER, P. CH. (2004). «Histoire du risque». En: Santos del Cerro, J. ANTOS DEL CERRO, J. y García Secades, M. (2004). *Historia de la probabilidad y la estadística (II)*. Las Rozas, Madrid, Delta Publicaciones Universitarias, 172-186.
- QUINTANILLA, M. A. (1989). *Tecnología: un enfoque filosófico*. Madrid, Fundesco.
- QUINTANILLA, M. A. (2005). *Tecnología: un enfoque filosófico y otros ensayos de filosofía de la tecnología*. México, Fondo de Cultura Económica.
- QUIST, A. S. (2002). *A History Classified Activities at Oak Ridge National Laboratory*. Disponible en: <https://www.osti.gov/opennet/manhattan-project-history/publications/ORNLClassifiedActivities.pdf> [Consultado 01-12-2018]
- RADIATION EFFECTS RESEARCH FOUNDATION (RERF) (2016). *A Brief Description*. A Japan-US Cooperative Research Organization.

- RAMOS, R. (2009). «De la sociedad de los riesgos a la sociedad de la incertidumbre». En: Luján, J. L. y Echeverría, J. (2009). *Gobernar los riesgos: ciencia y valores en la sociedad del riesgo*. Madrid, Biblioteca Nueva.
- RAMOS, R. (2006). «La deriva hacia la incertidumbre de la sociedad del riesgo». Universidade da Coruña: Servicio de Publicaciones. Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=2135423> [Consultado 08-08-2013]
- RAMSAY, W. (1896). *The Gases of the Atmosphere: The history of their Discovery*. London, Macmillan and Co.
- RANGER, N. y NIEHÖRSTER, F. (2011). «Deep Uncertainty in Long-term Hurricane Risk: Scenario Generation and Implications for Future Climate Experiments. Centre for Climate Change Economics and Policy». Disponible en: [http://www.cccep.ac.uk/Publications/Working-papers/Papers/60-69/WP61\\_uncertainty-hurricane-risk-climate-experiments.pdf](http://www.cccep.ac.uk/Publications/Working-papers/Papers/60-69/WP61_uncertainty-hurricane-risk-climate-experiments.pdf) [Consultado 09-02-2013]
- RASBORG, K. (2012). «‘(World) Risk Society’ or ‘New Rationalities of Risk’? A Critical Discussion of Ulrich Beck’s Theory of Reflexive Modernity». *Thesis Eleven*. 108, 3-25.
- RASMUSSEN, J. (1986). *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. New York, N.Y., North-Holland.
- RASMUSSEN, N. C. (1975). *Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plant: Executive Summary [and] Main Report*. [Washington], U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- RAYNER, S. (1990). *Sociocultural Definitions of Risk*. Oak Ridge, Tenn, Oak Ridge National Laboratory, Energy Division.
- RAYNER, S. (1986). «Management of Radiation Hazards in Hospitals: Plural Rationalities in a Single Institution». *Social Studies of Science*. 16, 573-591.
- RAYNER, S. (1984). «Disagreeing about Risk: The Institutional Cultures of Risk Management». En: Hadden, S. G. (Ed.). *Risk analysis, institutions, and public policy*. Port Washington, NY: Associated Faculty Press.150-68.
- REAL GALLEGO, A. (2010). «Riesgos derivados de la exposición a dosis bajas de radiación ionizante». *Sociedad Española de Sanidad Ambiental*. Disponible en: <http://ojs.easyapps.es/index.php/rsa/article/view/185> [Consultado 09-02-2017]
- REASON, J. T. (2000). «Safety Paradoxes and Safety Culture». *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*. 7, 3-14.
- REASON, J. T. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Aldershot, U.K., Ashgate.
- REASON, J. T. (1990a). *Human Error*. Cambridge [England], Cambridge University Press.
- REASON, J. T. (1990b). «The Age of the Organizational Accident». *Nuclear Engineering International*. 18-19.
- REED, B. C. (2014). *The History and Science of the Manhattan Project*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40297-5>. [Consultado 09-02-2017]
- REED, B. C. (2015). *The Physics of the Manhattan Project*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43533-5>. [Consultado 14-02-2014]
- RENN, O. (2008a). *Risk Governance: Coping with Uncertainty in a Complex World*. London: Earthscan
- RENN, O. (2008b). «Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review. Part 1: Disciplinary risk Concepts». *Gaia*. 17 (1), 50-66.
- RENN, O. (2008c). «Concepts of Risk: An Interdisciplinary Review. Part 2: Integrative Approaches». *Gaia*. 17 (2), 196-204.
- RENN, O. (1998). «Three Decades of Risk Research: Accomplishments and New Challenges». *Journal of Risk Research*. 1, 49-71.



- RENN, O. (1992). «Concept of the Risk». En: Krinsky, S., y Golding, D. (Eds.) (1992). *Social theories of risk*. Westport, Conn, Praeger, 53-79.
- RENN, O., JAEGER, C. C., ROSA, E. A. y WEBLER, T. (1999). «The rational actor paradigm in risk theories: Analysis and critique». En: M. J. Cohen (Ed.), *Risk in the modern age: Social theory*. Macmillan, London: Science and Environmental Decision-Making, 35-61.
- RENN, O., KLINKE, A. y VAN ASSELT, M. (2011). «Coping with Complexity, Uncertainty and Ambiguity in Risk Governance: A Synthesis». *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 40, 231-246.
- RESCHER, N. (1983). *Risk: A Philosophical Introduction to the Theory of Risk Evaluation and Management*. Washington, D.C., University Press of America.
- RHODES, R. (2010). *The Twilight of the Bombs: Recent Challenges, New Dangers, and the Prospects for a World Without Nuclear Weapons*. New York, Alfred A. Knopf.
- RHODES, R. (1986). *The Making of the Atomic Bomb*. Nueva York, Simon & Schuster.
- RICOEUR, P. (1977). *La metáfora viva*. Buenos Aires, Ediciones Megápolis.
- RIESCH, H. (2013). «Levels of Uncertainty». En: Roeser, S. (Ed.). *Essentials of risk Theory*. Dordrecht, Springer. Disponible en: <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=1083564>. [Consultado 20-10-2014]
- RIJPMAN, J. A. (1997). «Complexity, Tight-Coupling and Reliability: Connecting Normal Accidents Theory and High Reliability Theory». *Journal of Contingencies and Crisis Management*. 5, 15-23.
- RODRÍGUEZ GARCÍA, J. L. (2014). *El derrumbe del socialismo en Europa*. La Habana, Ciencias Sociales y Ruth Casa Editorial.
- RODRÍGUEZ MANSILLA, D. y ARNOLD, A. (1991). *Sociedad y teoría de sistemas*. Santiago de Chile: Universitaria.
- RODRÍGUEZ MANSILLA, D. y TORRES NAFARRATE, J. (2003). «Autopoiesis, la unidad de una diferencia: Luhmann y Maturana». *Sociologías*. 9. Disponible en: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-45222003000100005](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-45222003000100005). [Consultado 8-08-2019]
- RODRÍGUEZ MANSILLA, D. y TORRES NAFARRATE, J. (2008). *Introducción a la teoría de la sociedad de Niklas Luhmann*. México, Herder.
- ROESER, S. (2013). *Essentials of Risk Theory*. Dordrecht, Springer. Disponible en: <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=1083564>. [Consultado 10-10-2014]
- ROGERS, B. (2012). *Hidden Truth: The Sodium Reactor Experiment Meltdown of 1959 at the Santa Susana Field Laboratory*. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10211.2/1505>. [Consultado 20-10-2019]
- ROSA, E. (1998). «Metatheoretical Foundations for Post-normal Risk». *Journal of Risk Research*. 1, 15-4.
- ROSATOM (2019). «ROSATOM Subsidiary Awards Contract for Construction of BREST-OD-300 Fast Reactor Facility and Power Unit». Disponible en: <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/> [Consultado 12-12-2020]
- ROZA, G. (2009). *Plutonium*. New York, Rosen Central. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=617752>. [Consultado 03-10-2017]
- RÜHM, W. et al. (2015). «Dose and Dose-rate Effects of Ionizing Radiation: A Discussion in the Light of Radiological Protection». *Radiation and Environmental Biophysics*. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00411-015-0613-6>. [Consultado 03-10-2018]
- SAGAN, S. D. (1993). *The Limits of Safety: Organizations, Accidents, and Nuclear Weapons*. Princeton, N.J., Princeton University Press.

- SAKHAROV, A. (1989). «Foreword». En: *The Truth about Chernobyl*. Ed. Medvedev, G. Nueva York, Basic Books/ Haper Collins.
- SALAZAR, G. D. (2011). «El Nuevo desafío: la proliferación nuclear en el umbral del siglo XXI». *Cuadernos de estrategia*. 153, 207-242.
- SALAZA, G: D: (2015). «El Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares. Los temas claves en la conferencia de examen en 2015». *Revista UNISCI*. 38, mayo de 2015.
- SÁNCHEZ RON, J. M. (1998). *Marie Curie y la radiactividad*. Madrid, Consejo de Seguridad Nacional.
- SATAKE, K., SAWAI, Y., SHISHIKURA, M., OKAMURA, Y., NAMEGAYA, Y. y YAMAKI, S. (2007). «Tsunami Source of the Unusual AD 869 Earthquake off Miyagi, Japan, Inferred From Tsunami Deposits and Numerical Simulation of Inundation». Paper presented to American Geophysical Union. Disponible en: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2007AGUFM.T31G..03S>. [Consultado 10-04-2013]
- SAWAI, Y., NAMEGAYA, Y., OKAMURA, Y., SATAKE, K. y SHISHIKURA, M. (2012). «Challenges of Anticipating the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami Using Coastal Geology». *Geophysical Research Letters*. 39.
- SCHAPER, A. (2003). «Nuclear Terrorism: Risk Analysis After 11 September 2001». *Disarmament Forum*. 2, 7-16.
- SCHLICH, T. (2015). *The Risks of Medical Innovation: Risk Perception and Assessment in Historical Context*. London, Routledge.
- SCHMID, S. D. (2015). *Producing Power: The Pre-Chernobyl History of the Soviet Nuclear Industry*. Cambridge, MA: MIT Press.
- SCHMITT, K. (2012). «Automations Influence on Nuclear Power Plants: A Look at Three Accidents and How Automation Played a Role». *Work*. 41, 4545-4551.
- SCHNEIDER, M. (2009). «Nuclear France Abroad». Centre for International Governance Innovation (CIGI). Disponible en: <http://www.nirs.org/nukerelapse/background/090502mschneidernukefrance.pdf> [Consultado 14-10-2014]
- SCHNEIDER, A. S. y YAIR, N. (2016). «A Review of Safety Analysis Philosophies for Nuclear Reactors». *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*.
- SCHÜTZEICHEL, R. (2015). *Teorías sociológicas de la comunicación*. Traducción de Javier Torres Nafarrate. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/325396655\\_Teorias\\_Sociologicas\\_de\\_la\\_Comunicacion](https://www.researchgate.net/publication/325396655_Teorias_Sociologicas_de_la_Comunicacion) [Consultado 10-10-2019]
- SCHWING, R. C. y ALBERS, W. A. (1980). *Societal Risk Assessment: How Safe is Safe Enough?* New York, Plenum Press.
- SEABORG, G. T. y CORLISS, W. R. (1971). *Man and Atom; Building a New World Through Nuclear Technology*. New York, E.P. Dutton.
- SEABORG, G. T., KATHREN, R. L., GOUGH, J. B. y BENEFIEL, G. T. (1994). *The Plutonium Story: The Journals of Professor Glenn T. Seaborg, 1939-1946*. Columbus, Battelle Press.
- SEONG, K. M., SEO, S., LEE, D., KIM, M.-J., LEE, S.-S., PARK, S. y JIN, Y. W. (2016). «Is the Linear No-Threshold Dose-Response Paradigm Still Necessary for the Assessment of Health Effects of Low Dose Radiation?». *Journal of Korean Medical Science*. 31, 10-23.
- SEGAULT, A. (2017). «Communication de crise en phase post-accidentelle nucléaire: organisation et partage des connaissances sur le web». Thèse en vue de l'obtention du titre de docteur en Sciences de l'Information et de la Communication. Université de Bourgogne Franche-Comté. Disponible en: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01777282> [Consultado 12-12-2020]

- SEGAULT, A., TAJARIOL, F., ISHIGAKI, Y. y ROXIN, I. (2019). «Sharing Radiation Measurements Through Social Media». En: INFORMATION RESOURCES MANAGEMENT ASSOCIATION (2019). *Emergency and Disaster Management: Concepts, Methodologies, Tools and Applications*. Hershey, PA, Information Science Reference, an imprint of IGI Global. Disponible en: <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/978-1-5225-6195-8>. [Consultado 12-12-2020]
- SEXTON, R. (2007). «Windscale Pile Reactors. Decommissioning Progress on a Fifty Year Legacy». International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Bruges (Belgium), 2-6 de septiembre. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/236534078\\_Windscale\\_Pile\\_Reactors\\_Decommissioning\\_Progress\\_on\\_a\\_Fifty\\_Year\\_Legacy](https://www.researchgate.net/publication/236534078_Windscale_Pile_Reactors_Decommissioning_Progress_on_a_Fifty_Year_Legacy) [Consultado 04-04-2014]
- SHRADER-FRECHETTE, K. (2013). «Environmental Injustice Inherent in Radiation Dose Standards». En: Oughton, D. y Hansson, S. O. (Ed.), *Social and Ethical Aspects of Radiation Risk Management*. Kidlington, Oxford: Elsevier, 197-213.
- SHRADER-FRECHETTE, K. (2011). «Fukushima, Flawed Epistemology, and Black-Swan Events». *Ethics Policy and Environment*. 14, 267-272.
- SHRADER-FRECHETTE, K. y PERSSON, L. (2001). *Ethical Problems in Radiation Protection*. Stockholm : Statens stralskyddsinstitut, 2001.
- SHRADER-FRECHETTE, K. S. (1991). *Risk and Rationality: Philosophical Foundations for Populist Reforms*. Oxford, University of California Press, Ltd.
- SHRADER-FRECHETTE, K. S. (1990). «Scientific Method, Anti-foundationalism and Public Decision Making». *Risk, Health Safety and Environment*. 1, 23-41.
- SHRADER-FRECHETTE, K. S. (1980). *Nuclear Power and Public Policy. The Social and Ethical Problems of Fission Technology*. D. Reidel Publishing Company.
- SILLS, D. L., D.L., WOLF, C. P. y SHELANSKI, V. B. (1982). *Accident at Three Mile Island: the Human Dimensions*. Boulder, Colo, Westview Pr.
- SIMON, H. A. (1957). «A Behavioral Model of Rational Choice». En: *Models of Man, Social and Rational: Mathematical Essays on Rational Human Behavior in a Social Setting*. New York: Wiley.
- SJOBERG, L. (2000). «Factors in Risk Perception». *Risk Analysis*. 20(1): 1-12.
- SLOVIC, P. (1992). «Perception of Risk: Reflections on the Psychometric Paradigm». En: Krimsky, S., y Golding, D. (1992). *Social Theories of Risk*. Westport, Conn, Praeger, 117-152.
- SLOVIC, P. (1987). «Perception of Risk». *Science*. 236, 280-285.
- SLOVIC, P., FISCHOFF, B. y LICHTENSTEIN, S. (1980). «Facts and Fears: Understanding Perceived Risk». *Health Physics*. 39, 1005-1006.
- SLOVIC, P. y WEBER, U. W. (2002). «Perception of Risk Posed by Extreme Events». Conference Risk «Management Strategies in an Uncertain World», Palisades, New York, abril 12-13.
- SLUIJS, J.P. VAN DER, JANSSEN, P.H.M., PETERSEN, A.C., KLOPROGGE, P., RISBEY, J.S., TUINSTRAN, W. y RAVETZ, J. (2004). *RIVM/MNP Guidance for Uncertainty Assessment and Communication: Tool Catalogue for Uncertainty Assessment*. Copernicus Institute, Department STS, Utrecht University.
- SMIT, W. A. (2005). «Military Technology and Its Effects». En: Goodin, R. E. y Tilly, C. (2006). *The Oxford Handbook of Contextual Political Analysis*. Oxford, Oxford University Press.
- SMYTHE, D. (2011). «An Objective Nuclear Accident Magnitude Scale for Quantification of Severe and Catastrophic Events». *Physics Today*. Disponible en: <https://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.4.0509/full/> [Consultado 09-09-2013]
- SNYDER, J. B. (1996). «Aircraft Nuclear Propulsion: An Annotated Bibliography. Prepared for the United States Air Force and History and Museum Program». Disponible en:

<https://media.defense.gov/2014/Oct/14/2001329848/-1/-1/0/AFD-141014-032.pdf>  
[Consultado 08-08-2017]

- SODDY, F. (1949). *The Story of Atomic Energy*. London, Nova Atlantis.
- SOKOLSKI, H. D. (2001). *Best of Intentions America's Campaign Against Strategic Weapons Proliferation*. Westport, Conn, Praeger. Disponible en: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=99082> [Consultado 02-10-2013]
- SPAARGAREN, G., MOL, A. P. J. y BUTTEL, F. H. (2000). *Environment and Global Modernity*. London, Sage.
- SPENCER BROWN, G. (1979). *Laws of the Form*. E. P. Dutton, New York.
- SPIEGELHALTER, D. (2017). «Risk and Uncertainty Communication». *Annual Review of Statistics and Its Application*. 4, 31-60.
- STARR, C. (1995). «A Personal History: Technology to Energy Strategy». *Annual Review of Energy and the Environment*. 20, 31-44.
- STARR, C. (1985). «Risk Management, Assessment, and Acceptability». *Risk Analysis*. 5, 97-102.
- STARR, C. (1980). *The Three Mile Island Nuclear Accident: The Other Lesson*. Palo Alto, Calif, EPRI.
- STARR, C. (1969). «Social Benefit Versus Technological Risk: What is Our Society Willing to Pay for Safety?» *Science*. 165, 1232-1238.
- STARR, C. y DICKINSON, R. W. (1958). *Sodium Graphite Reactors*. Reading, Mass, Addison-Wesley Pub. Co.
- STARR, C., GREENFIELD, M.A. y HAUSKNECHT, D.F. (1972). «A Comparison of Public Health Risks: Nuclear vs Oil-Fired Power Plants». *Nuclear News*. 15, octubre de 1972. 37-45.
- STRASSOLDO, R. (1991). «La comunicazione ecologica: critica del pessimismo di N. Luhmann e alcune indicazioni positivi». Seminario «Pensare politicamente l'ambiente: I fondamentali», Milan, 27 de abril.
- STEPHENS, L.D. y BARRETT, R. O (1979). «A Brief History of a 20<sup>th</sup> Century Danger Signo». *Health Physics*. 36 (May), 565-571.
- STIEFEL, J. T., FEINROTH, H. y OLDHAM, G. M. (1963). Shippingport Atomic Power Station: Operating Experience, Developments and Future Plans. Disponible en: <http://catalog.hathitrust.org/api/volumes/oclc/702198490.html>. [Consultado 02-08-2014]
- STOIBER, C., BAER, A., PELZER, N. y TONHAUSER, W. (2006). *Manual de derecho nuclear*. Viena, Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Disponible en: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1160s\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1160s_web.pdf). [Consultado 02-08-2017]
- STOLZ, D. (2014). «Diagrams of Theory: Douglas and Wildavsky's Grid/Group Typology of Worldviews». Disponible en: [https://www.dustinstoltz.com/s/2014\\_Stoltz\\_Diagrams-of-Theory-Douglas-and-Wildavskys-GridGroup-Typology-of-Worldviews.pdf](https://www.dustinstoltz.com/s/2014_Stoltz_Diagrams-of-Theory-Douglas-and-Wildavskys-GridGroup-Typology-of-Worldviews.pdf) [Consultado 02-12-2018]
- STRAUCH, T. (1989). *El observador en el nido del cuervo*. Entrevista-documental a Niklas Luhmann. Disponible en: [www.sistemassociales.com](http://www.sistemassociales.com) [Consultado 02-12-2019]
- SUGAWARA, S. y JURAKU, K. (2018). «Post-Fukushima Controversy on SPEEDI System: Contested Imaginary of Real-Time Simulation Technology for Emergency Radiation Protection». En: Amir S. (Eds.). *The Sociotechnical Constitution of Resilience*. Palgrave Macmillan, Singapore. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-981-10-8509-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-10-8509-3_9) [Consultado 02-12-2020]
- SUGIYAMA, K. y NARABAYASHI, T. (2011). «Lessons Learned from the TMI-2 Accident and Chernobyl Nuclear Disaster for Nuclear Safety Innovation». *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Japan Society of Maintenance*.
- TAKAHASHI, S. (2014). *Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident*. Springer-Verlag GmbH. <http://www.oapen.org/download?type=document&docid=1002048>.

- TAKUBO, M. (2017). «Closing Japan's Monju Fast Breeder Reactor: The Possible Implications». *Bulletin of the Atomic Scientists*. 73, 182-187.
- TANAKA, S. I. y YAMAZAKI, T. (2012). «Accident at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Stations of TEPCO – Outline & Lessons Learned –». *Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and Biological Sciences*. 88, 471-48
- TAYLOR, L. S. (1980). «El discernimiento en la protección contra las radiaciones». *Boletín del OIEA* 22 (1), 16-23.
- TAYLOR-GOOBY, P.F. y ZINN, JENS O. (2006). *Risk as an Interdisciplinary Research Area*. Risk As an Interdisciplinary Research Area. Oxford University Press.
- TELLER, E. y SHOOLERY, J. L. (2001). *Memoirs: A Twentieth-Century Journey in Science and Politics*. Cambridge, Mass, Perseus Pub.
- TEPCO (2017). *Revision of the Mid-and Long-Term Roadmap Towards Decommissioning Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4*. Disponible en: [https://www4.tepco.co.jp/en/announcements/2017/1456508\\_10494.html](https://www4.tepco.co.jp/en/announcements/2017/1456508_10494.html) [Consultado 02-12-2018]
- TEPCO (2013). *The Development of and Lessons from the Fukushima Daiichi Nuclear Accident*. Disponible en: <https://www4.tepco.co.jp/en/decommission/accident/images/outline01.pdf> [Consultado 12-02-2014]
- TEPCO (2012). *Fukushima Nuclear Accident Analysis Report (Summary)*. Disponible en: <http://japan.resiliencesystem.org/tepco-fukushima-nuclear-accident-analysis-report-summary-june-20-2012> [Consultado 20-03-2013]
- TEPCO (2011). *TEPCO's Tsunami Countermeasure Preparation and Tsunami Prediction Positioning*. Disponible en: [http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/interim/images/111202\\_01-e.pdf](http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/interim/images/111202_01-e.pdf) [Consultado 20-03-2013]
- TIMOFEEV-RESSOVSKIJ, N. V. y ZIMMER, K. G. (1947). *Biophysik*. Leipzig, Hirzel.
- THOMPSON, M. (1982). «The Problem of the Centre: An Autonomous Cosmology». *Essays In The Sociology Of Perception*. M. Douglas (Ed.). London, Routledge, 302-328.
- THOMPSON, P. y DEAN, W. (1996). «Competing Conceptions of Risk». *Risk: Health, Safety & Environment (1990-2002)*. 7(4). Disponible en: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol7/fall/thompson.htm> [Consultado: 20-10-2015].
- TORRES NAFARRATE, J. y ZERMEÑO PADILLA, G. (1992). «Entrevista a Niklas Luhmann». *Estudios sociológicos*. 10 (30), 789-907.
- TOSHIHIRO, H. (2005). *Rehearsal of Armageddon: Nuclear Strategy, Nuclear Disarmament, and the Nuclear Test Ban Question in the Eisenhower Years, 1953-1958*. Thesis (M.A.) - The University at Albany, Dept. of History.
- TUBIANA, M. (2005). «Dose-effect Relationship and Estimation of the Carcinogenic Effects of Low Doses of Ionizing Radiation: The Joint Report of the Académie des Sciences (Paris) and of the Académie Nationale de Médecine». *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. 63, 317-319.
- TUBIANA, M., MASSE, R., DE VATHAIRE, F., AVERBECK, D. y AURENGO, A. (2007). «La controverse sur les effets des faibles doses de rayonnements ionisants et la relation linéaire sans seuil». *Radioprotection*. 42, 133-161.
- TUDOR, B. I. (2018). «Simulation, Epistemic Opacity, and 'Envirotechnical Ignorance' in Nuclear Crisis». *Minds and Machines*. 1-26.
- TVERSKY, A. y KAHNEMAN, D. (1973). *Availability: A Heuristic for Judging Frequency and Probability*. New York, Academic Press.
- ULLOM, J. (1994). «Enriched Uranium Versus Plutonium: Proliferant Preferences in the Choice of Fissile Material». *The Nonproliferation Review*. 2, 1-15.

- UNITED STATES (1984). *Nuclear Power in An Age of Uncertainty*. Washington, D.C., Congress of the U.S., Office of Technology Assessment.
- UNITED STATES. (1997). *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-Usable Fissile Material Storage and Excess Plutonium Disposition Alternatives*. Washington, DC, U.S. Dept. of Energy.
- UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR) (2012). *Report to the General Assembly, with Scientific Annex*. New York.
- UNSCEAR (2002). *Effects of Ionizing Radiation*. Vienna: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- UNITED STATE ATOMIC ENERGY COMMISSION (U.S. AEC.) (1968). *Emergency Core Cooling. Report of Advisory Task Force on Power Reactor Emergency Cooling*. Washington, D.C., U.S. Atomic Energy Commission. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/4526348/> [Consultado 20-03-2014]
- URABE, I., HATTORI, T., IIMOTO, T. y YOKOYAMA, S. (2014). «Radiation Protection Lessons Learned from the TEPCO Fukushima No.1 NPS accident». *Journal of Nuclear Science and Technology*. 51, 136-149.
- U.S. AEC. (1962). *Reactor Site Criteria Including Seismic and Earthquake Engineering Criteria for Nuclear Power Plants* (10 CFR Parts 21, 50, 52, 54,100).
- U.S. AEC (1959). Comments of C. Starr, Atomics International, to H. Price, June 1959. Disponible en: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0215/ML021500103.pdf> [Consultado 20-03-2014]
- U. S. AEC (1957). *Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants*, WASH-740.
- U.S. DOE. (1992). *DOE Fundamentals Handbook: Nuclear Physics and Reactor Theory* (DOE-HDBK-1019/1-93). Disponible en: <https://www.steamtablesonline.com/pdf/Nuclear-Volume1.pdf>U.S. [Consultado 10-04-2014]
- U.S. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2009). *Science and Decisions: Advancing Risk Assessment*. Washington, D.C., National Academies Press. Disponible en: <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3378467> [Consultado 14-03-2013]
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (U.S. NRC) (2016). *Backgrounder on Nuclear Insurance and Disaster*. Disponible en: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/nuclear-insurance>. [Consultado 03-12-2016]
- U.S. NRC (2013). *Three Mile Island Accident of 1979 Knowledge Management Digest*. Disponible en: <http://purl.fdlp.gov/GPO/gpo36050>. [Consultado 12-04-2014]
- U.S.NRC(1980). *Three Mile Island: A report to the Commissioners and to the Public*. Washington, NRC.
- US. NRC y MILLER, C. (2011). *Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21st Century the Near-Term Task Force Review of Insights from the Fukushima Daiichi Accident*. [Rockville, Md.], U.S. Nuclear Regulatory Commission. Disponible en: <http://purl.fdlp.gov/GPO/gpo15766> [Consultado 14-03-2014]
- USPURAS, E., SAKAMOTO, K., ARHANGELSKIY, K., ALONSO, J. R., DIENSTBIER, J., DE GELDER, P., MAQUA, M. y SCOTT DE MARTINVILLE, E. (2011). *Fukushima Accident. Description of the Accident Scenarios, Current Status of the Reactors*. Eurosafe, Towards Convergence of Technical Nuclear Safety Practices in Europe.
- VALLENTEIN, A. (1954). *The Drama of Albert Einstein*. Garden City, N.Y., Doubleday.
- VANDE PUTTE, J., ULRICH, K. y BURNIE S. (2015). *The IAEA Fukushima Daiichi Accident Summary Report: A Preliminary Analysis*. Disponible en: [http://www.greenpeace.org/japan/Global/japan/pdf/IAEA\\_analysis\\_by\\_GP\\_20150528.pdf](http://www.greenpeace.org/japan/Global/japan/pdf/IAEA_analysis_by_GP_20150528.pdf) [Consultado 20-03-2017]

- VELARDE, G. (2014). *Desarrollo del armamento nuclear de Corea del Norte*. Instituto Español de Estudios Estratégicos. Disponible en: [http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs\\_opinion/2014/DIEEEO78-2014\\_DesarmeNuclear\\_CoreaNorte\\_GD.Velarde.pdf](http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2014/DIEEEO78-2014_DesarmeNuclear_CoreaNorte_GD.Velarde.pdf) [Consultado 13-04-2017]
- VERMAAS, P. E. (2008). *Philosophy and Design from Engineering to Architecture*. [Dordrecht], Springer. Disponible en: <http://www.myilibrary.com?id=113997> [Consultado 13-04-2013]
- VOS, E. y EVERSON, M. (2009). *Uncertain Risks Regulated*. London, Routledge-Cavendish. Disponible en: <http://site.ebrary.com/id/10277466> [Consultado 14-03-2013]
- WAKEFORD, R. (2007). «The Windscale Reactor Accident—50 Years On». *Journal of Radiological Protection*. 27, 211-215.
- WALKER, J. S. (2005). *Recent Literature on Truman's Atomic Bomb Decision: A Search for Middle Ground*. *Diplomatic History*. 29, 311-334.
- WALKER, J. S. (2004). *Three Mile Island: A Nuclear Crisis in Historical Perspective*. Berkeley, University of California Press.
- WALKER, J. S. (2000a). *A Short History of Nuclear Regulation, 1946-1999*. [Washington, D.C.], U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- WALKER, J. S. (2000b). *Permissible Dose: A History of Radiation Protection in the Twentieth Century*. Berkeley, University of California Press.
- WALKER, W., HARREMOËS, P., ROTMANS, J., VAN DER SLUIJS, J., VAN ASSELT, M., JANSSEN, P. y KRAYER VON KRAUSS, M. (2003). «Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support». *Integrated Assessment*. 4 (1).
- WANG, J. (1999). *American science in an age of anxiety scientists, anticommunism, and the cold war*. Chapel Hill, NC, University of North Carolina Press.
- WATZLAWICK, P. y KRIEG, P. (1995). *El ojo del observador. Contribuciones al constructivismo*. Editorial Gedisa, Barcelona.
- WEART, S. R. (1988). *Nuclear Fear: A History of Images*. Cambridge, Mass, Harvard University Press.
- WEICK, K. E. y SUTCLIFFE, K. M. (2007). *Managing the Unexpected: Resilient Performance in An Age of Uncertainty*. San Francisco, Jossey-Bass.
- WEICK, K. E. y SUTCLIFFE, K. (2001). *Managing the Unexpected: Assuring High Performance in an Age of Complexity*. San Francisco, Jossey-Bass.
- WEINBERG, A. M. (1994). *The First Nuclear Era: The Life and Times of a Technological Fixer*. New York, American Institute of Physics Press.
- WEINBERG, A. M. (1989). «The Second Fifty Years of Nuclear Fission». Special Symposium: 50 Years of Nuclear Fission in Review. 29th Annual Conference of Canadian Nuclear Association and 10th Annual Conference of Canadian Nuclear Society. 1, 57-62.
- WEINBERG, A. M. (1985). «Science and Its Limits: The Regulator's Dilemma». En: Bankerbus, N. J., Freeman, S. D. y Weinberg, A. M. (Eds.) (1985): *Papers on the nuclear regulatory dilemma*. Oak Ridge, Tenn, Oak Ridge Institute for Science and Education. Disponible en: <http://www.osti.gov/servlets/purl/6191883-EJArae>. [Consultado 30-01-2017]
- WEINBERG, A. M. (1981). «Three Mile Island in Perspectiva. Keynote Adress». *Annals of the New York Academy of Sciences*. 365, 1-12.
- WEINBERG, A. M. (1972a). «Science and Trans-Science». *Minerva*. 10, 209-222.
- WEINBERG, A. M. (1972b). «Social Institutions and Nuclear Energy». *Science*. 177, 27-34.
- WEINBERG, A. M. y MANNING, R. (1985). *The Second Nuclear Era: A New Start for Nuclear Power*. New York, Praeger.

- WEINERT, F. (2009). «Radioactive Decay Law (Rutherford–Soddy)». *Compendium of Quantum Physics*. Springer, pp. 630-632.
- WEISS, L. (2011). «Israel's 1979 Nuclear Test and the U.S. Cover-Up». *Middle East Policy*. 18, 83-95.
- WELLERSTEIN, A. (2008). «Patenting the Bomb». *Isis*. 99, 57-87.
- WELLOCK, T. R. (1998). *Critical Masses: Opposition to Nuclear Power in California, 1958-1978*. Madison, Wis, Univ. of Wisconsin Press.
- WENDT, G. (1955). *La energía nuclear y su utilización con fines pacíficos*. UNESCO.
- WEST, N. (2004). *Mortal Crimes: The Greatest Theft in History: Soviet Penetration of the Manhattan Project*. New York, Enigma Books.
- WESTINGHOUSE HANFORD COMPANY y HANFORD SITE (WASH). (1987). *Chernobyl Lessons Learned Review of N Reactor*. Washington, D.C.
- WHEATLEY, S., SOVACOOOL, B. y SORNETTE, D. (2015). «Of Disasters and Dragon Kings: A Statistical Analysis of Nuclear Power Incidents & Accidents». *Risk Analysis: an Official Publication of the Society for Risk Analysis*. 37, 99-115.
- WING, S., RICHARDSON, D., ARMSTRONG, D. y CRAWFORD-BROWN, D. (1997). «A Reevaluation of Cancer Incidence Near the Three Mile Island Nuclear Plant: The Collision of Evidence and Assumptions». *Environmental Health Perspectives*. 105, 52-57.
- WINNER, L. (2008). *La ballena y el reactor: una búsqueda de los límites en la era de la alta tecnología*. Barcelona, Gedisa Editorial, 2008). (*The whale and the reactor a search for limits in an age of high technology*. Chicago, University of Chicago Press, 1989).
- WINNER, L. (1996). «Do Artifacts Have Politics?» *Daedalus*. 109, 121-136.
- WITTNER, L. S. (1993). *The Struggle Against the Bomb*. Stanford, Calif, Stanford University Press.
- WOHLSTETTER, A. J. (2010). «Spreading the Bomb without Quite Breaking the Rules (1976)». *Reviewing the Nuclear Nonproliferation Treaty (NPT)*. 131-180.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2006). *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group «Health»*. Disponible en: <http://www.who.int/publications-detail-redirect/9241594179> [Consultado 22-08-2013]
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2020). *Nuclear Power in Russia*. Disponible en: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx> [Consultado 14-12-2020]
- WORLD NUCLEAR ASSOCIATION (2016). *World Nuclear Performance Report 2016*. Disponible en: <http://world-nuclear.org/getmedia/b9d08b97-53f9-4450-92ff-945ced6d5471/world-nuclear-performance-report-2016.pdf.aspx> [Consultado 30-01-2019]
- WYNNE, B. (2008). «Elephants in the Rooms Where Publics Encounter 'Science'?: A Response to Darrin Durant, 'Accounting for Expertise: Wynne and the Autonomy of the Lay Public'». *Public Understanding of Science*. 17, 21-33.
- WYNNE, B. (2003). «Seasick on the Third Wave? Subverting the Hegemony of Propositionalism: Response to Collins and Evans». *Social Studies of Science*. 32, 401-417.
- WYNNE, B. (2001). «Creating Public Alienation: Expert Cultures of Risk and Ethics on GMOs». *Science as Culture*. 10 (4), 445-481. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1080/09505430120093586> [Consultado 28-01-2017]
- WYNNE, B. (1996). «May the Sheep Graze? A Reflexive View of the Expert-Lay Knowledge Divide». *Risk, Environment and Modernity*, Londres, Sage Publications. 44-84.



- WYNNE, B. (1993). Public Uptake of Science: A Case for Institutional Reflexivity». *Public Understanding of Science*. 2 (4), 321-337.
- WYNNE, B. (1992). «Misunderstood Misunderstanding: Social Identities and Public Uptake of Science». *Public Understanding of Science*. 1, 281-304.
- WYNNE, B. (1987). *Risk Management and Hazardous Waste: Implementation and the Dialectics of Credibility*. Berlin: Springer.
- WYNNE, B. (1984). «The Institutional Context of Science, Models and Policy: The IASA Energy Study». *Policy Sciences*. 17 (3), 277-320.
- WYNNE, B. (1982). *Rationality and Ritual: The Windscale Inquiry and Nuclear Decisions in Britain*. Chalfont St Giles, Bucks: British Society for the History of Science.
- YABLOKOV, A. V., NESTERENKO, V. B. y NESTERENKO, A. V. (2016). *Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment*. Boston, Mass, Blackwell Publishing.
- YABLOKOV, A. V., NESTERENKO, V. B. y NESTERENKO, A. V. (2009). *Chernobyl: Consequences of the Catastrophe for People and the Environment*. Annals of the New York Academy of Sciences.
- ZINN, J. O. (2006). «Recent Developments in Sociology of Risk and Uncertainty». *Historical Social Research*. 31, 275-286.
- ZINN, J. O. (2009). *Social Theories of Risk and Uncertainty an Introduction*. Chichester, John Wiley & Sons.
- ZIRKLE, R. E. (1940). «The Radiobiological Importance of the Energy Distribution Along Ionization Tracks». *Journal of Cellular and Comparative Physiology*. 16, 221-235.
- ZIO, E. (2009). «Reliability Engineering: Old Problems and New Challenges. Reliability Engineering & System Safety». Disponible en: <http://hal-supelec.archives-ouvertes.fr/hal-00610053/en/> [Consultado 14-12-2017]
- ZOELLNER, T. (2009). *Uranium: War, Energy and the Rock that Shaped the World*. New York, Viking.

## BIBLIOGRAFÍA RUSA<sup>1</sup>

- ABAGYAN A.A. (1986). «Informatsiya ob avari na Chernobylskoi AES i yeyo posledstviya podgotovlennaya dlya MAGATE» (Información sobre el accidente de la CEN de Chernobyl y sus consecuencias, preparada para el OIEA). *Atomnaya energiya*. 61 (5), 301-320.
- ABRAMOV M.I, AVDEEV, V. I., ADAMOV, E. O. et al (2006). *Kanalni yaderni energuitcheski reaktor RBMK-1000*. (Reactor de canales de gran potencia RBMK-1000). Moskva. GUP NIKIET.
- ADAMOV, E. O., DOMORADOV, A. E., MIRONOV, Yu. V., NIKITIN, Yu. M., CHERKASHOV, Yu. M. (2016). «Rol otdelnij faktorov v razbiti avari na Chernobylskoi AES» (El rol de distintos factores en el desarrollo de la avería en la CEN de Chernobyl). *Atomnaya Energiya*. 75 (5). 336-341.
- ALEKSAJIN, R.M. (2006). *Problemi radioekologii. Evolutsiya idei* (Problemas de radioecología. Evolución de las ideas). *Itogui*. M: RASJN.
- ALEKSAJIN, R.M., BULDAKOV O.A., y GUBANOV V.A. (2001). *Krupnie radiatsionnie avari: posledstvia i zashchitnie meri* (Los grandes accidentes radiactivos: consecuencias y medidas de protección). Moskva. Izdat.
- ANDRIUSHIN, I.A., CHERNYSHEV, A.K., y YUDIN, Y. A. (2003). *Ukroschenie yadra. Stranitsy istori yadernogo oruzhia i yadernoi infrastruktury SSSR* (El dominio del átomo. Páginas de la historia del arma nuclear y la infraestructura nuclear de la URSS). Sárov.
- ANTONOV, V. P. (1989). *Uroki Chernobylia: radiatsiya, zhizn, zdoroviya* (Lecciones de Chernobyl: radiación, vida y salud). *Znanie. Kíev*.
- ARBATOV, A. G. (2012). «NTP: The Right to Whitdraw». En: Arbatov, A. G., Dvorkin, V., y Bubnova, N. (Eds.). *Nuclear reset: arms reduction and nonproliferation*. Moscow, Carnegie Moscow Center.
- ARUTIUNYAN, R. B. (1990). «Kitaiski Sindrom» (El Síndrome de China). *Priroda*. 11.
- ASMOLOV, V. G., Kozlova, E.A. (2018). *Niekonchennaya povest (Novela inconclusa)*. Moskva
- ASMOLOV, V. G (2019) «Vladimir Asmolov pro Chernobyl». Entrevista disponible en: <https://oper.ru/video/view.php?t=3642> [Consultado 14-12-2017]
- AZOVSKAJA, N. O., PERETRUXIN, V. V., CHERNUSHEVICH. (2018). «Issledovanie stepeni radiativnogo zagriaznenia pischevoi produkci lesa i yeio vklad v dozovuyu nagrasku naselenia». *Trudy BGTU*. 1 (2). 251-258.
- BABOSOV, E. M. (1996). *Chernobylskaya tragediya v yeyo sotsialnyj izmerenij* (La tragedia de Chernobyl en sus dimensiones sociales). Mn.: Pravo i ekonomika.
- BARABANOV, A. V., y OSANOV, D. P. (1993). «Zavisimost tiazhesti luchevoj porazheni kozhi ot glubinnogo raspredelenia dozi beta-izluchenia u postradavshij pri avari na Chernobylskoi AES». (Dependencia de la gravedad de las lesiones de radiación de la piel con respecto a la distribución en profundidad de la dosis de radiación beta en las víctimas del accidente de la central nuclear de Chernobyl) *Meditssinskaia radiologuia*, 38 (2), pp. 28-29.
- BARTOLOMEY, G., BAIBAKOV, V. y ALTUKHOV, M. (1989). *Basic Theory and Methods of Nuclear Power Installation Calculations*. Energoatomizdat, Moscow.
- BATAGUIN, M. Yu. (2010). «Uslovníe yadernie niebalanci» (Los desbalances nucleares condicionados). *Atomnaya Strategiya*. 45 (3), 21.

---

<sup>1</sup>Para mayor facilidad, se aplican las normas de transliteración fonética del ruso al castellano establecidas por la Asociación Española de Profesores de Lengua Rusa, las cuales fueron acogidas por el Servicio de Traducción Española del Parlamento Europeo (Boletín 74 del 2 de enero de 2005). Además, se han traducido los títulos de cada referencia bibliográfica al español, salvo que ya estuvieran en inglés. En este último caso, se ha mantenido la norma de transliteración que tenían los nombres de los autores. También se ha tratado de aplicar hasta donde fue posible el estilo Harvard, tal y como se hizo con la bibliografía precedente.

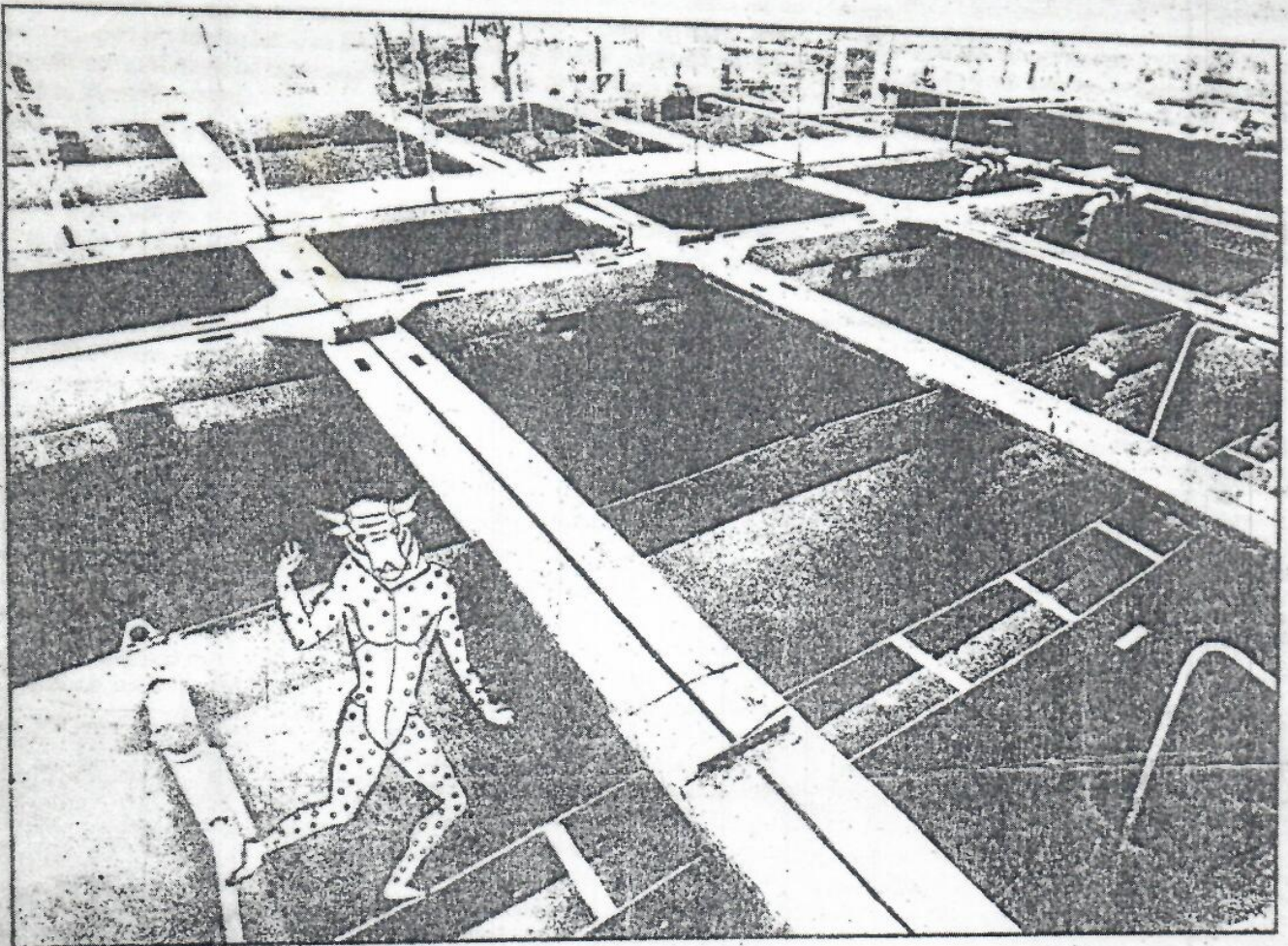
- BELAEV, S. T., Y ZELEVINSKI, B.G. (1985). «Nils Bor y fizika atomnogo yadra» (Niels Bohr y la física del núcleo atómico). *Yspeji fizicheskij nauk*, 147 (2), 210-251.
- BELOZERSKI, G. N. (2006). «O protsesse razrusheniya reaktora 4-ogo bloka Chernobylskoi Atomnoi Electrostantsy» (Sobre el proceso destructivo del reactor del cuarto bloque de la Central Atómica de Chernobyl). *Vestnik SPbU*. 4(3). 118-123.
- BODRIJIN, N. (2018). *Anatoli Alexándrov*. Molodaya Gvardiya. Moskva.
- BORISENKO (2017). «O nekotorykh parametroy yadernoi besopasnosti uran-grafitoviy reaktorov» (Sobre la seguridad nuclear de los reactores uranio-grafito). Disponible en: <http://proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7281> [Consultado 30-01-2018]
- BOROVOI, A. A. (1990). «Vnutri zarkofaga» (Dentro del sarcófago). *Priroda*. 11.
- BOROVOI, A. A., y BELIJOV, E. P. (2011). *K 25-letiu avari na Chernobylskoi AES. Raboti Kurchatogo Instituta po likvidazi posledstvi avari* (Con motivo del 25 Aniversario de la avería en la electronuclear de Chernobyl. Trabajos del Instituto Kurchatov para la liquidación de la avería). Moskva, Kurchatovski Institut.
- BOROVOI, A. A., y BELIJOV, E. P. (2012) *Opyt Chernobylia* (La experiencia de Chernobyl). Moskva, Kurchatovski Institut, t. 1.
- BOROVOI, A. A., y BELIJOV, E. P. (2013) *Opyt Chernobylia* (La experiencia de Chernobyl). Moskva, Kurchatovski Institut, t. 2.
- BOROVOI, A. A., y BELIJOV, E. P. (2013) *Opyt Chernobylia* (La experiencia de Chernobyl). Moskva, Kurchatovski Institut, t. 3.
- BOROVOI, A. A., y BELIJOV, E. P. (2015) *Opyt Chernobylia* (La experiencia de Chernobyl). Moskva, Kurchatovski Institut, t. 4.
- BURLAKOVA, E. B., KUZNIETSOV, V. M., MOSALENKO, V. A., NAZAROV, A. G., OSTRIETSVOV, I. N., SIMONOV, E. Ya., y CHEPENKO, B. A. (2006). *Neizviestni Chernobyl: istoriya, sobytiya, facti, uroki* (El Chernobyl desconocido: historia, sucesos, evidencias, lecciones). Moskva, Izdatelstvo MHEPY.
- DYATLOV, A. C. (1995). «Why INSAG Has Still Got It Wrong». *Nuclear Engineering International*. 494 (40), 17-21.
- DYATLOV, A. C. (2003). *Chernobiyl. Kak eto bylo* (Chernobyl. Cómo fue). Moskva, Nauchtejlitizdat.
- DOMARENKO V. A., y RIJVANOV (2007). «Ocherki no istorii izucheniya radiaktivnosti i stanovleniya uranoboi gueologii v tsentralnoi Sibire» (Apuntes para la historia de los estudios sobre radiactividad y la formación de la geología del uranio en Siberia Central . *Stranitsy istorii TPY*.
- DOLLEZHAL, N. A. (1989). *U iztokob rukotvornogo mira: zapiski konstruktora* (En los orígenes del mundo artificial. Apuntes de un constructor). Moskva, Znanie.
- DOLLEZHAL, N. A., y YEMELIÁNOV, I. Ya. (1980). *Kanalni yaderni energuiticheski reaktor* (Reactor energético nuclear de canales). Moskva, Atomizdat.
- DYACHENKO, A. A. (2008). (Ed.) *Opoliennie v borbe pri sozdaniya yadernovo shita rodini* (Curtidos en la lucha para crear el escudo nuclear de la patria). Moskva, Poligraf-Servis.
- EMELIANENKOV, A. (2013). *Solo na tsentrifugue* (Solo en la centrifuga). ANO Informatsionny tsentr atomnoi otrasli. Moskva.
- GONCHAROV, G. A. Y RYABEV I. D. (2001). «On the development of the first Soviet atomic bomb». *Physics-USpekhi*. 44 (1), 71-93.
- GUDKOV, I. N.; KUDIASHEVA, A. G.; MOSKALEV, A. A. (2015). *Radiobiologuia s osnovomi radioekologii* (Radiología con fundamentos de radioecología). Izdatelstvo SyktGu.

- HUCHTHAUSEN, P. (2007). *Kubinski Krizis. Ironika podboinoi voini* (La crisis cubana. Crónica de la guerra submarina). Moskva, Yausa, 2007. Existe una versión en inglés: *October Fury*. Hoboken, N.J., Wiley & Sons, 2002.
- IGOREVNA, S.S (2014) *Problema kontrolya nad oborotom raschepliyushikhsya materialov v mirovoi politike* (El problema del control sobre los materiales fisiónables en la política internacional). Tesis doctoral.
- ILIN (1994). *Reali u mify Chernobylya* (Realidad y mito de Chernobyl). Moskva: ALARA, 1994.
- IZRAEL, A. (2016). *Radiativnoe zagrisnenie prirodnix sred v resultate avari na CHAES*. (Contaminación radiactiva de los medios naturales como resultado de la avería en la CEN de Chernobyl). Moskva, GKE, Komtexprint.
- KALSINES, A. (2013). «Sistema rannebo pridupriehdienya stijinnyj biedstvii i ojrana okruzhayushei sredi» (Sistema de alerta temprana de los desastres naturales y la protección del medio ambiente). En: *Godichnaya Nauchnaya Konferentsiya*. Institut Estestvoznanii i Tejniki S. I. Vavílov (IIET RAN), 157-160.
- KALYADIN, A. (2007). «Countering proliferation and the rol of the UN Security Council». En: Arbatov, A. G. (Ed.) *At the nuclear threshold: the lessons of North Korea and Iran for the nuclear non-proliferation regime*. Moscow, Carnegie Moscow Center, Carnegie for International Peace, 117-139.
- KARPAN, N. V. (2016). «Chernobyl: v poiskaj pravdi» (Chernobyl: en búsqueda de la verdad). *Átomnaya strateguiya XXI*. 113, 3-11.
- KARPAN, N. V. (2005). *Chernobyl. Mest mirnogo atoma* (Chernobyl. La venganza del átomo pacífico). Kiev, Kantri Laif.
- KARPESKI, T. (2010). «Telo, nasielienie, i zhelovecheskaya zhizn v poslechernobylskoe politike v Belorusi» (Cuerpo, población y vida humana en la política postchernobyl en Belorrusia». *Perekriosti*. 1, 87-104.
- KEIRIM-MARKUS, I. B. (2000). «Reglamentatsiya oblucheniya dlya XX veka» (Reglamentación de la exposición a las radiaciones para el siglo XXI). *Journal of Medical Radiology and Radiation Safety* 45 (1), 6-12.
- KEIRIM-MARKUS, I. B. (1994a). *Radiatsionnaya bezopasnost. Rekomendatsii MKRZ 1990 g.* Ch. I. «Predizlovie redaktora pierievoda». (Seguridad radiológica. Recomendaciones ICRP 90 Parte 1. Introducción del redactor de la traducción), 1-15.
- KEIRIM-MARKUS, I. B. (1994b). «Comentario». *Radiatsionnaya bezopasnost. Rekomendatsii MKRZ 1990 g.* Ch. 2 (Seguridad radiológica. Recomendaciones ICRP 90. Parte 2. Comentarios), 161-207.
- KEIRIM-MARKUS, I. B. (1993). «Novie rekomendatsii po radiatsionnoi bezopasnosti v publikatsijaj 60 i 61 MKRZ (ch. 2)» (Nuevas recomendaciones para la seguridad radiológica en Publicaciones 60 y 61 del ICRP). *Disaster Medicine* 1 (3), 79-88.
- KHARITON, Y. B., ADAMSKII, V. B. y SMIRNOV, Y. N. (1996). «On the making of the Soviet hydrogen (thermonuclear) bomb». *Physics-USpekhi*. 39, 185-189.
- KHLOPKOV, A. (2012) «The Iranian Problem». En Arbatov, A. G. y Dvornik, V. (Eds.). *Nuclear reset. Arms Reduction and Nonproliferation*. Carnegie Endowment for International Peace, 87-103.
- KLIUCHNIKOV, A. A., SHARAYEVSKI, I. G., FIALKO N. M. y ZIMIN, L. B. (2010). *Teplofizika bezopasnosti atomnix elektrostantsi* (Termofísica de la seguridad de las centrales atómicas). Chernobyl.
- KRAVCHUK, N. V. (2010) «Yesho raz o jaraktere vzryva 4-ogo bloka» (Otra vez sobre el carácter de la explosión del 4-to bloque). *Gueofizicheski zhurnal*. 32 (1).
- KRUGLOV A.K. (1995) *Kak sozdavalas atomnaya promyshlennost v SSSR* (¿Cómo fue creada la industria atómica en la URSS?) Moskva, TsNIIatomin-form.

- LEGÁSOV, V. A. (1996). «Moi dolg razkazt ob etom» (Mi deber es contarlo). *Energiya*. 9, 41-49. Disponible en: <https://www.myslenedrevo.com.ua/uk/Sci/HistSources/Chornobyl/1988/MojDolgRasskazatObEtom.html> [Consultado 14-10-2020]
- MALKO, M. V. (1991). «Priediel: uchionin voevat- a liudan umirat?» (El límite: ¿los científicos a pelear y las personas a morir?). *Nabat* 8, abril (Entrevista a M.V. Malko).
- MENDELEIEV, D. I. (1960) *Periodicheskii Zakon. Dopolnitelni materialy* (La ley periódica. Materiales complementarios). Klassiki nauki, Ac. Sc., Leningrad.
- MENDELÉYEV, D. I. (1958). *Periodicheskii Zakon. Osnovye Stat'i*. (La ley periódica. Principales artículos) Klassiki Nauki, Ac.Sc., Moskva.
- MENDELÉYEV, D. I. (1905) *Popitka jimicheskogo ponimania efira* (Comprensión química del éter, Sankpetersburg.
- MENDELÉYEV, D. I. (1876) *Materialy dlya suzchdeniya o spiritizme* (Materiales para la evaluación del espiritismo). Sankpetersburg.
- NAZAROV, A. G. (2006). «Why Chernobyl catastrophe was not accident but catastrophe and why it was not casual». En Nikitin, A.T., y Stepanov, S.A. (Eds.). *Global problems of modern power engineering security: To 20-anniversary of catastrophe at Chernobyl NPP*. International science conference materials. Moscow, 4-6 April 2006, 196-210.
- NIKITIN, A.T. y STEPANOV, S.A. (2006). *Global problems of modern power engineering security: To 20-anniversary of catastrophe at Chernobyl NPP*. International science conference materials. Moscow, 4-6 April 2006.
- ORLOV, V. A. (2002) *Yadernoe nierasprostranienie* (No proliferación nuclear). Moskva, Pir, Tzentr Politisheskix Isledovaniy.
- PRIPYAT-CITY (2021). *Dokumenty KGB USSR*. Disponible en: <<https://pripyat-city.ru/documents/5-dokumenty-kgb-ussr.html>> [Consultado, 26-2-2020].
- PRYZNER, C. L. (1981). *Ekonomika energuetiki SSSR* (Economía de la energética de la URSS). Moskva, Vyschaya Shkola.
- RACHINSKI, V. V. (1997). *Kriticheski analiz sostoyaniya normirovaniya padiatsionnoi bezopasnosti v mire i Rossii* (Análisis crítico del estado de las normativas de seguridad radiológica en el mundo y Rusia). VNTIZ, Moskva.
- ROMANOV, G. N. (1997). «Kyshtymskaya avariya: sekrety i mify (zapadny analiz avarii 1957 g.)» (La avería de Kyshtym: secretos y mitos. Análisis occidental de la avería de 1957). *Voprosy radiazionoi bezopasnosti*. 3, 63-71.
- ROSENERGOATOM (2018). «Yadernaya lovushka: LAES nie smozhet zakrit ostanovlenii blok» (Trampa nuclear: la CEN de Leningrado no puede cerrar el bloque parado). *VTB*, 29 de diciembre. Disponible en: [https://www.rbc.ru/spb\\_sz/29/12/2018/5c2633749a7947f8833fc998](https://www.rbc.ru/spb_sz/29/12/2018/5c2633749a7947f8833fc998) [Consultado 01-01-2019]
- RUMYANTSEV A.N. Y FEDULIENKO B. M. (2016). «Chernobyl: tragediya, fars i urok». (Chernobyl: tragedia, farsa y lección). *Proatom*. Disponible en: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6700> [Consultado 30-01-2017]
- RUMYANTSEV A.N. (2011). «Logika RMBK» (La lógica del RMBK). *Atomnaya strategiya*. 52. 6-10.
- RYZHKOV, N. (2006). «Posledsviya i uroki Chernobylia» (Consecuencias y lecciones de Chernobyl). En: Nikitin, A.T., y Stepanov, S.A. (Eds.). *Global problems of modern power engineering security: To 20-anniversary of catastrophe at Chernobyl NPP*. International science conference materials. Moscow, 4-6 April 2006, 25-32.
- SAJAROV A. D. (1988, 14 de febrero). «Reaktory dolzhny byt pod zemlioi» (Los reactores deben estar bajo tierra). *Moskovskiye novosti*, p. 7.
- SIDORENKO, V. A. (2002). «Vvodnie zamechaniya k urokam chernobyl'skoi avari» (Notas introductorias a las lecciones de la avería de Chernobyl). *Istoria atomnoi energuetiki Sovietskogo Soyuza i Rossii*. 4. 4-16.

- SHARAEVSKI, I. G., FIALKO, H. M. y ZIMIN, L. B. (2010). «Neizvestnie diagnosticheskie aspekti zaproektnoi avari v Chernobyskoi AES» (Aspectos desconocidos del diagnóstico de las causas de la avería fuera de proyecto en la CEN de Chernobyl). *Problemi bezleki atomnij elektrostantsi i Chernobyliá*. 26. 5-14.
- SOLOVIOV S. M., KUDRYAKOV, N. N. Y SUBBOTIN, D. V. (2020). *Valeri Legasov: Visvecheno Chernobyliem* (Valeri Legásov: iluminado por Chernobyl). Moskva. Izdatelstvo AST.
- STEPANOV, A. (2010). «*Nauchni diskurs Chernobyliá: laboratorya tejnicheskij resheni*» (El discurso científico de Chernobyl: laboratorio de soluciones políticas). *Perekriosti*, 1, 43-66.
- TARASOVA, N. P. y MUSTAFIN, V. I. (2013). «V. I. Vernadski i problemi radioaktivnosti» (V. I. Vernadski y los problemas de la radiactividad). *Voprosi sovremennoi nauki i tejniki*. 3 (47), 38-50.
- TIMERBAEV, R. (2003). «Enhancing IAEA safeguards». En: Arbatov, A. G. y Dvorkin, V. (Eds.). *Nuclear weapons after the cold war*. Moscow, R. Elinin Pub. House.
- TRIFONOV, D. N. (2012) «Posledsvia odnogo vizita» (Consecuencias de una visita). *Jimia*, v. 16.
- TRIFONOV, D. N. (1971) *O kolizhectvennoi interpretatsii periodizhnosti* (Sobre la interpretación cualitativa de la periodización). Nauka, Moskva.
- TOLSTIKOV. V. S. (2007). «Radiatsionnaya avariya 1957 goda na Yuzhnom Urale: pravda i domysly» (El accidente radiactivo de 1957 en los Urales del Sur: verdad y conjeturas). *Ojrana prirody Yuzhnogo Urala: oblastnoi ekologicheski almanaj*. Chelyabinsk, 19-23.
- TOPYCHKANOV, B. (2011) «Nuclear Energy Prospects». En: Arbatov, A. G. y Dvorkin, V. (Eds.). *Nuclear reset. Arms Reduction and Nonproliferation*. Carnegie Endowment for International Peace, 2011, 77-86.
- VERNADSKI, V. I. (1922). *Ocherki i rechi* (Ensayos y discursos). Nauchjimtejizdat, tomo 1.
- VIZGUIN, V. P. (2005) «Etos uchenogo-yadershcnika: istoki i formirovanie (1940–1950) na materiale istori sovietskogo atomnogo proiekta» (El ethos del científico nuclear: orígenes y formación (1940-1950) a partir de materiales sobre la historia del proyecto atómico soviético). *Filosofia Nauki*. 11, 261-279.
- YABLOKOV, A. V. (2002). *Mif o bezopasnosti malyj doz radiatzii* (El mito sobre la seguridad de las bajas dosis radiactivas). ISAR, Moskva.
- YUJOVA, V. (2001, 25 de abril) «Po chernobylskomu bremeni» (En tiempos de Chernobyl). *Itogi*. 17 (776). Disponible en: <http://www.itogi.ru/exclus/2011/17/164420.html> [Consultado 12-01-2013]
- ZENCHENKO, A. P. (2002) *Mify i fakty ob urane* (Mitos y realidades del uranio). Krasnokamensk Irkutsk: Izdvo «JElpress».

## CIENCIA Y TECNOLOGIA

Chernobil

## MEMORIAS DEL MINOTAURO

**A diez años del accidente nuclear y su enseñanza: al Laberinto hay que entrar con el hilo de Ariadna**

Por ARGEL CALCINES  
(Prensa Latina)

**D**ESDE la ventana de mi habitación en el motel Kolosa, palabra que significa "espiga" en ucraniano, yo podía leer aquella inmensa pancarta escrita en ruso y colgada en la cúspide del edificio más céntrico de la ciudad de Pripiat: "El átomo pacífico salvará al mundo". Muy lejos estaba de imaginar que, sólo meses después, los habitantes de ese moderno poblado —situado a 109 kilómetros al norte de Kiev, capital de Ucrania— vivirían en carne propia la

negación total de esa consigna, al estallar el reactor número cuatro de la central atómica de Chernobil y producirse la fuga masiva de sustancias radiactivas a la atmósfera.

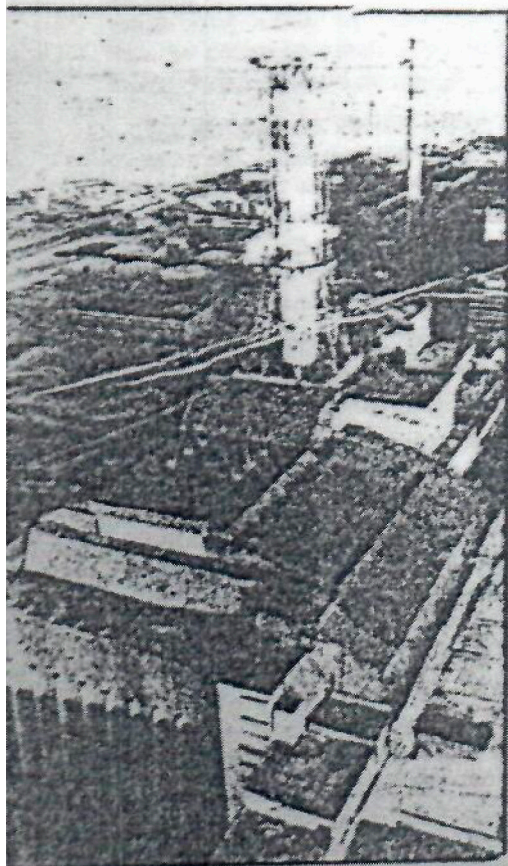
En Pripiat, que debe su nombre a un río, vivían los trabajadores de la planta nuclear ucraniana, la cual solía acoger todos los veranos a estudiantes extranjeros del Instituto Energético de Moscú, quienes cumplían allí las prácticas de producción correspondientes al cuarto año de la carrera.

Junto a alemanes, checos, húngaros, vietnamitas y otros cubanos, pertenecí al último grupo de educandos que pudo realizar en esa central un programa de "familiarización" con la tecnología nuclear. De ahí que participara durante un mes en las labores de explotación como si fuera un operador más. Claro, hipotéticamente.

Además de estudiar al dedillo un tema específico —el sistema de explotación del reactor, por ejemplo—, podíamos observar las maniobras técnicas de rigor e intentar satisfacer la sed de conocimientos prácticos, aun cuando sabíamos que en nuestros respectivos países no estaba previsto instalar centrales nucleares de ese tipo.

Por supuesto, en años posteriores se efectuaban entrenamientos profesionales en plantas con reactores similares al modelo elegido para Cuba: VVER-440/318, del cual hay exponentes instalados en las electronucleares de Loviisa, en Finlandia, y de Paks, en Hungría. Estos nada tienen que ver con el prototipo de Chernobil.

Panorama de la Central Electronuclear de Chernobil.



Conocido como RBMK-1000, en referencia a su gran potencia (mil megavatios eléctricos) y su sistema de canales de combustible, el reactor de la catástrofe ucraniana es de antemano un modelo acajado, debido a que no prevé ninguna variación u otra barrera que pueda contener los productos radiactivos tras una eventual explosión.

Claro, los partidarios del prototipo partían de excluir la posibilidad de semejante percance, en tanto resaltaban la ilimitada capacidad de potencia del

reactor (ya entonces se hablaba de construir un RBMK de dos mil 400 megavatios), sin descartar las bondades que ofrecía para obtener plutonio in situ.

Durante un turno de madrugada otro cubano y yo tuvimos la oportunidad única de descender al compartimento inferior del reactor del complejo, de ver con nuestros propios ojos al Minotauro. Incluso para quienes llevaban varios años en la explotación de la central, era una ocasión singular apreciar esa inmensa cantidad de

## CUANDO EL MALABAR CAE AL PISO

Por TONI PRADAS

**A** dos días del décimo aniversario del horror ucraniano, la planta de Chernobil volvía a ser una lamentable noticia: un escape de polvo radiactivo en el tercer bloque aumentó los niveles de radiactividad aunque, afortunadamente, sin superar las cifras admisibles.

La central, brindaba un nuevo susto. En 1990 y 1993 lo lograba asimismo. Por suerte, nunca se ha repetido el más macabro, el del 86, cuando las nubes radiactivas de la explosión dejaron unos ocho mil muertos (para la OMS, un total de 500 mil antes del próximo siglo).

Pero no sólo esta nucleoelectricidad ha resultado ser la vergüenza del granito atómico. Ocho días después del fatídico ípsum de 1986, un escape en la planta de Hamm Uentrop, Alemania, fue ocultado por la dirección. Las partículas radiactivas detectadas fueron cargadas injustamente a la cuenta de Chernobil.

Del trágico accidente también se aprovechó, entonces con fines políticos, Estados Unidos. ¿Podrían haber olvidado el escape de vapor de Three Miles Island (Pennsylvania, 1979, con su nube radiactiva de 30 kilómetros cuadrados? Registró además escalaros en Winona (1961), Minnesota (1971), Tennessee (1979), Oklaho-

ma (1986), con diferentes niveles de gravedad.

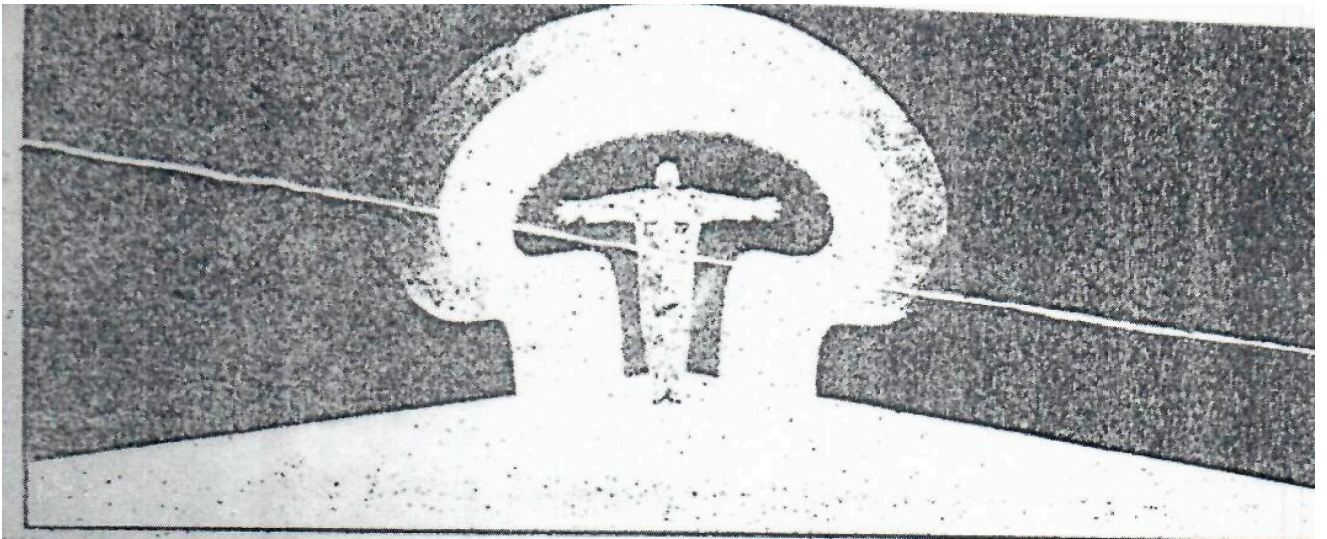
La historia de terror comienza en diciembre de 1952, en una central experimental cerca de Ottawa, Canadá. Por suerte, se logró controlar sin víctimas la acumulación de cinco millones de agua radiactiva accidentalmente.

En septiembre del 57 comienzan las páginas negras del átomo soviético, cuando una explosión en la central de Cheliabinsk-40, en los Urales, saldó centenares de muertos y miles de afectados. Incrediblemente, el secreto logró mantenerse durante 35 años. Por otra parte los años 80 han resultado alarmantes, principalmente por la fuga radiactiva en Sosnovi Bór (marzo del 92) y la explosión de un contenedor lleno con una disolución de uranio en la planta de Tomsk-7 (Siberia, 1993).

También los experimentados franceses (Pierrelatte, 1977; Tricastin, 1980; y Cadarache, 1994), los cuidadosos ingleses (Sellafield, 1957, 33 muertos) y los inteligentes japoneses (Fukushima, 1996) han sentido el rubor en sus rostros. Búlgaros y brasileños, la misma ruta.

Quizás sean más los casos. Pero con los conocidos, basta para echar una ojeada al malabar con el núcleo.





Monumento a las víctimas de la tragedia nuclear ucraniana

rias conductoras de agua —cerca de dos mil— que se perdía en la penumbra, hasta penetrar en el mismísimo corazón del reactor: la zona activa, que es donde tiene lugar la fisión del combustible atómico.

En un reactor nuclear, a diferencia de una bomba, el hombre controla la reacción en cadena con ayuda de barras absorbentes de neutrones (reguladores). Estas se introducen y se sacan de la zona activa, en dependencia de que se desea disminuir o aumentar la fisión de los átomos de uranio.

En el caso del RBMK-1000, el inmenso calor desprendido durante la desintegración nuclear se utiliza para convertir en vapor el agua que circula por entre los elementos de dióxido de uranio (canales de combustible). Tras perder humedad, ese vapor —obtenido dentro de la propia cámara— pasa a mover las turbinas acopladas a los generadores de energía eléctrica.

Apenas surge una señal de avería que compromete la seguridad de la instalación, caen en la zona activa las mencionadas barras reguladoras junto con otras de mayor capacidad absorbente, las que interrumpen drásticamente la reacción en cadena.

Así debía suceder de acuerdo con la teoría; sin embargo, nadie sabía entonces en Chernobí que ese sistema de control y protección tenía graves problemas de diseño, cuya naturaleza —se conoció luego— había sido descubierta en 1983 en la planta de Ignalina, Lituania, mas no se informó nunca

a los explotadores de entidades análogas.

"No, no te acerques", me cortó el paso con un ademán el joven pelirrojo y fornido que se desempeñaba como turbinista. Este era cuñado de Stanislav, un ruso compañero mío de estudios.

Aun cuando el reactor estaba parado y previamente desactivado, lo contrario no hubiéramos podido tener acceso a ese compartimiento) quedaba sin dudas un fondo radiactivo: el mal aliento del Minotauro dormido.

Me había acercado imprudentemente, pues quería ver los gruesos colectores que alimentaban las tuberías de agua, mas me lo impedía mi descuidada miopía y la oscuridad del recinto.

Según planteaban los proyectistas, la rotura de uno de esos colectores significaba la máxima avería posible en un RBMK-1000, de los que actualmente funcionan quince en territorios de la antigua Unión Soviética: Rusia, Ucrania y Lituania. Otra avería mayor era sencillamente "impensable", al punto que no se analizaba en la asignatura de Seguridad Nuclear, la cual nos dictaba un renombrado especialista de apellido Sidorenko.

Este profesor, caracterizado por su trato amable con los estudiantes, estuvo entre los expertos que se personaron en Pripiat pocos días después del 26 de abril de 1986, cuando la magnitud de la tragedia era tal que, interrogado en el aula sobre lo que había visto,

sólo atinó a respondernos: "Ya terarán por los periódicos."

Desde entonces han surgido demasiadas preguntas sin respuesta, demasiados puntos oscuros, demasiadas conjeturas que van desde las más tranquilizadoras en un principio hasta las que tocan arrebatos en los últimos tiempos.

En cuanto a las causas del accidente, en 1994 el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) emitió su propio veredicto: el informe INSAG-7 que "actualiza el INSAG-1 (1987)" cuyos elaborados a partir de la información suministrada por las autoridades de la extinta Unión Soviética.

Aunque evita dar conclusiones definitivas, el INSAG-7 reconoce que la principal causa del desastre radicó en el "deficiente diseño del reactor RBMK-1000 y su sistema de control y protección"; "por lo que se atribuye el peso concedido en 1986 a la Unión Soviética, que atribuía plenamente la responsabilidad de lo ocurrido al personal de explotación".

Inconscientes del peligro que se enfrentaban, aquellos ingenieros insistieron de forma absurda en un experimento que, paradójicamente, buscaba verificar cuán seguro era el RBMK-1000 una gran evidencia: la ausencia total de energía eléctrica.

Los expertos del OIEA alertaron "no se conocen con certeza las causas de la excursión de potencia que desató el cuarto reactor de Chernobí".

*Sigui*

referencia al momento culminante de la avería, cuando la situación en la zona activa escapó totalmente de control y el ingeniero al mando decidió accionar el botón de parada.

De acuerdo con especialistas citados en el informe, en pocos segundos aumentó varias decenas de veces la reacción nuclear en cadena —y, por ende, la potencia calorífica del reactor—, al punto de que muchos de sus elementos de combustible llegaron a derretirse.

Al respecto, el documento señala, como "probablemente un factor decisivo, la adición de nueva reactividad positiva por la inserción de las barras de control y de seguridad", o sea, que éstas no apagaron a tiempo el reactor, sino que, por el contrario, provocaron la embestida y seguidamente la explosión.

Entre el humo, polvo y vapor asfixiante, los bomberos y parte del personal de turno se enfrascaron en sofocar el incendio que amenazaba con extenderse por la sala de máquinas hacia los bloques vecinos, y que arrasaba la sección del reactor donde ya todo esfuerzo humano carecía de sentido.

El cuñado de Stanislav era uno de ellos y, según me contó este último, sintió de inmediato los primeros síntomas de la radiación: sabor a chocolate en la boca, picazón en la garganta, fuerte dolor de cabeza, náuseas...

Hubo un instante en que no se aguantó las inmensas ganas de orinar y, cuando sacó el miembro, descubrió que tenía una úlcera, o sea, una quemadura radiactiva. A partir de ese momento todo debió parecerle confuso: ¿Sería sólo un sueño del que obligatoriamente se despierta?

Entre las 31 personas que murieron pocos días después como consecuencia de este accidente estaba ese joven fornido, quien me alertó en su momento, y con el que solía tomar té en el local de las turbinas. Aunque no recuerde su nombre, yo no lo olvido en el décimo aniversario de Chernobí.

El autor es ingeniero en Centrales Atómicas e Instalaciones.

## EUREKA



### SEMEJANZAS ENTRE SIDA Y VACA LOCA

Roma—El virólogo francés Luc Montaigner, descubridor del virus del sida en 1983, dijo que existen "semejanzas, aunque no iguales" en los efectos degenerativos del sida y del síndrome de Creutzfeld-Jakob, que se pone en relación con la llamada enfermedad de la "vaca loca".

Montaigner dijo que mientras se conoce el agente patógeno del sida, no se sabe a qué agente atribuir el Creutzfeld-Jakob. Algunos, explicó el virólogo, dicen que al síndrome se debe a un agente que nada tiene que ver con los virus o las bacterias, sino más bien con una proteína que se autotransforma (prión).

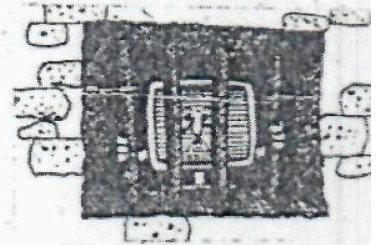
Por su parte, Montaigner dijo que la causa de este síndrome podría ser algunos microorganismos altamente resistentes al calor y a los detergentes, y capaces de sobrevivir por años en los restos de animales y en suelo (ANSA).

### CORAZON RETOZON

Washington.—Las personas que sufren de insuficiencia cardíaca pueden practicar una actividad sexual normal sin aumentar en forma significativa el riesgo de infarto del miocardio, según un estudio publicado por el Diario de la Asociación Norteamericana de Medicina (JAMA).

Este estudio, realizado a partir de un muestreo de 650 personas sexualmente activas y que sufren de insuficiencia cardíaca, permitió

determinar que si aumenta en el período de dos horas que sigue a la actividad sexual, el riesgo de infarto del miocardio es virtualmente el mismo para las estadísticas cardíacas que para las personas en perfecto estado de salud. El riesgo es de uno sobre un millón para una persona totalmente sana, mientras que para los enfermos cardíacos el riesgo pasa tan sólo a dos sobre un millón.



### RECONOCEN DAÑOS DE LA COMPUTADORA

Roma—Un tribunal de Turín condenó a 40 días de prisión a un funcionario estatal que obligó a una empleada a trabajar entre cinco y seis horas diarias en computadora, y reconoció que pasadas varias horas frente a la terminal daña la salud.

El tribunal reconoció que tantas horas provoca el llamado "síndrome astenoapéico por el video terminal", reconocido además por la Organización Mundial de la Salud. Los principales síntomas son dolor de cabeza, estrés, cansancio de la vista, fotofobia e incapacidad para mantener la vista sobre detalles pequeños.

Es la primera vez que un tribunal europeo se pronuncia sobre este tema, desde que la Unión Europea aprobó en septiembre de 1994 la ley sobre seguridad y salud que prohíbe permanecer más de cinco horas y por cinco días frente a la computadora (Notimex).



