

Universidad de Salamanca  
Instituto de Estudios de la Ciencia y la Tecnología

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYERON EN LA  
EVOLUCIÓN Y DESARROLLO DEL REACTOR NUCLEAR PWR

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INFLUYERON EN LA  
EVOLUCIÓN Y DESARROLLO DEL REACTOR NUCLEAR PWR

TESIS DOCTORAL  
PABLO FERNÁNDEZ ARIAS

PABLO FERNÁNDEZ ARIAS

TESIS DOCTORAL

Salamanca

2017



**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**  
INSTITUTO UNIVERSITARIO DE ESTUDIOS  
DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



**VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE  
INFLUYERON EN LA EVOLUCIÓN Y  
DESARROLLO DEL REACTOR NUCLEAR PWR

TESIS DOCTORAL  
PABLO FERNÁNDEZ ARIAS

Directores  
ANA CUEVAS BADALLO  
DIEGO VERGARA RODRÍGUEZ

Salamanca  
Septiembre, 2017



# Índice

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Objetivos de la investigación .....	5
1.3 Estructura de la Tesis .....	7
<b>CAPÍTULO 2: LA SOCIOLOGÍA DE LA TECNOLOGÍA COMO HERRAMIENTA PARA ENTENDER LA EVOLUCIÓN DEL DISEÑO PWR .....</b>	<b>13</b>
2.1 La Sociología de la Tecnología: la construcción de un nuevo paradigma tecnológico .....	13
2.2 Metodología de la investigación .....	22
2.3 Estado del arte .....	29
2.3.1 Historia de la Tecnología .....	29
2.3.2 Construcción Social de la Tecnología .....	35
2.4 Perspectiva sistémica de una Central Nuclear .....	40
2.5 Clasificación de los Reactores Nucleares .....	42
2.6 Factores determinantes para estudiar el diseño PWR .....	46
2.7 Funcionamiento de una central nuclear con un reactor PWR.....	50
<b>CAPÍTULO 3: EL ORIGEN DEL REACTOR NUCLEAR DE AGUA A PRESIÓN.....</b>	<b>53</b>
3.1 El origen del reactor nuclear .....	53
3.2 Los primeros intentos de regulación de la energía nuclear .....	56
3.3 El diseño militar del reactor nuclear.....	59
3.4 Shippingport: ¿el primer reactor nuclear? .....	62
3.5 La necesidad militar de la energía nuclear .....	68

<b>CAPÍTULO 4: LA EXPLICACIÓN SISTÉMICA DE LA EVOLUCIÓN DEL DISEÑO EN LOS AÑOS 60 EN ESTADOS UNIDOS.....</b>	<b>71</b>
4.1 Introducción .....	71
4.2 Factores relevantes en el desarrollo del diseño PWR estadounidense en la década de los sesenta .....	73
4.3 La cuestión económica de la tecnología nuclear en los cincuenta .....	74
4.4 Las centrales turnkey.....	79
4.5 La carrera estadounidense por la comercialización del diseño PWR .....	88
4.6 El comienzo de la relación entre tecnología nuclear, medio ambiente y sociedad .....	91
4.6.1 Introducción .....	91
4.6.2 El comienzo del tratamiento de la incertidumbre.....	98
4.6.3 El comienzo del movimiento ecologista antinuclear .....	102
4.7 Hacia la estandarización del diseño PWR, las centrales SNUPPS .....	103
4.8 Final de la década sistémica del diseño PWR en Estados Unidos.....	105
<b>CAPÍTULO 5: LOS FACTORES SOCIALES EN LA ADAPATACIÓN DEL DISEÑO A LAS NUEVAS REALIDADES NACIONALES. LOS CASOS DE FRANCIA, ALEMANIA Y ESPAÑA .....</b>	<b>107</b>
5.1 Introducción .....	107
5.2 Francia: el desarrollo de un programa y una industria alrededor del diseño PWR.....	108
5.2.1 El desarrollo tecnológico francés .....	108
5.2.2 El programa nuclear galo, una apuesta nacional .....	109
5.2.3 Evolución de los diseños PWR franceses .....	115
5.3 Alemania: la ruptura con el diseño tradicional PWR .....	118
5.3.1 Rompiendo con el pasado .....	118
5.3.2 Aumento de las protestas sociales contra el crecimiento nuclear .....	123
5.3.3 La central nuclear de Mülheim-Kärlich.....	127

5.3.4	Proceso de variación durante el período de licenciamiento.....	129
5.3.5	Fase final del proceso de licenciamiento .....	136
5.3.6	Factores influyentes en la rigidez del proceso de licenciamiento alemán .....	136
5.3.7	Procesos de selección de la tecnología nuclear en Alemania .....	138
5.4	El optimismo español, Lemóniz y la moratoria nuclear .....	143
5.4.1	El origen de la energía nuclear en España.....	143
5.4.2	El origen de la controversia sociotecnológica de Lemóniz .....	151
5.4.3	Argumentos a favor y en contra de la central nuclear de Lemóniz.....	157
5.4.4	Lemóniz y los factores sociales .....	158
5.4.5	Factores en el final de la controversia sociotecnológica de la central nuclear de Lemóniz .....	160
5.5	Diferencias en la adaptación del diseño a las nuevas realidades.....	166

## **CAPÍTULO 6: EL DEBATE SOCIAL EN TORNO AL DISEÑO:**

	<b>THREE MILE ISLAND Y EL PWR BRITÁNICO.....</b>	<b>171</b>
6.1	Introducción .....	171
6.2	El crecimiento del debate nuclear .....	172
6.3	Three Mile Island.....	181
6.3.1	El accidente de TMI .....	181
6.3.2	La reacción social desde la cultura y los medios de comunicación .....	183
6.3.3	Consecuencias del accidente de TMI en la industria nuclear .....	187
6.4	La construcción social del PWR británico .....	190
6.4.1	Introducción .....	190
6.4.2	La historia nuclear del Reino Unido.....	193
6.5	El comienzo de la construcción social del diseño PWR británico .....	196
6.6	La investigación pública de Sizewell B como un mecanismo de estabilización del artefacto .....	203
6.7	Factores influyentes en la implantación y posterior estabilización del diseño PWR británico .....	210
6.8	Diferencias y similitudes entre Three Mile Island y Sizewell B .....	214

<b>CAPÍTULO 7: RETROSPECTIVA INTERNACIONAL DEL DISEÑO PWR .....</b>	<b>217</b>
7.1 Introducción .....	217
7.2 El desarrollo nuclear soviético .....	218
7.2.1 La diversidad inicial del programa nuclear soviético .....	218
7.2.2 VVER, la variante soviética del diseño PWR.....	219
7.2.3 La cooperación Este-Oeste en el diseño VVER-440 de Loviisa .....	223
7.3 Bushehr I: La central nuclear PWR iraní .....	224
7.3.1 La república islámica de irán en la segunda mitad del siglo XX.....	224
7.3.2 El origen del programa nuclear Iraní .....	225
7.4 El milagro tecnológico de Japón y el diseño PWR .....	231
7.4.1 La tensa relación histórica entre Japón y la energía nuclear.....	231
7.4.2 Breve historia del desarrollo del diseño PWR japonés .....	231
7.5 La evolución del diseño PWR en China, el gigante asiático .....	235
7.5.1 Razones para el desarrollo del diseño PWR chino .....	235
7.5.2 Evolución del diseño PWR en el gigante asiático .....	236
7.6 La república de Corea y el diseño PWR .....	238
7.6.1 Evolución del diseño PWR en Corea del Sur .....	238
7.6.2 Factores influyentes en el diseño de la variante PWR coreana.....	245
7.7 Diferentes evoluciones del diseño PWR en función del entorno .....	247
<b>CAPÍTULO 8: DISCUSIÓN .....</b>	<b>251</b>
8.1 Evolución del Diseño PWR desde de la Sociología de la Tecnología .....	251
8.1.1 La validez de la perspectiva combinada de los enfoques CTS .....	251
8.1.2 Modelo de macro-evolución del diseño PWR desde la Construcción Social de la Tecnología.....	256
8.2 Situación actual del diseño PWR en el mundo .....	258
<b>CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES.....</b>	<b>267</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>269</b>

## Figuras

<b>Figura 2.1</b> Perspectiva “combinada” de la evolución histórica del diseño de reactor nuclear PWR.....	24
<b>Figura 2.2</b> Esquema de la relación entre un artefacto cualquiera, los grupos sociales, los problemas y las soluciones .....	36
<b>Figura 2.3</b> Evolución de las generaciones de reactores nucleares.....	42
<b>Figura 2.4</b> Esquema de evolución de las generaciones de los reactores nucleares (basado en WNA, 2011) .....	45
<b>Figura 2.5</b> Diferentes diseños de reactores nucleares en el año 1968 (basado en IAEA, 1968).....	48
<b>Figura 2.6</b> Diagrama de una central nuclear con reactor PWR.....	50
<b>Figura 3.1</b> Diseño PWR de la central nuclear de Shippingport .....	64
<b>Figura 4.1</b> Central nuclear de Connecticut Yankee en 1968 (Autor Connecticut Historical Society, Gammel, 2014).....	77
<b>Figura 4.2</b> Evolución del número de reactores nucleares solicitados en Estados Unidos durante las décadas de los 50 y 60 (basado en Burness et al, 1980, p. 192).....	82
<b>Figura 4.3</b> Evolución de la capacidad de generación de energía nuclear en Estados Unidos a lo largo de las décadas de los sesenta y setenta (basado en Burness et al, 1980, p. 192).....	85
<b>Figura 4.4</b> Diseño PWR de Babcock & Wilcox.....	89
<b>Figura 4.5</b> Diseño PWR CE80 de Combustion Engineering .....	90
<b>Figura 4.6</b> Esquema de la explicación sistémica de la evolución del diseño PWR durante la década de los sesenta en Estados Unidos.....	106
<b>Figura 5.1</b> Diseño EPR construido en la Unidad 1 de la central nuclear china de Taishan (Autor CGN, WNN, 2016) .....	109
<b>Figura 5.2</b> Número de Reactores PWR en cada serie del programa nuclear francés.....	116
<b>Figura 5.3</b> Diseño Konvoi alemán de 1300 MWe.....	120
<b>Figura 5.4</b> Centrales Nucleares en Alemania en el año 2016 (basado en IAEA, 2016b).....	121
<b>Figura 5.5</b> Centrales nucleares en Alemania, junto diseño y la capacidad de generación (IAEA, 2016b).....	122



<b>Figura 5.6</b> Esquema del sistema de licenciamiento alemán (basado en IAEA, 2016b).....	123
<b>Figura 5.7</b> Variación del diseño B&W durante el proceso de licenciamiento alemán.....	128
<b>Figura 5.8</b> Variaciones realizadas durante el proceso de licenciamiento alemán del diseño B&W.....	135
<b>Figura 5.9</b> Proceso de la Central Nuclear de Mülheim-Kärlich.....	140
<b>Figura 5.10</b> Transporte de la vasija de la central nuclear de José Cabrera. (Hemeroteca ABC, Viana, 2011).....	145
<b>Figura 5.11</b> Reactor PWR de la Central Nuclear de José Cabrera.....	146
<b>Figura 5.12</b> Historia de la controversia sociotecnológica de la Central Nuclear de Lemóniz.....	156
<b>Figura 5.13</b> Factores influyentes en la controversia sociotecnológica de la central nuclear de Lemóniz.....	165
<b>Figura 5.14</b> Adaptación del diseño PWR a las nuevas realidades de Francia, Alemania y España.....	170
<b>Figura 6.1</b> Actores involucrados y sus necesidades en la controversia nuclear (basado en OTA, 1984, p. 7).....	180
<b>Figura 6.2</b> Reactor PWR de Babcock & Wilcox diseñado para las unidades 1 y 2 de Three Mile Island.....	181
<b>Figura 6.3</b> Evolución del apoyo de la sociedad estadounidense ante la construcción de nuevas centrales nucleares (Melber, 1982, p. 388).....	184
<b>Figura 6.4</b> Viñeta de 1979 sobre los diferentes errores de la tecnología de la época: Skylab, Avión DC-10, Neumáticos Firestone y TMI (Autor Tony Auth, Petroski, 2007, p. 24).....	186
<b>Figura 6.5</b> Esquema del proceso de investigación pública de Sizewell B (Davies, 1995, p. 4).....	198
<b>Figura 6.6</b> Grupos sociales relevantes y problemas en la construcción social del diseño PWR británico.....	202
<b>Figura 6.7</b> Grupos sociales relevantes, problemas y soluciones en el desarrollo del diseño PWR británico.....	211
<b>Figura 6.8</b> Diferencias y similitudes entre <i>Three Mile Island</i> y <i>Sizewell B</i> .....	216
<b>Figura 7.1</b> Diseño VVER-440.....	220
<b>Figura 7.2</b> Diseño VVER-1000.....	221

<b>Figura 7.3</b> Evolución del diseño VVER.....	222
<b>Figura 7.4</b> Evolución de la contaminación ambiental en Japón (basado en Broadbent, 1999, p. 14).....	232
<b>Figura 7.5</b> Evolución del diseño PWR a lo largo de las diferentes etapas de desarrollo en Corea del Sur.....	239
<b>Figura 7.6</b> Gráfico de capacidad de generación de energía eléctrica de Corea del Sur, frente a la capacidad de generación de la Energía Nuclear (basado en Park, 1992, p. 722).....	241
<b>Figura 7.7</b> Esquema del Safety Despressurization System (Matzie y Ritterbusch, 1998, p. 190).....	242
<b>Figura 7.8</b> Factores influyentes en la variante PWR coreana .....	246
<b>Figura 7.9</b> Diferencias y similitudes entre Three Mile Island y Sizewell B.....	250
<b>Figura 8.1</b> Evolución del diseño PWR a lo largo de la Generación II de reactores nucleares aplicando el Análisis de Redes Sociales (ARS).....	257
<b>Figura 8.2</b> Reactores nucleares PWR operativos en el mundo .....	259
<b>Figura 8.3</b> Diferentes diseños de reactores nucleares operativos en el mundo .....	260
<b>Figura 8.4</b> Evolución mundial de las diferentes variantes del diseño PWR.....	261
<b>Figura 8.5</b> Número de reactores nucleares en situación de parada permanente en los últimos años.....	262
<b>Figura 8.6</b> Años en operación de los reactores nucleares operativos en el mundo .....	263
<b>Figura 8.7</b> Reactores nucleares en construcción en el mundo en el año 2017 .....	264



# Acrónimos

- ABWR:** Advanced boiling water reactor (Reactor de agua en ebullición avanzado).
- ACP-1000:** Diseño PWR Generación III chino.
- ACPR1000:** Advanced Chinese PWR (PWR Chino avanzado).
- AEA:** Atomic energy authority (Autoridad energía atómica - Reino Unido).
- AEC:** Atomic Energy Commission (Comisión de la energía atómica - Estados Unidos).
- AEG:** Compañía eléctrica alemana *Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft*.
- AGR:** Advanced gas cooled reactor (Reactor refrigerado por gas avanzado).
- ALARA:** As low as reasonably achievable (tan bajo como fuera razonablemente posible).
- AP-1000:** Diseño PWR de Westinghouse de Generación III+.
- APR1400:** Diseño PWR coreano evolución del OPR1000.
- APS:** Análisis probabilístico de seguridad.
- ARS:** Análisis de redes sociales.
- ATC:** Almacén temporal centralizado.
- ATWS:** Anticipated transient without scram (transitorio anticipado con fallo de la función de disparo automática del reactor).
- AVR:** central nuclear alemana de *Arbeitsgemeinschaft versuchsreaktor*.
- B&W:** Babcock & Wilcox.
- BBC:** Brown Boveri & Cie.
- BBR:** Babcock-Brown Boveri Reactor.
- BWR:** Boiling Water Reactor (Reactor de agua en ebullición).
- CDU:** Partido político alemán - Unión Cristianodemócrata.
- CE:** Combustion Engineering.
- CE80:** Diseño PWR de Combustion Engineering.
- CEA.** *Commissariat l'énergie atomique* (Comisión de la energía atómica - Francia).
- CEGB:** Central electric generating board (Junta central de generación eléctrica – Reino Unido).
- CGN:** China general nuclear corporation.
- CNNC:** China national nuclear corporation.
- CNP-300:** Diseño PWR chino.
- CNP-600:** Diseño PWR chino.
- COP21:** Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, París 2015.
- LDBS:** Leistungs-dichte-begrenzungs-system (Sistema de limitación de potencia).
- LOCA:** Loss of coolant accident (Accidente de pérdida de refrigerante).
- LWGR:** Light water graphite reactor (Reactor de agua ligera refrigerado con grafito).
- LWR:** Light water reactor (Reactor de agua ligera).
- LWRB:** Light water reactor breeder (Reactor rápido de agua ligera).
- M310:** Primera variante del diseño PWR de la compañía china CGN.
- MHI:** Mitsubishi.
- MK28:** Bomba de Hidrógeno.
- MOX:** Mixed Oxide (Combustible nuclear con mezcla de óxidos).
- N4:** Diseño PWR francés.
- NEPA:** National environmental policy act (Ley de política medioambiental - Estados Unidos).
- NI:** Nuclear installations inspectorate (Inspección de instalaciones nucleares - Reino Unido).
- NNC:** National nuclear corporation - Reino Unido.
- NODO:** Noticiero documental - España.
- NRC:** Nuclear regulatory commission (Comisión reguladora de la energía nuclear – Estados Unidos).
- OPR1000:** Diseño PWR coreano.
- OTAN:** Organización del tratado del Atlántico norte.
- OTSG:** Once-through steam generator (generador de vapor de un único paso).
- P4:** Diseño PWR francés.
- PEN:** Plan energético nacional - España.
- PEN-75:** Plan energético nacional del año 1975 - España.
- PEON:** *Production d'électricité d'origine nucléaire* (comisión consultiva para la producción de energía eléctrica de origen nuclear - Francia).
- PHWR-CANDU:** Pressurized heavy water reactor (Reactor de agua pesada a presión – Canadá).
- PPS:** Primary protection system (Sistema de protección primario).
- PRA:** Probabilistic risk assessment (Análisis probabilístico de riesgo).
- PRDP:** Program reactor demonstration programs (programa de demostración de los reactores nucleares - Estados Unidos).
- PSA:** Probabilistic safety assessment (Análisis probabilístico de seguridad).
- PWR:** Pressurized water reactor (Reactor de agua a presión).
- RBMK:** *Reaktor bolshoy moshchnosty kanalny* (Diseño de reactor nuclear – Rusia).

**CP:** Series francesas del diseño PWR.

**CP-1:** Chicago pile.

**CPR-1000:** evolución del diseño M310 de la compañía china CGN.

**CTS:** Ciencia tecnología y sociedad.

**DNB:** Limite de ebullición nucleada.

**DVI:** Direct vessel injection system (Sistema de inyección directa a vasija).

**EBR-1:** Experimental breeder reactor (Reactor experimental reproductor).

**EBS:** Emergency boration system (Sistema de boración de emergencia).

**ECCS:** Emergency core cooling system (Sistema de refrigeración del reactor de emergencia).

**EDF:** *Électricité de France* (Compañía eléctrica de Francia).

**EFWS:** Emergency feedwater System (Sistema de agua de alimentación de emergencia).

**EPR:** European pressurized reactor (Reactor presurizado europeo).

**EPZ:** Emergency protection zone (Zona de protección de emergencia).

**ERDA:** Energy Research and Development Administration (Administración de investigación y desarrollo de la energía).

**ESK:** *Entsorgungskommission* (Comisión de gestión de los residuos nucleares).

**ETA:** *Euskadi ta askatasuna* (País Vasco y libertad).

**GCR:** Gas cooled reactor (Reactor refrigerado por gas).

**HB:** *Herri batasuna* (partido político vasco).

**IAEA:** International atomic energy agency (Agencia internacional de la energía atómica).

**IBS:** *Integriertes-blockregel-system* (Sistema de control alemán).

**IHA:** Integrated Head Assembly (cabezal integrado sobre la vasija).

**IRWST:** *In-containment Refueling Water Storage Tank* (Tanque de recarga).

**KEPCO:** Korea electric power corporation (Compañía eléctrica - Corea del Sur).

**KSNP:** Korean Standard Nuclear Power.

**KWU:** *Kraftwerk Union*.

**RBS:** *Reaktorleistungs begrenzung system* (sistema de control de la potencia límite).

**RDA:** República democrática alemana.

**RFA:** República federal alemana.

**RHR:** Residual heat removal system (Sistema de evacuación de calor residual).

**RSK:** *Reaktor sischerheits kommission* (Comisión de seguridad del reactor - Alemania).

**RSS:** Reactor safety study (Estudio de seguridad del reactor – Estados Unidos).

**RWE:** *Rheinisch-westfalisches elektrizitatswerke* (Compañía eléctrica - Alemania).

**SCOT:** Social construction of technology (Construcción social de la tecnología).

**SDS:** Safety depressurization system (*Sistema de despresurización de seguridad*).

**SED:** *Sozialistische einheitspartei deutschlands* (Partido socialista – Alemania).

**SENA:** *Franco-Belgian Nuclear Energy Company of the Ardennes* (Compañía franco-belga de la región de las Ardenas).

**SNUSS:** Standardized nuclear unit power plant system (Sistema de estandarización de centrales nucleares - Estados Unidos).

**SPD:** Partidos socialdemócrata - Alemania.

**SPS:** Secondary protection system (Sistema de protección secundaria).

**SSK:** *Strahlenschutzkommission* (comisión para la protección radiológica - Alemania).

**TMI:** Three Mile Island.

**URSS:** Unión de repúblicas socialistas soviéticas.

**UTSG:** U-tube steam generator (Generador de vapor con tubos en U).

**VAK:** *Versuchsatomkraftwerk kahl* (central nuclear alemana BWR)

**VVER:** Diseño PWR ruso.

**WASH-1400:** Rasmussen Report. Reactor safety study.

**WH:** Westinghouse.

**WSL:** *Weltbun zum schutz des lebens* (Unión mundial para la protección de la vida).

**WWER:** water-water energetic reactor (Diseño PWR ruso).

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

## 1.1 Introducción.

A la hora de estudiar la relación existente entre la tecnología y la sociedad no cabe duda de que el grado de conocimiento que la sociedad tiene sobre la tecnología influye en el desarrollo de esta -sin entrar a valorar si lo hace de forma positiva o negativa-, y a la inversa, un mayor desarrollo tecnológico aumenta el grado de conocimiento de la sociedad en la que tiene lugar. De esta forma, es difícil separar el binomio conocimiento y desarrollo.

Asimismo, el desarrollo tecnológico influye también en aspectos culturales, organizacionales, técnicos, económicos, políticos, etc. Por ello, el estudio del desarrollo de un sistema tecnológico permite no solo comprender su evolución desde una perspectiva técnica, sino también comprender la evolución social que este originó. Paraphrasing to Juliana Tabares and Santiago Correa (2014), the high technological growth of the last decades has generated that both the impact of technology in society as its different causes, effects, processes and configurations become objects of study. Undertaking the study of a technological development allows analyzing its evolution and that of the society in which it takes place.

En palabras de Langdon Winner (2008), es necesario prestar atención al significado de los diseños y artefactos que nos rodean, ya que de lo contrario estaremos ciegos a muchas cosas que son cruciales tanto a nivel intelectual como práctico. La adopción de un sistema tecnológico dado acarrea de forma inevitable una serie de condiciones referentes a las relaciones humanas con un matiz político característico, por ejemplo, centralizado o descentralizado, de igualdad o desigualdad, represivo o liberalizador. Por ejemplo, si se acepta la construcción de centrales nucleares, también la sociedad acepta la existencia de unas élites de técnicos, científicos, industriales y militares, sin los cuales sería imposible explotar la tecnología nuclear.

Históricamente se ha considerado que el desarrollo tecnológico es un proceso lineal e independiente que, en todo caso, contribuye al progreso de la humanidad sin que se produzcan influencias exógenas a lo largo de todo el proceso de construcción tecnológico. Esta postura, conocida con el nombre de “*determinismo tecnológico*” está muy lejos del paradigma actual, que defiende que existe una estrecha relación entre la tecnología y la sociedad en la que se genera, manteniendo entre ellas más bien una relación de reciprocidad. La nueva perspectiva reviste de elementos sociales y culturales los procesos de desarrollo tecnológico, así como también identifica los diferentes mecanismos de relación que se producen entre la tecnología y la sociedad.

Esta concepción integraría a las actuales perspectivas “constructivistas” de la tecnología, donde esta última influye en el desarrollo cultural, social y económico de la sociedad contemporánea. El elevado desarrollo tecnológico alcanzado en la sociedad occidental ha dado lugar a que la tecnología evolucione de una forma tan rápida que el impacto que esta tiene es efímero. Somos conscientes de esta situación cuando comprobamos cómo la tecnología informática o la industria automovilística, por ejemplo, introducen artefactos en el mercado casi a diario, basándose en factores como la novedad, la compatibilidad, la seguridad o la rentabilidad de los mismos pero también en estudios de mercados y de satisfacción de clientes, o en el estudio de la evolución de los productos de sus competidores directos.

Consecuencia de este panorama es la existencia de tal multitud de artefactos que favorece que uno de ellos aparezca hoy como el más avanzado y mañana pase a ser sencillamente chatarra tecnológica. Esta situación incita a echar la vista atrás y analizar, desde los Estudios de Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS), cómo surgieron y evolucionaron aspectos tan importantes como la técnica, el conocimiento científico, las relaciones sociales y los elementos culturales, para dar lugar a los principales desarrollos tecnológicos a lo largo de la historia.

En la primera de estas áreas -tecnología de generación de energía eléctrica-, el cambio está siendo radical: las energías renovables -eólica, solar, biomasa, etc.- se pueden considerar como una opción ya no de futuro, sino de presente. La posibilidad de que se produzca el encarecimiento y posterior agotamiento de los combustibles fósiles, así como los efectos del cambio climático en la humanidad, han originado que las energías tradicionales procedentes de combustibles fósiles pierdan su papel principal en los sistemas energéticos de los países más industrializados.

Mientras, la energía nuclear, fundamental en los sistemas energéticos de países como Francia, Alemania o Estados Unidos, frena su desarrollo y explotación; pero en cambio en países con economías en fase de crecimiento como Brasil, China o los Emiratos Árabes se afianza como una fuente de generación de energía eléctrica de futuro. En palabras del economista y sociólogo alemán Herman Scheer *«nos encontramos actualmente en una fase híbrida de convivencia, no pacífica, entre las energías convencionales mayoritarias - como son las procedentes de los combustibles fósiles y la energía nuclear- y las energías renovables emergentes»* (Cornejo, 2011, p. 55).

La energía nuclear se ha visto desplazada de su posición preferente en el sistema energético de varios países debido a factores políticos, económicos, incluso técnicos. Esta tecnología tiene un carácter especial y diferenciado con respecto al resto de fuentes de generación eléctrica que ha jugado un papel fundamental en este desplazamiento: la elevada controversia social que ha existido y existe alrededor de su desarrollo y explotación. Ejemplo de esta controversia social es el resurgimiento del debate y movimiento antinuclear en Alemania tras el accidente de la central nuclear japonesa de *Fukushima-Daiichi*, en marzo de 2011. Finalmente, el gobierno alemán clausuró este debate -abierto ya con anterioridad al accidente- tomando la firme decisión de cerrar todas sus centrales nucleares antes del año 2022.



Ejemplos más recientes y cercanos de esta controversia social en torno a la energía nuclear son los vividos en España en los últimos años: la prolongación de la vida útil de la central nuclear de *Santa María de Garoña* y el proyecto de construcción del Almacén Temporal Centralizado (ATC), instalación que permite albergar el combustible nuclear gastado por las centrales nucleares. Esta controversia sobre la ejecución del ATC en la localidad conquense de Villar de Cañas se vio agravada durante el año 2015 con las diferentes decisiones políticas y legislativas tomadas por los gobiernos autonómico y nacional. Tanto es así que el proyecto pende a día de hoy de las decisiones que ambos puedan tomar en el futuro. Mientras tanto, multitud de grupos sociales - tanto a favor como en contra de su construcción- como asociaciones vecinales, órganos políticos locales, ecologistas, empresarios de la zona así como la industria nuclear del país, aguardan impacientes el cese de esta tensión política entre gobiernos con diferentes signos políticos para que se tome finalmente una decisión sobre la ejecución del proyecto.

Reafirmando lo dicho por Manuel García (1981), el interés público por las implicaciones sociales y políticas de las diferentes alternativas energéticas, adquiere sus más fuertes contrastes cuando el debate se centra en el uso de la energía nuclear como una de las fuentes básicas de la sociedad post-industrial. En el debate sobre la ciencia y la tecnología, el problema energético ha adquirido unos perfiles propios y una importancia tan grande, que lo ha situado en el centro de dicho debate. El problema energético refleja como ningún otro el carácter inestable de las instituciones sociales básicas de las sociedades post-industriales. Los temas energéticos, confinados hasta hace prácticamente dos décadas al mundo técnico, han adquirido tal relevancia social y trascendencia política que su consideración forma parte del marco en el que toman sus decisiones los políticos y empresarios, aparte de haber tomado de forma inesperada un papel relevante en el debate social, a través de noticias y comentarios en medios de comunicación y redes sociales.

Pero la controversia nuclear no es tan reciente como los anteriores ejemplos pudieran dar a entender, sino que data de la segunda mitad del pasado siglo y fue consecuencia de diversos factores y momentos históricos, entre los cuales destacan los siguientes: (i) el lanzamiento de las bombas atómicas por parte de los Estados Unidos en Hiroshima y Nagasaki en 1945, que aún sin relación con la aplicación de la energía nuclear como tecnología de generación de energía eléctrica marcó el inicio del rechazo social a todo lo que tuviera que ver con la energía nuclear; (ii) el apoyo gubernamental con el que temporalmente contó la energía nuclear; (iii) el desarrollo de una gran industria además de multitud de organismos reguladores cuyos objetivos eran fomentar la investigación y el desarrollo de la energía nuclear; (iv) la gestación y posterior crecimiento de un movimiento social a favor de la protección del medio ambiente y del ecologismo antinuclear; (v) la aparición de una sociedad cada vez más preocupada por el riesgo, la incertidumbre y el desconocimiento que suponía cualquier sistema técnico relacionado con la energía nuclear, lo que se denominó como *radiofobia*; (vi) la crisis del petróleo de 1973; (vii) el accidente de la central nuclear de *Three Mile Island* en 1979; y (viii) el accidente de la central nuclear de *Chernobyl* en 1986.

## **1.2 Objetivos de la investigación.**

El objetivo principal de esta investigación es analizar la evolución técnica de un desarrollo tecnológico específico como es el diseño de reactor nuclear de agua a presión, en inglés *Pressurized Water Reactor* (PWR), desde la perspectiva de los estudios CTS, en el período comprendido entre su gestación -década de los cincuenta- y posterior desarrollo, hasta el comienzo de una etapa -a finales de la década de los ochenta y principios de los noventa- de estancamiento. Para cumplir con este objetivo, se van a emplear diferentes enfoques dentro de la los estudios CTS, mostrando que es preciso utilizar una metodología combinada de los mismos para acometer el estudio de la evolución del diseño PWR (Fernández, Cuevas y Vergara, 2014).

El segundo objetivo será abrir *la caja negra* que supone el diseño original y las diferentes variantes del diseño PWR, con la doble intención de favorecer por un lado la comprensión de factores técnicos o ingenieriles de la aplicación de la tecnología nuclear como fuente de generación de energía eléctrica, como podrían ser el moderador, el refrigerante o la radiactividad, y por otro acercar estos factores técnicos habitualmente obviados en los estudios tradicionales CTS. Igualmente, esta apertura de la caja negra permitirá entender tanto la evolución técnica del sistema tecnológico que forma una central nuclear con un reactor con diseño PWR como la evolución de la sociedad donde este desarrollo tecnológico se implanta.

Por último, el tercer objetivo será identificar a lo largo de la historia del desarrollo del diseño de reactor nuclear PWR las relaciones establecidas entre los diferentes actores sociales y la tecnología, mostrando de esta manera que una metodología combinada de los principales enfoques de los estudios CTS es una herramienta más adecuada para afrontar el estudio de fenómenos tecnológicos complejos, tanto por sus características internas, como por la recepción social que puede tener. Este tercer objetivo permitirá identificar la existencia de diferentes etapas en las que la tecnología se desarrolló. En un primer momento veremos que el diseño del reactor PWR dependió fundamentalmente de factores técnicos y científicos, y en todo caso políticos y militares. Pero a continuación se produce un cambio, en una segunda etapa en la que se comienzan a producir relaciones de influencia bidireccional entre la tecnología y la sociedad. La implantación de las centrales nucleares y la creciente preocupación social por los riesgos que esto podía suponer dieron lugar cambios en el diseño del reactor PWR. Aparecieron en escena nuevos actores que generalmente no suelen tener tanta relevancia en las controversias tecnológica, como la literatura, el cine, las artes plásticas, que tuvieron una gran influencia en las diferentes configuraciones que el diseño del reactor PWR ha tenido a lo largo de su historia.

### **1.3 Estructura de la Tesis.**

La presente Tesis está estructurada de tal manera que se identifiquen los diferentes hitos en la evolución del diseño de reactor nuclear PWR. En el presente Capítulo 1 se han desarrollado los diferentes objetivos de la investigación. En el Capítulo 2 se desarrolla la metodología con la que se va a estudiar la evolución del diseño de reactor nuclear PWR. Además, se realiza un análisis de los diferentes enfoques utilizados tradicionalmente en los estudios CTS y se identifican los diferentes diseños de reactores nucleares desarrollados a lo largo de las diferentes generaciones. Tras la identificación de los distintos diseños de reactores nucleares se desarrollan los factores influyentes en la elección de este diseño como estudio de caso. Por último, se desarrolla el funcionamiento de un reactor nuclear con diseño PWR.

En el Capítulo 3 se analiza, desde una perspectiva determinista, el origen militar del diseño PWR, describiendo los primeros intentos gubernamentales de regulación y la primera central nuclear PWR del mundo, la central nuclear de *Shippingport*, en Estados Unidos. En el Capítulo 4, la evolución del diseño PWR en los Estados Unidos a lo largo de la década de los sesenta da lugar a una etapa donde los factores políticos y económicos son clave para entenderla.

Las centrales turnkey y el comienzo de una carrera entre diferentes suministradores del diseño PWR son muestras reales de que se trata de una etapa en la que para entender el diseño PWR es necesario emplear recursos de la perspectiva sistémica. El final de la década de los sesenta da paso al comienzo de una etapa de surgimiento de percepción de riesgo que da lugar a un movimiento social contrario a la tecnología. La crisis del petróleo de 1973 y la cohesión de la sociedad estadounidense hacia las guerras en las que el país se veía inmerso favoreció el surgimiento de un movimiento social a favor del medio ambiente y la creación de una serie de medidas políticas y legislativas que ayudasen a regular el desarrollo de la tecnología nuclear y del diseño PWR.

En el Capítulo 5 se desarrollan varios casos de referencia en la historia de la evolución del diseño PWR. Francia ha logrado un elevado nivel de autoabastecimiento eléctrico gracias al alto número de centrales nucleares que ha instalado en su país. La industria nuclear gala ha sido capaz de desarrollar numerosas variantes del diseño PWR. Ambos aspectos no se habrían conseguido sin una toma de decisiones orientadas al crecimiento económico y tecnológico del país. Tras la Segunda Guerra Mundial, Alemania, gracias al elevado conocimiento técnico y la dilatada experiencia de su industria pesada, fue capaz de implantar diferentes diseños de reactores nucleares en todo el país y posteriormente generar su propia variante del diseño PWR. Pero no todo son luces en el caso alemán, la adaptación del diseño estadounidense de *Babcock & Wilcox* al licenciamiento alemán y la reunificación de país tras la caída del muro de Berlín, generaron procesos de selección de las diferentes variantes de diseños de reactores nucleares.

A medio camino entre el caso de Francia, en la que los elementos principales que configuraron la adaptación del diseño del reactor PWR a razones económicas y decisiones de la élite política, y el estricto sistema de licenciamiento alemán, que comienza a tener en consideración la percepción social hacia la tecnología, se encuentra el caso español. España decide apostar por la energía nuclear como fuente de generación energética importando el diseño PWR de la estadounidense *Westinghouse*, junto con otras variantes de diseños de reactores nucleares, BWR y GCR. Esta decisión se toma en una etapa de apertura y grandes expectativas económicas tras años de represión. Las compañías eléctricas realizan numerosas propuestas de construcción de centrales nucleares. Una de estas centrales nucleares con diseño PWR solicitadas fue *Lemóniz*, en el País Vasco. Esta central se convierte en abanderada del movimiento social y cultural en contra de la tecnología, a favor de la protección del medio ambiente y los valores identitarios de la región. La entrada de la banda terrorista ETA y el comienzo de la etapa de transición hacia la democracia dieron lugar a una moratoria nuclear para todos los proyectos propuestos en España.

En el Capítulo 6 se analiza la etapa en la que los factores de participación social antes señalados adquirieron gran importancia e influyeron en el nuevo diseño del reactor. No todos los países implantaron la tecnología nuclear y el diseño PWR sin tener en cuenta la percepción social hacia la misma. Los casos de Suecia y Austria demuestran la posibilidad de diseñar mecanismos de participación ciudadana en la toma de decisiones tecnológicas. A diferencia de lo que habitualmente se puede pensar, la sociedad no influye exclusivamente en la tecnología cuando esta alcanza el éxito.

El accidente de la central nuclear estadounidense de *Three Mile Island*, en 1979, marca un punto de inflexión en el nivel de aceptación social hacia la tecnología y da paso a una etapa de reconsideración de la seguridad y disponibilidad de los diseños de reactores nucleares por parte de los diferentes actores involucrados. El accidente reflejó el fracaso de la tecnología PWR y dio paso a un intenso debate social gracias a la elevada influencia de los medios de comunicación y la cultura. Pero el accidente no reflejó únicamente el fracaso del diseño, también reflejó debilidades organizativas, operativas y de comunicación que debían ser erradicadas. Tras el accidente, la industria nuclear comenzó a trabajar en la mejora del diseño y de estos aspectos.

El caso del Reino Unido es el más destacado de construcción social del diseño PWR. Como si de un sistema técnico tan sencillo como una bicicleta se tratase, el gobierno británico planteó la investigación pública como un mecanismo de comunicación entre los diferentes actores influidos por la construcción de la central nuclear de *Sizewell B*, en el cual todos podían debatir sobre las diferentes posibilidades técnicas del diseño, así como el riesgo, las responsabilidades y las consecuencias a largo plazo de la construcción de esta central nuclear. A diferencia de lo que inicialmente se puede pensar, este mecanismo de investigación pública sirvió como medio para llegar a la clausura de la controversia, pero no favoreció la construcción de nuevos reactores PWR en los años posteriores.

No sólo Estados Unidos y Europa han sido capaces de desarrollar diferentes variantes del diseño del reactor nuclear PWR. En el Capítulo 7 se desarrolla la implantación y evolución del diseño PWR en otros países. Rusia consigue desarrollar su propia variante de diseño PWR, el diseño VVER, gracias al esfuerzo de un gobierno comunista que fomenta el crecimiento económico y tecnológico del país. Y lo hace sin la interacción de otras grandes potencias mundiales de la industria nuclear. Sin embargo, esta percepción de aislamiento e independencia del diseño VVER se rompe en la construcción de la central nuclear de sueca *Loviisa*, donde las industrias nucleares de Rusia, Estados Unidos y Alemania colaboraron para mejorar la seguridad del diseño.

Irán se convierte en el primer país de Oriente Medio en poner en operación una central nuclear y lo logra construyendo una instalación única en el mundo, mezcla de la tecnología alemana y rusa. Los años de inestabilidad política interna, manifestados en la caída del último Sha de Persia, la posterior revolución blanca, la entrada en el poder político de los ayatola y la guerra con Irak, así como los diferentes aspectos técnicos derivados de la adaptación del diseño alemán KWU al diseño ruso VVER en un entorno con unas condiciones climáticas, sociales y técnicas muy diferentes a las habituales imposibilitaron la puesta en marcha de la central nuclear de *Bushehr*.

Al analizar el caso de implantación y desarrollo del diseño PWR en Japón hay que tener en cuenta la tensa relación que ha existido a lo largo de la historia entre el país asiático y la energía nuclear. Ningún país en el mundo ha conocido tan de cerca las consecuencias devastadoras del uso destructivo de la energía nuclear como Japón tras el lanzamiento de las bombas atómicas en *Hiroshima* y *Nagasaki* en el verano de 1945. Actualmente, esa controversia y la tensa relación de la sociedad nipona con la energía nuclear siguen vigentes, aunque con diferentes matices, tras el desafortunado accidente de la central nuclear de *Fukushima-Daiichi* en el año 2011.

Durante la década de los sesenta, con un fuerte impulso hacia el crecimiento económico y tecnológico el país fue capaz de implantar varios diseños de reactores nucleares: *Gas Cooled Reactor* (GCR), *Boiling Water Reactor* (BWR) y *Pressurized Water Reactor* (PWR), gracias a acuerdos iniciales con compañías internacionales. La industria nuclear japonesa consiguió desarrollar sus propias variantes de los diseños de reactores BWR y PWR. En la actualidad, la energía nuclear sigue siendo muy importante en el mix energético de la isla. Las centrales nucleares PWR construidas en el país alcanzan un porcentaje destacable con respecto al resto de diseños construidos, pero no llega a situarse como diseño de referencia como en Estados Unidos o Francia.

Por último en esta retrospectiva internacional, la situación del diseño PWR en China y Corea del Sur muestra cómo el diseño PWR ha evolucionado y sigue haciéndolo en base a criterios técnicos como la seguridad y la disponibilidad. Ambos países consiguieron implantar inicialmente el diseño PWR a través de varios acuerdos con compañías estadounidenses y francesas pero después han sido capaces de desarrollar su propia industria nuclear favoreciendo la entrada en el mercado de sus propias variantes del diseño PWR. Sin embargo, la forma en la que la tecnología se ha implantado en ambos países ha sido muy diferente. Corea del Sur apostó por una estrategia de implantación progresiva, en función de la demanda y sin llegar a saturar el mercado, mientras que China ha mantenido una estrategia de implantación de la tecnología masiva a lo largo y ancho de su territorio, a tenor del fuerte crecimiento económico del país y la elevada demanda eléctrica del país más poblado del mundo. Esta estrategia de implantación masiva de la tecnología, inicialmente a través de acuerdos con grandes potencias tecnológicas y posteriormente a través del desarrollo de sus propias capacidades ha sido un patrón a la hora de implantar en China tecnologías e industrias con un elevado nivel de desarrollo tecnológico<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Hay que tener en cuenta que la posibilidad de una controversia social en China resulta imposible dadas las condiciones a las que se someten a los disidentes de la estratégica del poder central del partido.



Para concluir esta investigación en el Capítulo 8 se analiza la evolución del diseño PWR y se estudia la situación actual del diseño en el mundo. En la primera parte de este Capítulo se discuten los diferentes modelos de evolución del diseño PWR, así como la validez de la perspectiva combinada de los enfoques tradicionales en los estudios CTS. También, desde una perspectiva constructivista, se realiza un análisis de redes de la evolución del diseño PWR a lo largo de la *Generación II* de los reactores nucleares. Este análisis permite identificar claramente la influencia de las diferentes variantes técnicas, así como las relaciones entre los diferentes casos y los actores sociales que pudieron influir en su evolución. Además, se analiza cuantitativamente el grado de implantación de las diferentes variantes del diseño PWR así como las diferentes estrategias nacionales a la hora de implantar esta tecnología.

En lo que respecta al estudio de la situación actual del diseño en el mundo, resulta interesante analizar el grado de implantación en el que se encuentra el diseño PWR en comparación con otros reactores, analizando el número de reactores nucleares operativos hoy en día en el mundo. También permite identificar el grado de implantación del diseño PWR el análisis de los años de operación de las centrales nucleares que cuentan con este diseño, así como las perspectivas de futuro, en función del número de reactores en fase de construcción. Los países de referencia durante el pasado siglo XX dejan paso a las economías emergentes en el desarrollo del diseño PWR. Países como China, Rusia o la India mantienen programas nucleares ambiciosos.

Por último, en el Capítulo 9 se analizarán en forma de conclusiones las hipótesis planteadas a lo largo de este trabajo, entre ellas la validez de los enfoques tradicionales de la historia de la tecnología y la necesidad de utilizarlos indistintamente a la hora de acometer el estudio de un desarrollo tecnológico, así como las futuras líneas de investigación.

## **CAPÍTULO 2: LA SOCIOLOGÍA DE LA TECNOLOGÍA COMO HERRAMIENTA PARA ENTENDER LA EVOLUCIÓN DEL DISEÑO PWR.**

### **2.1 La Sociología de la Tecnología: la construcción de un nuevo paradigma tecnológico.**

Dentro de los estudios CTS es necesario adentrarse en la Sociología de la Tecnología para establecer el marco de referencia que permita estudiar el origen y la evolución de las diferentes variantes del diseño de reactor PWR. Para acometer la tarea de comprender la Sociología de la Tecnología y los diferentes enfoques que la conforman y con ello, se tomará como referencia el trabajo de Eduardo Aibar (1996).

Según este autor la Sociología de la Tecnología es un campo de investigación relativamente nuevo, dinámico y prolífico, e identifica su origen en la célebre obra *The social construction of technological systems, new directions in the sociology and history of technology*, editada por los sociólogos Wiebe E. Bijker y Trevor Pinch y el historiador Thomas Hughes (Bijker *et al*, 1987), resultado del primer encuentro internacional de investigadores en la materia celebrado en la Universidad de Twente (Países Bajos), en julio de 1985.

Aunque el propio autor plantea la posibilidad de que el origen de la tecnología sea anterior, con la obra del sociólogo norteamericano William Ogburn *Social change with respect to culture and original nature* (Ogburn, 1922), en donde intenta medir el cambio cultural a través de un modelo evolutivo del desarrollo tecnológico, y utilizar el concepto de “retraso cultural” para referirse a la transformación lenta que tiene lugar en los valores, los hábitos y las estructuras sociales tras las innovaciones tecnológicas. Se pueden distinguir tres enfoques en la Sociología de la Tecnología: (i) el enfoque de sistemas; (ii) el enfoque del Actor-Red; y (iii) el enfoque constructivista social.

Posteriormente, estos tres enfoques fueron agrupados bajo el nombre de “constructivismo social” o “constructivismo” a secas. Este intento por fundar y estructurar la Sociología de la Tecnología se vio en parte mermado por la existencia de una comprensión “determinista” de la tecnología.

Según Aibar (1996) para los defensores del determinismo tecnológico la tecnología es un proceso autónomo al margen de la intervención humana. Es la tecnología quien incide inevitablemente y de forma directa en la sociedad mientras que resulta imposible que la sociedad lo pueda hacer en la tecnología. También para los seguidores del determinismo tecnológico, el cambio social, entendido «por Nisbet como una sucesión de diferencias en el tiempo en una identidad persistente, cuando un impacto exterior de la suficiente importancia incide sobre una determinada estructura social provocando en ella una crisis» (García, 1981, p. 59) está determinado por el cambio tecnológico. Existe por tanto una clara relación causal y también jerárquica en el proceso, ya que los cambios tecnológicos se considerarían más importantes que los cambios sociales. Además de Aibar (1996), otros autores han identificado la similitud entre la evolución de este enfoque y el “modelo lineal” de desarrollo tecnológico (Tabares y Correa, 2014), en relación directa con el modelo lineal de innovación (Pinch y Bijker, 1987, p. 23): (i) conocimiento científico; (ii) aplicación del mismo a un problema práctico; (iii) innovación tecnológica, y (iv) difusión y uso.

Si se aplica el modelo determinista a la evolución del diseño del reactor nuclear PWR tendríamos las siguientes fases: (i) las investigaciones realizadas por científicos como Marie Curie o Henri Becquerel; (ii) la aplicación técnica por parte de Enrico Fermi de la radiactividad del uranio para conseguir la primera reacción de fisión en cadena; (iii) la construcción y posterior operación del primer reactor nuclear –con diseño PWR-, en la central de Shippingport; y (iv) el desarrollo y crecimiento de las diferentes variantes del diseño PWR, hasta la estandarización de la tecnología.

Sin embargo, hay varios factores que plantean ciertas dudas sobre la validez de un análisis determinista a la hora de estudiar el desarrollo tecnológico actual en general y del diseño PWR en particular, estos son: (i) la unidireccionalidad entre las diferentes etapas; (ii) la inexistencia de relación entre etapas no consecutivas; (iii) la limitación del modelo a la hora de estudiar momentos trascendentales a lo largo de la evolución del desarrollo tecnológico; (iv) la inexistencia de relación entre el desarrollo tecnológico y otros factores, ya que analiza la tecnología como un elemento externo e independiente a la interacción de actores sociales; y (v) la ausencia de un estudio acerca del origen del conocimiento y de las técnicas que dan sentido al uso y a la creación del artefacto. Este enfoque puede ser válido para estudiar parte de la evolución técnica del diseño PWR, pero resulta limitado como marco de análisis global.

Abandonando la perspectiva clásica y puramente técnica del enfoque determinista de la tecnología, parece razonable utilizar enfoques más próximos al desarrollo tecnológico en el que vivimos, donde, como se comentaba anteriormente, el cambio tecnológico y social se produce en períodos de tiempo cortos; y en los que a veces es difícil distinguir dónde está el origen del cambio, si en el ámbito social o en la propia tecnología. Este planteamiento es aún más palpable en el caso del desarrollo energético, donde el conjunto energía, política, economía y sociedad es indivisible.

Del mismo modo, dentro de la dimensión social del nuevo desarrollo tecnológico, es necesario estudiar la influencia de factores de naturaleza muy dispar, tales como factores políticos, culturales, organizativos o económicos. Como ya se ha comentado, los nuevos enfoques a utilizar dentro de la Sociología de la Tecnología serían: (i) el enfoque de sistemas; (ii) la teoría del actor-red; y (iii) el modelo constructivista social (Aibar, 1996).

El enfoque de sistemas, (Aibar, 1996; Tabares y Correa, 2014) parece tener su origen en el trabajo de Thomas Hughes, al combinar la perspectiva histórica y sociológica. Con él el estudio de la historia de la tecnología sufrió un cambio de perspectiva. A diferencia de la metodología tradicional utilizada en la historia de la tecnología, Hughes elabora en uno de los trabajos pioneros en el nuevo estudio sociohistórico de la tecnología un primer acercamiento hacia una teoría que permite establecer una serie de valiosas generalizaciones sobre el desarrollo de la tecnología y que abre las puertas al tratamiento sociológico completo de los sistemas tecnológicos. *Networks of Power* (Hughes, 1983), traza con gran detalle y profundidad el crecimiento de la industria de producción y suministro de electricidad en países tan diferentes como Estados Unidos y Alemania en un período crucial en su crecimiento, entre los años 1880 y 1930 (Aibar, 1996, p. 148-149).

El enfoque de sistemas trata de forma meticulosa y exhaustiva las cuestiones técnicas, económicas y políticas. Introduce una serie de metáforas para ordenar y tratar el rico material histórico reunido. Una de ellas es la noción de sistema sociotécnico, que está constituido por partes o componentes diversos interconectados mediante una red: artefactos físicos (generadores, transformadores, motores, líneas eléctricas, etc.), instituciones sociales (empresas, entidades financieras, etc.), componentes materiales (libros, artículos científicos, etc.), dispositivos legales (leyes, patentes, etc.), recursos humanos, etc., orientados a la resolución de problemas. Los componentes de un sistema técnico interconectados entre sí se controlan normalmente de forma centralizada y normalmente los límites del sistema están determinados por el grado y eficacia de dicho control. Una habilidad del *constructor de sistemas* es la de establecer la unidad. Los controles se ejercen para optimizar el funcionamiento del sistema. Como los componentes están relacionados mediante una red de interconexiones, el estado o actividad de un componente influye en el estado o actividad de otros componentes del sistema.

«Este autor hace énfasis en estudiar los contenidos técnicos de los sistemas tecnológicos, la dinámica de los componentes, su evolución o retraso, las amenazas o factores de crecimiento del sistema por las características de sus componentes» (Tabares y Correa, 2014, p. 138). Hughes es el referente a la hora de desarrollar el anterior objetivo sobre la apertura de forma clara y concisa de la caja negra que constituyen la tecnología y los conocimientos técnicos y científicos asociados al diseño de reactor nuclear PWR.

Según Aibar (1996), Hughes se resiste a la tesis del determinismo tecnológico y sugiere que el *momentum tecnológico* de los sistemas sociotécnicos sólidamente establecidos surge a partir de la inversión en recursos económicos, habilidades prácticas y formas organizativas. Por ello no puede entenderse la evolución de la tecnología como un proceso natural necesario. Las tecnologías existentes generan una serie de núcleos cerrados en los que se mantienen cautivos una multitud de intereses políticos y económicos, hasta que los recursos invertidos se agotan. Se opone a la distinción tradicional entre el contenido técnico del sistema y su contexto social (organizativo, político, etc.). Aquellos factores que normalmente se etiquetan como sociales u organizativos forman parte, en muchos casos, del núcleo del sistema y constituyen componentes esenciales para su funcionamiento. El concepto de entorno debe restringirse a aquellos elementos (tanto técnicos como sociales) que escapan al control del sistema.

Volviendo al caso de la evolución de diseño del PWR, el enfoque sistémico permitiría incorporar como elementos clave de su desarrollo elementos tales como programas políticos (*Átomos para la Paz*), programas nacionales de expansión de la energía nuclear, la creación de leyes que favoreciesen la construcción de centrales nucleares en las zonas más despobladas de un país e incluso la presión normativa y legislativa, con el nacimiento y posterior crecimiento de organismos reguladores.

Del mismo modo, el diseño PWR evolucionaría influido también por factores económicos, como por ejemplo: (i) la primera etapa de comercialización del diseño y la estrategia empresarial de las centrales “turnkey” (contratos llave en mano); (ii) la influencia que el concepto de rentabilidad tiene en cualquier tecnología y que supuso los primeros pasos hacia la estandarización de la tecnología; (iii) el comienzo de una carrera comercial entre diferentes suministradores por implementar su variante del diseño PWR a principios de la década de los sesenta; y (iv) la crisis del petróleo de 1973 inclusive, ya que bajo el argumento de una posible escasez en el suministro energético de los Estados Unidos se justificó la necesidad de la energía nuclear como fuente de generación de energía eléctrica y por ende del diseño de reactor nuclear PWR.

Igualmente, este enfoque permitiría entender el sistema sociotécnico, deshilachando su red, encontrando su *momentum*, sus controles y sus límites, pero sin dejar de analizar cómo factores políticos y económicos influían en el estado de los diferentes componentes del sistema sociotécnico, tanto los componentes técnicos puros -bomba, vasija, etc.-, como los componentes humanos -organización, cultura, conocimiento-, así como otros componentes inmateriales -la dinámica del sistema, los factores de retraso y crecimiento, etc. Sin embargo, al igual que en el caso del enfoque determinista, el sistémico demostraría cierta debilidad a la hora de estudiar la influencia social en estos componentes técnicos y humanos del sistema sociotécnico.

Otra concepción teórica dentro de la sociología de la técnica es la teoría propuesta a finales del siglo XX del Actor-Red. Los autores de referencia de esta perspectiva proponen el concepto clave de “red de actores” que aglutina entidades de diferente naturaleza. El punto de partida de este enfoque es el análisis de los diferentes procesos científicos y tecnológicos que tienen lugar hasta elaborar el artefacto. Estos procesos se estudian a través de los diferentes nodos que integran aspectos tecnológicos, legales, organizativos, políticos, etc.

Tomando como ejemplo el estudio realizado por Michell Callon, uno de estos autores de referencia en la teoría del Actor-Red, sobre el proyecto frustrado de diseño de un vehículo eléctrico por parte de la compañía francesa EDF, *Électricité de France*, en los años setenta (Aibar, 1996; Valderrama, 2004) se podía determinar que el diseño PWR constituye un actor-mundo, en el que al igual que en el proyecto de vehículo eléctrico se aglutinan tanto actores humanos (ingenieros, consumidores, ministerios, organismos reguladores y movimientos sociales) como actores no humanos (neutrones, moderador, alternador, tuberías, etc.).

Pero todas estas entidades no se aglutinan aleatoriamente, lo hacen de forma estructurada en función de los enlaces o relaciones existentes entre ellos formando una red, dentro de la cual se identifican nodos, que a su vez pueden constituir nuevas redes. Es decir, dentro de la teoría actor-mundo del diseño PWR, se definiría una red de actores de distinta naturaleza, en la que aparecería un nodo de componentes del circuito secundario, relacionado con otros como, por ejemplo, componentes del circuito primario, operadores de la central, organismos reguladores, opositores, vecinos de las poblaciones cercanas al emplazamiento, etc.

A su vez este estaría formado por una red constituida por todos y cada uno de los componentes que constituyen el secundario -turbina, bomba, excitatriz, enfriadores, vapor, etc.-. Pero para pasar de un actor-mundo y acabar constituyendo el actor-red faltaría por establecer los diferentes procesos de traducción: (i) hablar por; (ii) ser indispensable; y (iii) desplazar. Es decir, el diseño PWR *habla* -también se podía decir que representa a- en nombre de todos los diseños de reactores nucleares, de sus suministradores, de sus ingenieros, de los organismos reguladores, los explotadores comerciales, etc.



Por otro lado *se hace indispensable* mostrándose como la solución al problema de la escasez de recursos energéticos y a los efectos del cambio climático. Y por último, *desplaza* multitud de información y de comunicaciones, así como recursos humanos y económicos, todo lo cual aporta valor en su característica de tecnología estratégica.

El tercero de los enfoques dentro de la Sociología de la Tecnología (Aibar, 1996) es el constructivismo social. Este enfoque fue desarrollado por Pinch y Bijker en los años 80, y establece que la tecnología, en toda su extensión y profundidad - incluyendo los diseños técnicos o los criterios de eficacia- puede entenderse como el resultado de complejos procesos de construcción social.

La perspectiva constructivista se desmarca tanto de los enfoques que se esfuerzan por situar la tecnología en su “contexto social” como de aquellos que identifican una “dimensión social” de la tecnología. En contraposición a este enfoque, el historiador británico Arnold Pacey (Fleck, 2000, p. 251-253) identifica tres dimensiones de la práctica tecnológica: (i) el aspecto técnico; (ii) el aspecto cultural; y (iii) el aspecto organizacional; donde la primera de estas dimensiones, la puramente técnica, está totalmente alejada de las otras dos dimensiones, ya que en su opinión, ciertos aspectos tecnológicos están totalmente desvinculados de los aspectos culturales y organizacionales, en la posición constructivista, en cambio, no existe ningún núcleo “puramente técnico” en la tecnología.

La tecnología es completamente social. Pacey trataba de poner de un lado las razones “técnicas” y, de otro, las “sociales” (culturales, políticas o económicas), mientras que el constructivismo enfatiza que nos enfrentamos más que a un binomio tecnología-sociedad, a tecnologías y relaciones sociales, en plural. «Tanto las relaciones sociales como las tecnológicas a menudo cambian simultáneamente» (Aibar, 1996, p. 160). Desde el constructivismo es necesario estudiar el binomio tecnología-sociedad sin situar en un lugar

diferente al núcleo puramente técnico, puesto que estará ligado a valores culturales, sociales, organizacionales, etc. El enfoque *constructivista social* sostiene la imposibilidad de hacer distinciones *a priori* entre lo técnico, lo social y lo científico y por tanto, todas las relaciones se consideran ahora técnicas y, a la vez, sociales. No encontramos relaciones técnicas “puras” ni relaciones sociales “puras”. Lo técnico está socialmente construido y lo social está técnicamente construido; cualquier entramado estable permanece unido tanto por medios sociales como técnicos (Aibar, 1996, p. 160-161). Aplicando esta perspectiva constructivista al estudio de la evolución del diseño PWR, se entenderán aquellos casos en los que ciertos grupos sociales han dado lugar a cambios en la dimensión técnica, y al revés, variantes técnicas en el diseño que han influido de algún modo en la dimensión social.

En la sociedad en la que vivimos (García, 1981), ciencia y tecnología se encuentran entrelazadas íntimamente con la vida social y con el cambio social. Ambas ejercen una gran influencia en los principales desarrollos de la sociedad, pero a su vez dependen para su desarrollo del orden social del que forman parte. La sociedad puede alentar o de lo contrario coartar el desarrollo de las nuevas tecnologías. Tanto es así, que el posible orden social y económico que existe en un entorno, tiene mucha influencia en las posibilidades de las innovaciones tecnológicas en una dirección determinada, y de otro lado, las posibles innovaciones tecnológicas pueden influir en el orden social y económico.

Ejemplos de estas relaciones serían los cambios en los sistemas de seguridad del diseño por la aparición de un debate social sobre su seguridad o por el fracaso de un diseño anterior, la creación de una comisión de expertos que analice la seguridad del diseño tras el accidente de *Three Mile Island*, y por otro lado, cómo el diseño de un canal, embalse, torres de refrigeración, etc. - necesarios para refrigerar la central- altera los valores ecológicos y recreacionales de la población cercana al emplazamiento.

## **2.2 Metodología de la investigación.**

Dejando a un lado la controversia social alrededor de la energía nuclear en la segunda mitad del pasado siglo, si se tienen en cuenta factores técnicos, políticos, militares, estratégicos, económicos, etc., aparece una estructura que permita estudiar la evolución del desarrollo tecnológico del diseño PWR como tecnología de generación de energía eléctrica desde la perspectiva amplia de la Sociología de la Tecnología.

El estudio de la evolución técnica del diseño PWR en el período comprendido entre su gestación, en las décadas de los cuarenta y cincuenta, hasta el comienzo de una etapa de madurez en su implantación, en la década de los ochenta, da lugar a las siguientes preguntas: (i) ¿es posible identificar elementos sociales influyentes en la evolución del diseño y la construcción del reactor nuclear PWR?; (ii) ¿es suficiente un único enfoque de los desarrollados dentro de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología o más bien será necesario una combinación de ellos dependiendo de la etapa histórica que se esté estudiando? Es decir (iii) ¿se pueden aplicar varios de los enfoques antes mencionados para estudiar la evolución del desarrollo tecnológico del diseño PWR y probablemente para estudiar la evolución de cualquier desarrollo tecnológico? Por último (iv) ¿es posible establecer un marco de referencia donde englobar estos enfoques y que evolucionen en paralelo con el desarrollo tecnológico del diseño PWR?

La respuesta al primer interrogante se verá a lo largo de este trabajo. Se identificarán diversos elementos sociales que influyeron en el diseño técnico del reactor. Por otro lado, para comprender el desarrollo del diseño del PWR puede ser preferible emplear un esquema mixto, combinando diferentes etapas y enfoques, en el que se muestre cómo en un período inicial el desarrollo tecnológico evolucionó de forma autónoma y alejado de la influencia social (*planteamiento determinista*).

Posteriormente se pasaría a un momento en donde el desarrollo evolucionó influido fundamentalmente por factores políticos y económicos (*enfoque sistémico*), para pasar finalmente a un período en el que diversos grupos sociales relevantes influyeron en su desarrollo, encontrando problemas y aceptando soluciones, hasta desarrollar diferentes mecanismos de estabilización del artefacto técnico (*constructivismo social*). A la hora de estudiar un momento concreto de la evolución de una tecnológica puede resultar difícil hacerlo con un único enfoque. El constructivismo social puede ser el enfoque más adecuado para estudiar la influencia social sobre el desarrollo tecnológico, pero cuando estamos tratando acerca de sistemas técnicos complejos, como es el caso del diseño del PWR, necesitaremos también un análisis que tenga en cuenta elementos “internos”, como el que nos ofrece el enfoque sistémico.

En los últimos veinte años (Benavides, 2004) se ha intentado analizar el cambio tecnológico desde diferentes perspectivas, siendo la más importante la evolutiva, desde la cual se ha desarrollado el concepto de innovación tecnológica para entender el cambio tecnológico. Es importante destacar que el análisis evolutivo ha permitido entender mejor el proceso de innovación tecnológica, sin embargo, no permite explicar satisfactoriamente los cambios que se han dado en el proceso de innovación tecnológica. En esta Tesis se va a emplear una perspectiva “combinada” (Figura 2.1) de los principales enfoques de la Sociología de la Tecnología para analizar el cambio tecnológico del diseño PWR en diferentes países y momentos históricos, donde la influencia de los diferentes actores y factores varía con el tiempo.

En la Figura 2.1 se muestra la evolución histórica del número de reactores con diseño PWR a nivel mundial, similar a la gráfica de evolución de la capacidad de generación de los reactores nucleares operativos en el mundo (Echávarri, 2007, p. 90). En esta evolución se pueden marcar tres etapas bien diferenciadas: (i) inicio; (ii) crecimiento; y (iii) madurez.

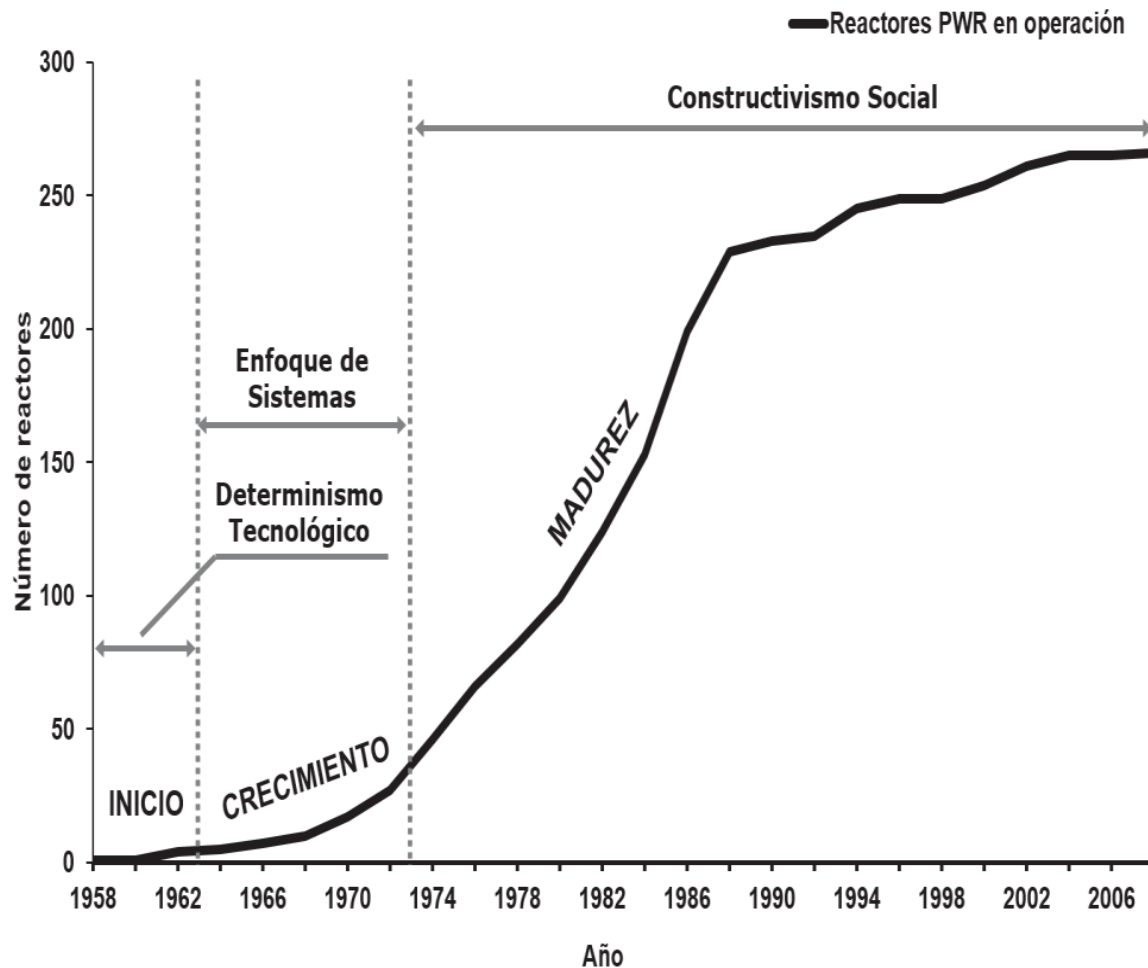


Figura 2.1 Perspectiva “combinada” de la evolución histórica del diseño de reactor nuclear PWR.

La primera etapa, “Etapa de Inicio”, transcurrió desde los primeros intentos de desarrollo hasta aproximadamente el año 1962. En ella se produjo una evolución autónoma de la tecnología nuclear, sin que se puedan encontrar elementos de influencia de la sociedad, basada únicamente en el conocimiento científico originado tras el proyecto Manhattan. Esta etapa de inicio, que podría entenderse empleando una perspectiva determinista, como proceso de desarrollo autónomo de la tecnología, contó temporalmente con la ayuda del presidente estadounidense Eisenhower. Uno de los momentos fundamentales de ese apoyo se reflejó en diciembre de 1953 con el patrocinio que el Gobierno de Estados Unidos mostró al desarrollo de la energía nuclear con fines pacíficos en el discurso de su presidente “Átomos para la Paz”.

«Eisenhower dirigió su discurso tanto al público estadounidense, como al público internacional, con la intención de disipar las dudas respecto a la energía nuclear y de mostrar al mundo la cara amable de Estados Unidos tras los brutales bombardeos de Hiroshima y Nagasaki, presentando una imagen democrática y abierta de su país. Fue su exitosa disociación entre el uso bélico y el uso pacífico de la energía nuclear» (Casado, 2010, p. 114).

Otro momento clave en esta etapa tuvo lugar en 1958, con el comienzo de la operación comercial de la central nuclear de Shippingport, cuyo reactor nuclear con diseño PWR de Westinghouse -con ciertas modificaciones técnicas que le permitía producir torio- se convirtió en el origen de la industria nuclear a nivel mundial. La primera etapa en la evolución técnica del diseño PWR habría concluido en 1962 con el surgimiento de las centrales *turnkey*, en las que los principales suministradores de diseños de reactores nucleares: Westinghouse -con el diseño PWR- y *General Electric* -con el diseño BWR, del inglés *Boiling Water Reactor*- asumirían, bajo las condiciones de un contrato llave en mano, toda la responsabilidad en el diseño, construcción y pruebas, para al finalizar simplemente entregar la llave a la empresa explotadora.

En esta segunda etapa de desarrollo del diseño PWR se vio afectada por factores económicos y, en menor medida, por factores políticos y legislativos (lo que en la Figura 2.1 se denomina “Etapa de Crecimiento”). En el período comprendido entre 1962 y 1966, ambas compañías construyeron trece reactores nucleares, con unas pérdidas económicas de más de mil millones de dólares. En junio de 1966, *General Electric* anunció el fin de su programa de contratos llave en mano y después de esa fecha ningún contrato se concretó bajo esas condiciones. Tras este comienzo desastroso desde el punto de vista económico, por extraño que parezca, se produjo un crecimiento exponencial en el número de contratos comerciales, principalmente basándose en las perspectivas de crecimiento de la demanda eléctrica y la rentabilidad de los diseños.

En esta segunda “Etapa de Crecimiento” se desarrollaron los principales programas nucleares de los países de referencia en la industria nuclear, como son los casos de Francia y Alemania, y comenzaron a aparecer variantes nacionales del diseño original de reactor PWR de Westinghouse, por un lado con el objetivo de poder reducir los costes fijos del diseño y la construcción y así ofrecer el diseño más rentable ante un mercado en expansión, y por otro con el fin de desarrollar un diseño nacional de reactor PWR que permitiese lograr la independencia tecnológica en la fabricación de reactores con este diseño, o incluso generarse un cambio de dependencia, pasando los antiguos países exportadores a ser dependientes del nuevo diseño. Otros factores, como los legislativos y los regulativos, comenzaron a tener influencia en el desarrollo del diseño PWR, al tratar de acotar el riesgo y la incertidumbre asociados con esta tecnología.

Ejemplo claro de esta influencia de los factores legislativos tuvo lugar en 1969, con la aprobación por parte del congreso estadounidense de la Ley de Política Ambiental Nacional, *The US National Environment Policy Act*, (conocida por su acrónimo en inglés NEPA), que exigía a los principales proyectos federales la preparación de diferentes informes en relación al impacto que los mismos podían provocar en la sociedad y el medio ambiente. Japón favoreció la construcción de centrales nucleares en zonas rurales con la imposición de un impuesto al consumo eléctrico soportado por las zonas más pobladas.

En la década de los setenta la percepción del riesgo e incertidumbre dieron lugar a una reacción de la sociedad, preocupada por el desarrollo de la energía nuclear, gestándose los primeros movimientos a favor de la protección del medio ambiente y en contra del desarrollo de la tecnología nuclear. El debate se intensificó notablemente en países inicialmente a favor como Estados Unidos, Suecia o Alemania. Esto supone el fin de esta segunda etapa y el inicio de la tercera (“Etapa de Madurez” en la Figura 2.1). Aun así, el punto de inflexión entre ambas etapas ocurrió realmente en 1973, con la crisis del Petróleo.

Los autores Alan M. Herbest y George M. Hopley, en su libro *Nuclear Energy Now: why the Time Has Come for the World's Most Misunderstood Energy Source* (Herbest y Hopley, 2007) analizan cómo hasta ese momento la sociedad no estaba especialmente preocupada por el suministro energético, debido al estancamiento del precio del petróleo y a que el suministro del mismo era abundante. No obstante, esta actitud cambió debido al embargo del petróleo árabe hacia los Estados Unidos como resultado de la guerra de Yom Kippur en octubre de 1973.

La Organización de Países Exportadores de Petróleo Árabes, acrónimo OAPEC, decidió unilateralmente limitar las exportaciones de petróleo en un 25% y elevar los precios en un 17%, dejando el precio del barril de petróleo en 3,65 dólares. La decisión originó la aparición de una conciencia social de la dependencia energética del país hacia el petróleo, pero también generó una reacción por parte del gobierno estadounidense, que propuso dos medidas para reducir el consumo energético: (i) limitar la velocidad máxima en carreteras a 55 millas/hora; y (ii) extender el horario de verano. Estas medidas impopulares aumentaron el respaldo social a los esfuerzos iniciados por el gobierno de los Estados Unidos para desarrollar la energía nuclear como una solución factible para conseguir la independencia energética del país.

En esta segunda “Etapa de Crecimiento” puede identificarse la influencia de diversos factores: *factores económicos*, -entre otros, una elevada expansión del mercado potencial de los reactores, la aparición de un complicado entramado de diseños y empresas competidoras- y *factores políticos*, bajo la consideración realizada por el Gobierno de los Estados Unidos de que la energía nuclear era la solución al problema de la dependencia energética. Estos apoyos recibidos por los factores económicos y políticos favorecieron la implantación de los diferentes diseños de reactores nucleares, en especial del diseño PWR.



A continuación se producen ciertos cambios que dan lugar a lo que aquí se ha identificado con una tercera “Etapa de Madurez”, en la que la sociedad, influida por las medidas negativas tomadas por el gobierno de EE.UU., así como por el encarecimiento y escasez de los recursos energéticos tradicionales, comienza a preocuparse tanto por la responsabilidad civil derivada de los desarrollos tecnológicos y la protección del medio ambiente como por la dependencia energética. Son años en los que la tecnología nuclear se ve afectada por intereses similares a los de la etapa anterior -salvo el militar- y en los que diversos actores sociales comenzaron a influir y a verse influidos por la tecnología. Es la etapa de expansión de la política regulatoria sobre energía nuclear, en la que comienza a alcanzarse cierta estabilidad en el diseño, en la que aparecen movimientos sociales antinucleares, en la que la sociedad desarrolla una percepción de los riesgos que supone la energía nuclear y en la que los medios de comunicación comienzan a debatir el tema nuclear.

En esta etapa, que se entiende mejor con los elementos aportados por el modelo constructivista, tienen lugar momentos clave en la evolución técnica del diseño PWR, entre los cuales destacan: (i) el accidente de *Three Mile Island* en 1979, que desencadena un aumento exponencial de la percepción social del riesgo y la incertidumbre hacia la tecnología, conduciendo no sólo hacia el rechazo social sino también hacia un aumento tanto del debate nuclear en los medios de comunicación como de la presión regulatoria hacia la tecnología. Todos estos factores, se tradujeron en numerosas y exigentes modificaciones técnicas en el diseño original de *Three Mile Island*, de *Combustion Engineering* como consecuencia del aumento de la presión regulatoria sobre el diseño; (ii) el desarrollo de la industria nuclear Alemana y el origen del diseño *Konvoi*, por parte de la compañía *Kraftwerk Union*; (iii) el diseño y posterior investigación pública del diseño británico de reactor PWR, construido en la central nuclear de *Sizewell B*, un ejemplo no solo de democratización en la toma de decisiones de índole tecnológica sino también de construcción social de la tecnología; (iv)

el rechazo social hacia la construcción de la central nuclear de Lemóniz, en España, que junto con la incorporación de otros actores como la acción terrorista de ETA conllevaron en la década de los ochenta el cierre de la central y la moratoria nuclear en el país. En este caso, la influencia social durante todo el proceso no se reflejó en el diseño, sino en el fracaso de la tecnología antes de su puesta en operación; (v) la revolución islámica de 1975 en Irán, que irrumpió y paralizó la construcción de la central nuclear de *Bushehr*, diseñado por la empresa *Kraftwerk Union* (KWU), y que tras el cese de la revolución se retomó usando como referencia un diseño ruso, generando una amalgama tecnológica inigualable en el mundo; y (vi) la cooperación internacional en la construcción de la central nuclear finlandesa de *Loviisa* en la década de los setenta.

## **2.3 Estado del arte.**

### ***2.3.1 Historia de la Tecnología.***

Uno de los autores de referencia en el estudio de la historia de la tecnología y la ingeniería es Henry Petroski, que analiza desde el artefacto más simple hasta los grandes diseños de ingeniería estructural proyectados a lo largo de la historia. En el caso del artefacto más sencillo, en “The Evolution of Useful Things” (Petroski, 1994) estudia la evolución histórica del clip, planteándose en su inicio el interrogante sobre por dónde empezar la historia de algo tan común en su forma y a la vez tan complejo en sus asociaciones. A esta pregunta responde que recoger la historia del artefacto fuera del contexto histórico social y cultural produce una maraña de narraciones poco rigurosas. Esta afirmación, próxima al enfoque determinista de la tecnología, evidencia la separación de la evolución técnica del artefacto de cualquier factor cultural o social y se ve respaldada también por la necesidad, ya que el clip nació con la intención de agrupar diferentes hojas. Resulta sorprendente que un artefacto tan sencillo, pequeño y utilizado de forma tan generalizada dé lugar a una historia compleja, en la que además de la evolución de las patentes y máquinas para su fabricación es preciso estudiar las diferentes variantes técnicas en el diseño.

En otra de sus obras, *To engineer is human. The role of Failure in Successful Design* (Petroski, 2007), a pesar de que se describan y analicen algunas de las más importantes catástrofes de la construcción a lo largo de los dos últimos siglos, Petroski no cae en el pesimismo, sino que alienta la innovación, a avanzar por nuevos caminos y con nuevos materiales, sin acomodarse en los éxitos pasados. El concepto de fallo -mecánico o estructural- es vital para comprender la ingeniería, pues uno de sus principales objetivos es precisamente evitarlo. Para Petroski, los grandes desastres son en última instancia fallos del diseño, y las lecciones aprendidas de esos desastres pueden hacer avanzar más los conocimientos de la ingeniería que todas las máquinas y estructuras exitosas.

Entre los principales fallos de diseño que Petroski estudia en esta obra se encuentran el desplome de las pasarelas elevadas del *Hotel Hyatt Regency* en la ciudad de Kansas en 1981, el accidente del DC-10 de *Americans Airlines* y uno que resulta especialmente relevante para este trabajo es el accidente de la central nuclear de *Three Mile Island*. Considera que el fallo de estos diseños se debe a que las estructuras creadas por los humanos sufren una rápida y constante evolución, se ven sometidas a multitud de factores, cargas, fenómenos naturales, etc., que el ingeniero debe predecir. La ingeniería es una empresa humana y por lo tanto sujeta a error. En la ingeniería, algunos errores son simplemente irritantes (como cuando en un edificio nuevo aparecen fisuras al asentarse el hormigón); otros errores, en cambio, son menos perdonables, como puentes que se derrumban o centrales nucleares que sufren escapes radiactivos, etc. Uno de los ejemplos más estudiado sobre el éxito y el fracaso en la historia de la ingeniería han sido los puentes colgantes. «En ningún sitio es tan evidente la constante interacción entre éxito y fracaso como en la historia de los puentes colgantes, el puente de *Tacoma Narrows* supuso uno de los fallos más espectaculares de la historia de la ingeniería y una lección para evitar futuros fracasos ingenieriles» (Petroski, 2007, p. 219-220).

Petroski relata cómo se construyó el primer puente colgante para conectar la Península Olímpica con el estado de Washington. Una de las novedades de este puente, de estrecho tramo central de dos carriles y con más de 800 metros de luz -distancia entre pilares-, fue el empleo de vigas en vez de las tradicionales celosías bajo el tablero. La utilización de un tablero estrecho y con poco canto le proporcionaba una apariencia frágil y espectacular al mismo tiempo, pero resultó demasiado flexible bajo el efecto del viento. El tablero del Puente de Tacoma Narrows ya había sufrido ondulaciones durante su construcción y persistieron extrañamente meses después de que se abriera al tráfico en 1940.

Horas antes de su desplome, el tablero dio muestras de que podía llegar a colapsar, por lo que se cerró al tráfico antes de que las condiciones se volvieran demasiado peligrosas. Mientras el tablero se retorció hasta su destrucción, los ingenieros seguían trabajando con un modelo del puente y trataban de entender el fenómeno de su inestabilidad aerodinámica. Los posteriores análisis confirmaron que al impactar el viento contra el tramo poco aerodinámico se generó el desdoblamiento del aire en un flujo superior y otro inferior, lo que dio lugar a turbulencias de gran magnitud. Desde entonces se comenzó a considerar el factor aerodinámico en el diseño de puentes, lo que dio lugar a que otros puentes posteriores fueran reforzados contra el viento lateral.

Quizás este refuerzo de acero restaba espectacularidad a los diseños, pero garantizaba su seguridad. Ejemplo de esta técnica de refuerzo para reducir el movimiento provocado por el viento lateral fue el Puente *Bronx-Whitestone*, en Nueva York. En el caso del puente de Tacoma Narrows, Petroski realizó un detallado estudio técnico sobre el fracaso del diseño, argumentando que la utilización de vigas rigidizadoras, la reducción del tamaño del canto -lo que se tradujo en una reducción del coste del proyecto-, y la excesiva luz del tramo central del puente junto con una elevada velocidad del viento en la zona, favorecieron el catastrófico final del proyecto.

Otro autor que también ha analizado el fallo de este diseño es Walter G. Vincenti, en su ensayo *Real-world variation-selection in the evolution of technological form: historical examples* (Vincenti, 2000). Para este autor «los artefactos, por definición, están hechos para trabajar en el mundo que hay alrededor de ellos. Por ello, uno de los aspectos que determina el destino de una idea o tecnología es cómo esta estructura -la forma física del artefacto- se relaciona con el resto del mundo» (Vincenti, 2000, p. 174). Esta afirmación sobre la relación entre artefacto y resto del mundo, se podría identificar como propiedad funcional, o lo que es lo mismo, los objetivos que estos artefactos satisfacen a través de las operaciones que realizan (Lawler, 2003, p. 43).

Volviendo con Vincenti «el mundo real influye o se relaciona con el artefacto de diversas y complejas maneras; teorizar sobre los mecanismos de variación y selección, el lugar de su aplicación y la implicación de factores no técnicos no es trivial» (Vincenti, 2000, p. 174). Este autor analiza tres casos históricos de interacción entre el mundo real y el artefacto. El primero de ellos es el mencionado fallo del *Tacoma Narrows*; el segundo caso es la modificación intencional realizada en el diseño del *Britannia Bridge* por parte de su diseñador Robert Stephenson, que provocó su fracaso como diseño de puente colgante para ferrocarriles.

Era una variante del puente colgante tradicional para ferrocarril sin precedentes: una viga tubular de 450 pies de máxima luz con placas de hierro forjado remachadas, baratas y lo suficientemente largas como para pasar un tren a través de ellas. Sin embargo, Petroski (2007) señala que aunque el puente tubular fue un éxito estructural, ya que permitió el paso de trenes por el estrecho de Menai durante más de cien años, Stephenson consideró su puente como un fracaso en el diseño, ya que el posterior diseño de puente sobre el Niágara de Roebling refutaba la afirmación de Stephenson sobre los puentes colgantes y presentaba un modelo a superar por futuros diseñadores.

Después de los ejemplos de variación-selección del diseño debido a su uso directo en el mundo que le rodea y durante su etapa de diseño, Vincenti analizó también la evolución del diseño del tren de aterrizaje de las aeronaves estadounidenses desde la década de los treinta. En esta década los diseñadores se enfrentaban al desafío de reducir la resistencia aerodinámica de varios diseños de trenes de aterrizajes fijos poco aerodinámicos. La solución a este problema aerodinámico vino por dos variantes técnicas completamente diferentes: la primera era utilizar un tren de aterrizaje retráctil y la segunda aerodinamizar aún más el diseño de los trenes de aterrizaje.

Para llevar a cabo la primera variante, varios diseños implantaron un sistema retráctil que recogía parcialmente las ruedas en el interior de la estructura de la aeronave. Para la segunda variante la solución vino con los denominados “pantalones”, estructuras aerodinámicas verticales que cubrían la estructura del tren de aterrizaje y la rueda. Como las velocidades aumentaban rápidamente debido en parte al desarrollo de nuevos motores y fuselajes, y también al aprendizaje de los ingenieros para hacer frente a su mantenimiento y disponibilidad, la resistencia aerodinámica se convirtió en un aspecto primordial, por lo que el tren retráctil prevaleció.

Vincenti mantenía que este último ejemplo histórico se podía explicar mejor como un caso de determinismo tecnológico, y no con la tendencia más extendida hasta el momento, el constructivismo. La variación-selección basada en la realidad aerodinámica aparece sin lugar a dudas en la evolución de los aviones de gran velocidad. Los diseñadores luchaban contra los problemas específicos de diseño y el uso de pruebas, tanto directas como indirectas y seleccionaron “los pantalones” y el tren retráctil como soluciones en sus aviones. Aunque diferentes diseños de estas variantes triunfaron, varios fallos en los primeros aviones con “pantalones” conllevaron que se adoptara el tren de aterrizaje retráctil como solución a largo plazo.

Otros diseños de partes específicas de los aviones, como hélices, flaps o estructuras metálicas tuvieron un resultado de variación-selección del diseño similar al de los trenes de aterrizaje. Podría ser el caso de que algo similar haya ocurrido en la historia de la evolución del diseño PWR, donde la selección de las diferentes variantes se produce en realidad por factores técnicos y no necesariamente sociales.

Es preciso detenerse en otro autor también referencia central en la historia de la técnica, George Basalla, que ha defendido una concepción evolutiva de la historia de la técnica. En una de sus principales obras, *The evolution of technology* (Basalla, 2011), estudia la evolución de la tecnología aplicando una perspectiva similar a la evolución de los seres vivos, aunque al aplicarse la metáfora evolutiva al caso de los artefactos creados por los seres humanos crea que es preciso introducir factores como la utilidad y la necesidad que no tendrían sentido en el caso de los organismos vivos.

En esta concepción evolutiva tendrán un papel fundamental factores diversos como los psicológicos e intelectuales, sociales, económicos, culturales e incluso militares. En relación con los factores psicológicos e intelectuales pone el ejemplo de las máquinas imposibles, los sueños tecnológicos y las fantasías populares. Las fantasías populares exigen una revolución del papel social, de la actitud profesional, de la formación y la personalidad del tecnólogo. En vez de un sirviente sin imaginación que responde como se espera a las necesidades de la sociedad, aparece un visionario que puede ofrecer muchísimo más de lo que la sociedad necesita y a menudo quiere. Basalla reflexiona sobre el diseño PWR, y afirma que «si creemos que los ingenieros defensores de la energía nuclear nos están ofreciendo una evolución realista y objetiva de su coste, beneficios e inconvenientes, cuando de hecho están expresando su entusiasmo hacia una forma de energía técnicamente atractiva, podemos encontrar serios problemas cuando seguimos su consejo» (Basalla, 2011, p. 100).

### ***2.3.2 Construcción Social de la Tecnología.***

Pinch y Bijker, representantes del enfoque de la construcción social de la tecnología (SCOT del inglés *Social Construction of Technology*), sitúan al *grupo social relevante* como el punto central del análisis. El grupo social relevante está constituido por individuos que confieren a un artefacto técnico específico un mismo significado. En una de sus obras de referencia, *The Social Construction of Technological Systems* (Bijker *et al*, 1987), argumentan que en la construcción social de la tecnología el proceso de desarrollo de un artefacto tecnológico puede describirse como una alternancia entre variación y selección.

A diferencia de los modelos lineales utilizados en la mayor parte de los estudios de innovación y en muchos estudios sobre la historia de la tecnología, estos resultados pueden reflejarse en un modelo multidireccional. En el caso del desarrollo de la bicicleta, las diferentes variantes técnicas del artefacto se representan en dicho modelo. Sin embargo, si se adopta un modelo multidireccional, es posible preguntarse por qué ciertas variantes “mueren” mientras otras “sobreviven”. Para comprender esta selección en el proceso de desarrollo de la bicicleta, es necesario considerar los problemas y soluciones presentadas en momentos particulares por cada artefacto diseñado. En la Figura 2.2 se muestra un esquema representativo de estas soluciones para un artefacto cualquiera.

Identificados los problemas, los grupos sociales y el significado que estos dan al artefacto, se considera que las interacciones entre los distintos grupos sociales, así como los miembros de un mismo grupo, constituyen semánticamente los distintos artefactos, que a veces quedan escondidos bajo la imagen única de un solo artefacto. En esos casos, el análisis debe mostrar la flexibilidad interpretativa de dicho artefacto, reconstruyendo los significados que le atribuyen los distintos grupos sociales relevantes mediante el análisis de los problemas y las soluciones que tales grupos asocian al artefacto.



En el caso de la bicicleta, aparecen dos grupos sociales básicos a la hora de analizar los problemas que conllevan su utilización, por un lado se encontraban los usuarios de bicicletas y por otro lado los que estaban en contra de su uso. A su vez, ciertas partes del desarrollo de las bicicletas pueden ser explicadas mejor si se incluye otro grupo social, separado del grupo social de usuarios, que era el grupo social de las mujeres que utilizaban la bicicleta.

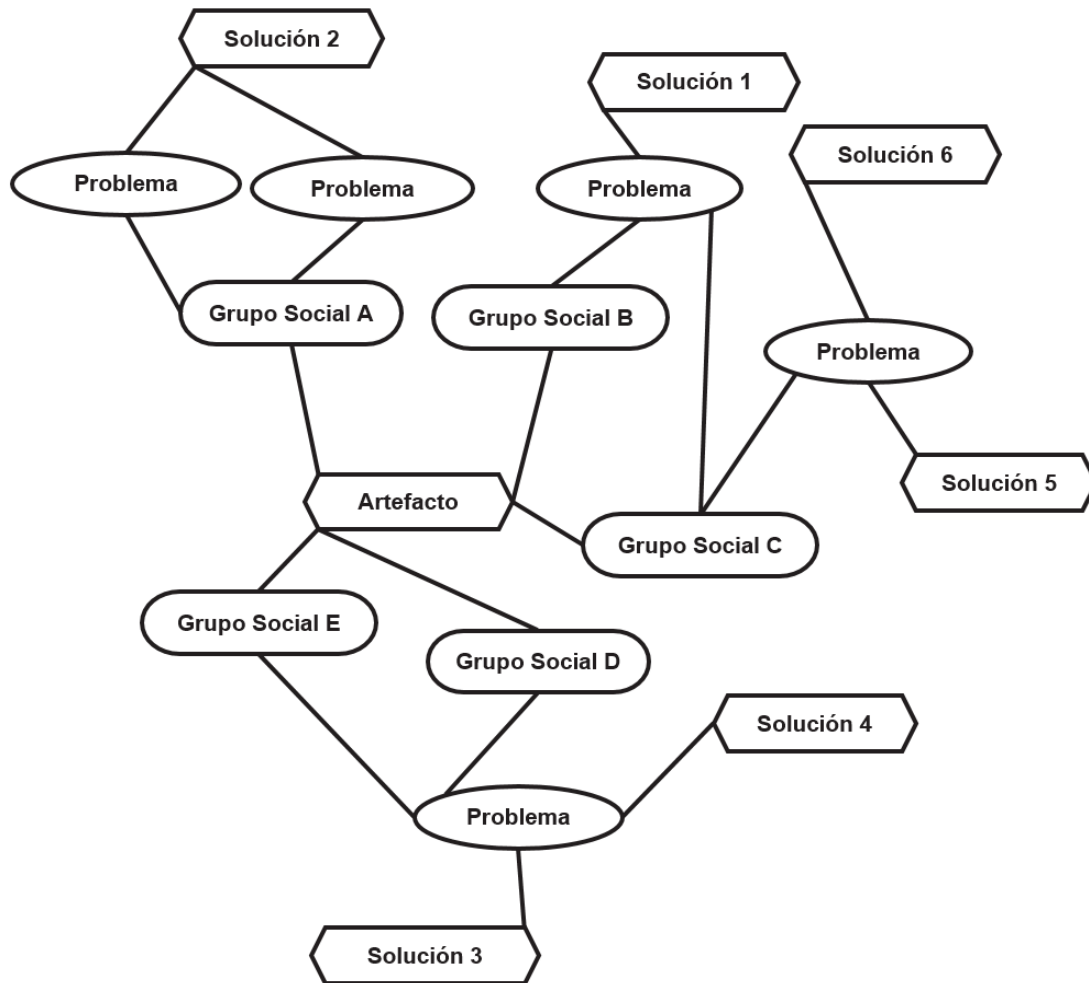


Figura 2.2 Esquema de la relación entre un artefacto cualquiera, los grupos sociales, los problemas y las soluciones.

Definidos varios grupos sociales es el momento de identificar los problemas. Como ejemplo, el grupo social de ciclistas que conducía la bicicleta *Ordinary* consistía en hombres jóvenes y vigorosos: profesionales, oficinistas, maestros de escuela o caballeros. La función primaria de la bicicleta para este grupo era el deporte. En cambio, para las mujeres que llevaban faldas o pantalones tenían conflictos de carácter moral a la hora de utilizar este modelo de bicicleta.

Este modelo multidireccional permite identificar los diferentes conflictos. En el caso de la bicicleta estos podrían ser: la conflictividad de los requerimientos técnicos de cada grupo social (por ejemplo, los requisitos de velocidad y de seguridad); los conflictos entre las distintas soluciones al mismo problema (por ejemplo la seguridad de las ruedas altas o bajas); y los conflictos morales (por ejemplo, mujeres vistiendo faldas o pantalones en las bicicletas con ruedas altas). En este modelo son posibles soluciones diversas, no solo soluciones tecnológicas sino también legislativas o incluso morales, por ejemplo, el cambio de actitudes frente a las mujeres que usan pantalones.

Siguiendo el proceso de desarrollo de la bicicleta, los autores observan grados crecientes y decrecientes de estabilización de los diversos artefactos. En principio, el grado de estabilización es diferente en los distintos grupos sociales. Utilizando el concepto de estabilización, muestran que la “invención” de la bicicleta Safety no fue un evento aislado, sino un proceso que llevó diecinueve años. Por ejemplo, al comienzo de este período los grupos relevantes no vieron la bicicleta Safety, sino un amplio espectro de bi y triciclos, y entre ellos, una bicicleta bastante fea con aspecto de cocodrilo con una rueda frontal relativamente baja y cadena trasera impulsora.

Para el final de este período, la frase “bicicleta segura” denotaba una bicicleta con ruedas bajas, cadena trasera impulsora, cuadro con forma de diamante y neumáticos con cámara. Como resultado de la estabilización después de 1898, no hizo falta especificar esos detalles: se tomaba por sentado que estos eran los “ingredientes” esenciales de la bicicleta segura. En este momento, aparece otro aspecto fundamental dentro del SCOT: *la flexibilidad interpretativa de los artefactos tecnológicos*. Esta flexibilidad no solo se refiere a la existencia de flexibilidad en el modo en el que la gente piensa o interpreta los artefactos, sino también a la existencia de flexibilidad en el modo en que los artefactos han sido diseñados.

No existe un único modo o “el mejor modo” para diseñar un artefacto. Por ejemplo, Pinch y Bijker (1987) imaginaban que en el caso de las bicicletas, si se hubieran realizado entrevistas a los ingenieros de bicicletas en 1890, hoy estarían en condiciones de mostrar la flexibilidad interpretativa del artefacto “neumático con cámara”.

Para algunos este artefacto era una solución al problema de la vibración de los vehículos con ruedas pequeñas. Para otros, el neumático con cámara permitiría ir más rápido. Pero aún hay más interpretaciones, ya que para otro grupo de ingenieros originaba deslizamiento lateral y por tanto eran ruedas más inseguras. En otro de los estudios sobre la tecnología, el caso de la bakelita incluido en *The Social Construction of Technological Systems* (Bijker et al, 1987), Bijker analiza la flexibilidad interpretativa del artefacto celuloide durante el proceso de selección.

La razón es que durante este proceso existió una controversia entre los dos creadores de plásticos, Spill y Hyatt, sobre quién poseía la prioridad en la invención del uso del alcanfor en la producción de plástico a partir de la nitrocelulosa. Según Spill, el celuloide era una mezcla de nitrocelulosa y alcanfor que, aunque preparada de un modo ligeramente diferente, era idéntica a su xilonita o marfilina. Sin embargo, para Hyatt había una diferencia crucial en el proceso de fabricación entre el celuloide y otros tipos de plásticos fabricados con nitrocelulosa, y era el empleo de una solución sólida y no líquida de nitrocelulosa y alcanfor.

Dejando a un lado la flexibilidad interpretativa, para cerrar el estudio desde el enfoque SCOT es necesario establecer mecanismos que permiten la *estabilización del artefacto*. Estos mecanismos se pueden enmarcar dentro de lo que los autores definen como *clausura retórica* y *clausura por redefinición del problema*.

En la clausura retórica están relacionadas la estabilización del artefacto y la desaparición de los problemas. Para cerrar una *controversia tecnológica* no se requiere resolver los problemas en el sentido común que damos al concepto “controversia”. El punto clave es si los grupos sociales relevantes consideran resuelto el problema. En la tecnología, la publicidad -entre otros factores- puede tener un papel importante en la formación del significado que un grupo social le da a un artefacto.

En el caso de la bakelita, la controversia fue resuelta en los tribunales. Ni Spill ni Hyatt podían ser considerados inventores de un plástico de nitrocelulosa y alcanfor, porque ya se habían cubierto con patentes los primeros intentos por producir a partir de la nitrocelulosa un material duro, fuerte y brillante que pudiera ser cortado. Además de la clausura de la controversia, suponía la victoria de Hyatt, porque la decisión del juez le negaba a Spill la novedad del uso del alcanfor y hacía nulos sus fundamentos para litigar contra Hyatt. De esta manera, la *Celluloid Manufacturing Company* se asentó con éxito sobre una base financiera firme (Bijker, 1987, p. 163).

En el mecanismo de clausura por redefinición del problema, sirva de ejemplo la controversia en torno al neumático con cámara de aire en las bicicletas. Para la mayoría de los ingenieros era una monstruosidad teórica y práctica. Para el público general significaba un feo accesorio antiestético. Para el fabricante significaban una solución al problema de la vibración. Sin embargo el grupo de ciclistas deportivos no aceptaba que este fuese un problema. La vibración presentaba un problema solo a los usuarios potenciales de bicicletas con ruedas bajas. La controversia finalizó cuando estos neumáticos fueron colocados en una bicicleta de carrera y se comprobó la elevada velocidad que podía alcanzar. Los deportistas y el público general clausuraron el problema redefiniéndolo, es decir, gracias a los neumáticos con aire solucionaron el problema de la velocidad, pero sin encontrar solución al problema de la vibración.

## 2.4 Perspectiva sistémica de una Central Nuclear.

Antes de empezar con la historia de la evolución técnica de los reactores nucleares de agua a presión es necesario definir qué es una Central Nuclear. Utilizando una de las obras de referencia en la ingeniería nuclear, *Nuclear Reactor Engineering* (Glasstone y Sesonske, 1994, p. 488), una central nuclear está constituida por un número determinado de sistemas que interactúan entre sí de diferentes maneras. El conocimiento de estas interacciones es esencial para el diseño y operación de la planta. Dentro de la perspectiva puramente técnica de estos autores, el término *sistema* se puede definir como un grupo de elementos interrelacionados formando un todo regular y organizado. Un sistema puede tener muchos subsistemas, componentes humanos y técnicos interconectados. Pero cuanto más complejo es el sistema, como es el caso de las centrales nucleares (Rochlin, 1999, p. 1557), más difícil resulta descomponer el conjunto entrelazado de modelos sociales organizacional y técnicamente enmarcados así como el conjunto de subsistemas o elementos interconectados. Cuanto más complejo sea el sistema técnico, más complicado será descomponer el conjunto entrelazado de modelos sociales y técnicos.

La parte más pequeña e indivisible de los diferentes sistemas y subsistemas acaba siendo el componente o artefacto. Esta definición guarda un gran parecido con la concepción ontológica sistémica, que define un *sistema técnico* «como un dispositivo complejo compuesto de entidades físicas y de agentes humanos, cuya función es transformar, de forma eficiente, algún tipo de cosas para obtener determinados resultados característicos del sistema» (Quintanilla, 2002, p. 21). Para Miguel Ángel Quintanilla un *sistema técnico* consta de ciertos elementos que lo caracterizan, como por ejemplo las materias primas, los componentes, la estructura, los objetivos y los resultados. «Hughes (1983) usa la noción de sistema tecnológico para referirse a sistemas complejos en los que los aspectos sociales y organizativos pueden ser tan importantes como los propios artefactos físicos» (Quintanilla, 2002, p. 20).

El resultado de la operación de este sistema técnico formado por agentes intencionales y objetos puede ser un objeto que ha sido transformado intencionalmente: un artefacto. Igualmente, los sistemas técnicos involucran creencias y valores, incorporadas gracias a las intenciones de los agentes. León Olivé (2006) propone un ejemplo de sistema técnico que resulta muy útil en esta investigación, los sistemas técnicos muy complejos, como las centrales nucleares, que además de complejas acciones, involucran conocimientos científicos. Como se ve, las definiciones de sistema técnico proporcionadas desde la perspectiva de la ingeniería de reactores nucleares y desde la filosofía, no difieren mucho: ambas coinciden en que se trata de un dispositivo complejo de elementos que interactúan entre sí y que tienen distintas naturalezas.

Siguiendo la caracterización de los sistemas técnicos propuesta por Quintanilla (1988), una central nuclear (en tanto sistema técnico) se caracteriza por los siguientes elementos:

- i. *inputs*: el combustible nuclear y el agua necesaria para la refrigeración;
- ii. *componentes materiales*: las “piezas” o equipos necesarios para la transformación de la energía calorífica en energía eléctrica: bombas, válvulas, tuberías, cambiadores de calor, depósitos, etc.;
- iii. *componentes intencionales o agentes*: los operadores o gestores del sistema que con sus conocimientos, habilidades y valores controlan su funcionamiento.
- iv. *estructura del sistema*: definida por las relaciones o interacciones que se producen entre los componentes del sistema: de transformación, como por ejemplo la fisión nuclear, o de gestión, como por ejemplo los procesos de monitorización de los parámetros fundamentales en la operación de la central;
- v. *objetivos*: producir energía de una forma eficiente y segura, con el menor riesgo para la población y respetando el medio ambiente;
- vi. *outputs*: el resultado de la acción intencional que se produce en una central nuclear es la producción de energía eléctrica, pero este resultado será menor si se generan demasiados residuos radiactivos en el proceso.

## 2.5 Clasificación de los Reactores Nucleares.

Existen diferentes posibilidades para clasificar los numerosos diseños de reactores nucleares pero la forma más aceptada es la que se basa en su período de desarrollo (Meiswinkel, Meyer y Schnell, 2013; Radulescu y Pavelescu, 2009) (Figura 2.3): *Generación I*: primeros prototipos construidos entre 1957 y 1963; *Generación II*: reactores comercialmente viables construidos a partir de mediados de la década de 1960 en adelante; *Generación III*: reactores avanzados, que generan mucha más energía y con mucha más preocupación por la seguridad, construidos desde principios de 1980; *Generación III+*: reactores nucleares con salvaguardias estructurales y/o características de seguridad pasiva; y *Generación IV*: los reactores del futuro, altamente eficientes, con características avanzadas de seguridad y generando pequeñas cantidades de combustible nuclear gastado.

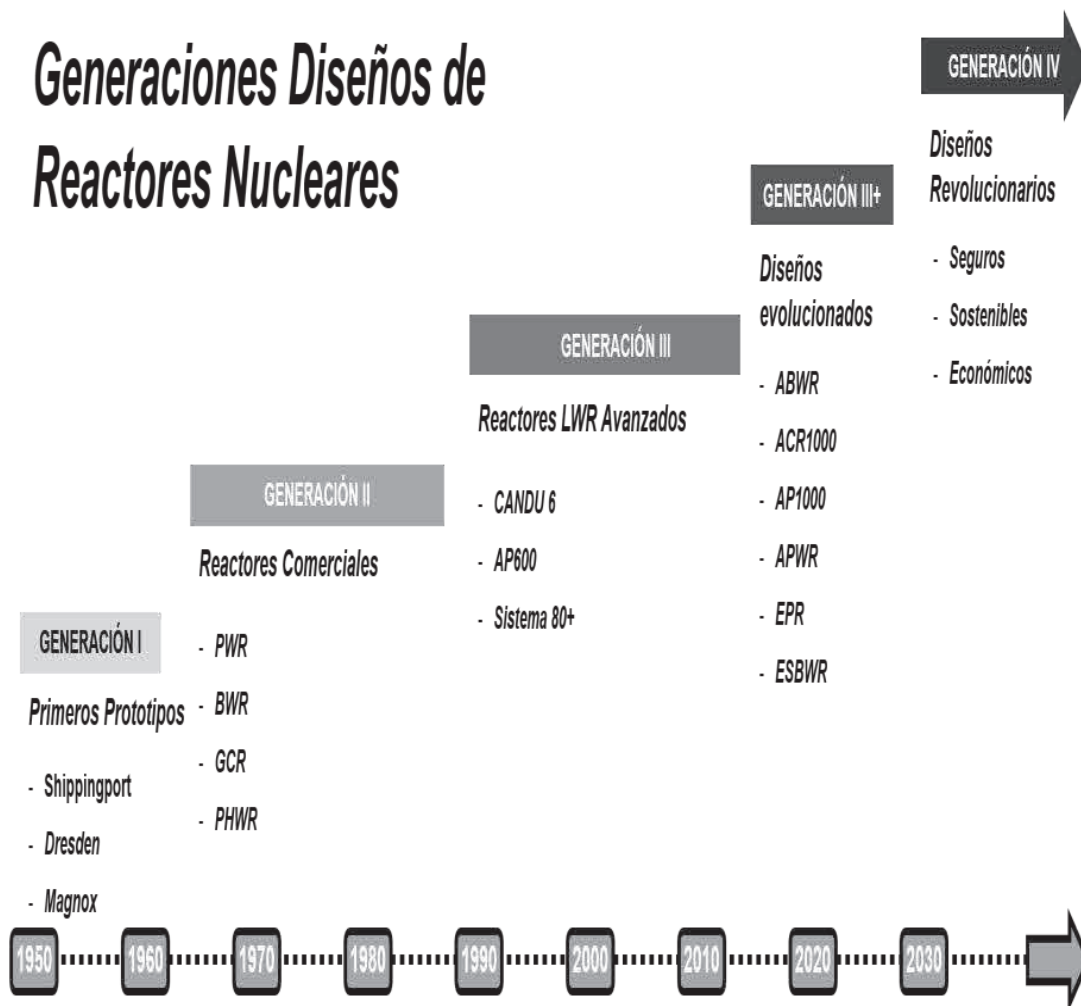


Figura 2.3 Evolución de las generaciones de reactores nucleares.

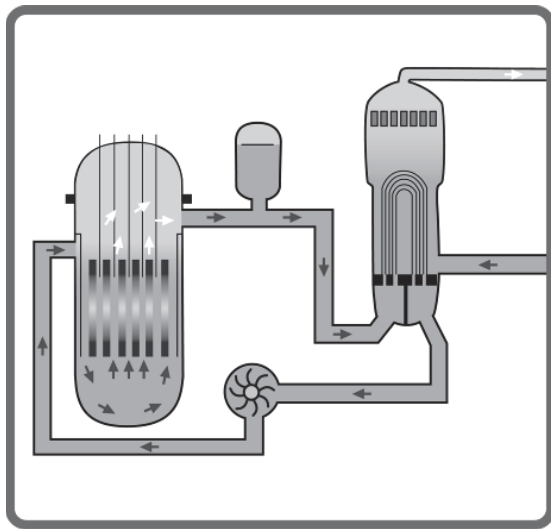
Es conveniente también diferenciarlos en función de su configuración y objetivos: (i) por un lado se encuentran los reactores rápidos, conocidos como reproductores rápidos, porque cuando están operando se “reproduce” más plutonio fisionable del uranio que están consumiendo; y (ii) por otro lado los reactores térmicos, dentro de los cuales existen varias combinaciones de moderadores y refrigerantes que se han desarrollado con éxito en diferentes diseños de reactores nucleares. También se podrían hacer otras clasificaciones, por ejemplo en función del moderador y el refrigerante utilizados (Bahman y McDaniel, 2015).

Los reactores térmicos son los más implantados en el mundo, destacando para la presente Tesis los desarrollados durante la *Generación II*, que se distinguen por las siguientes características: (i) el combustible, que puede ser uranio natural, uranio enriquecido, plutonio o torio; albergado en el interior de elementos combustibles en forma de placas o varillas; revestidos por diferentes materiales: zirconio, aluminio, etc.; (ii) la energía de los neutrones: en los reactores nucleares se obtiene energía a través de neutrones térmicos, conocidos también como neutrones moderados ya que su estado de energía ha sido reducido con la utilización de un moderador: como el grafito, el agua ( $H_2O$ ) o el agua pesada ( $D_2O$ ); y (iii) el refrigerante: es necesario mantener una refrigeración permanente del reactor, para evitar que se alcancen temperaturas de fusión del material. Como refrigerante se utilizan tradicionalmente agua ( $H_2O$ ), agua pesada ( $D_2O$ ) o gas.

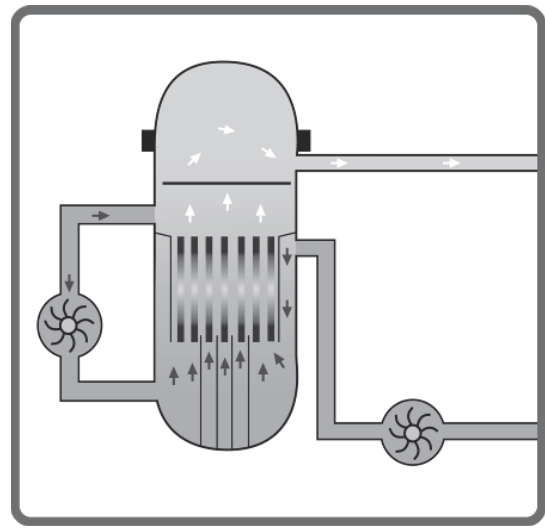
En la *Generación II* se desarrollan diferentes diseños (Figura 2.4): (i) el reactor de agua de ebullición, que utiliza agua ligera como moderador y refrigerante, conocido por su acrónimo BWR; (ii) el reactor de agua a presión, que junto al BWR constituyen los diseños *Light Water Reactor* (LWR) por utilizar agua ligera como moderador y refrigerante, comúnmente conocido como PWR del término inglés *Pressurized Water Reactor* (-en este diseño el refrigerante no llega a alcanzar la temperatura de ebullición). La variante inicial de este diseño



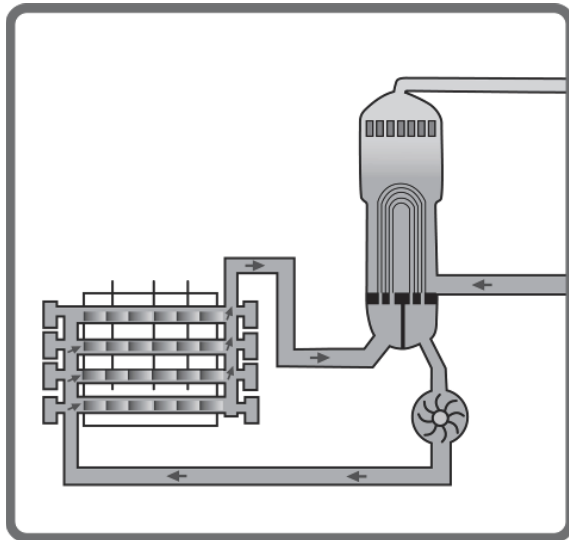
fue el reactor instalado en la central nuclear de Shippingport, diseñado por la compañía norteamericana Westinghouse, que contaba con un único circuito primario de refrigerante del reactor; (iii) el diseño en el que se incorporó agua pesada -dióxido de deuterio,  $D_2O$ - como moderador y refrigerante, que dio lugar al diseño de reactor de agua pesada a presión, en inglés *Pressurized Heavy Water Reactor*, también conocido por sus siglas PHWR o CANDU, por tratarse de un diseño de reactor nuclear desarrollado en Canadá y que utiliza Deuterio; (iv) el diseño de reactor que utiliza el grafito como moderador y el gas como refrigerante, desarrollado inicialmente en el Reino Unido en diferentes diseños en función del gas que utilizan y que se conoce como GCR, del término en inglés *Gas Cooled Reactor*; y (v) el diseño de reactor de agua ligera refrigerado con grafito, cuyas siglas son LWGR, del término inglés *Light Water Graphite Reactor*, dentro del cual se encontraba la variante soviética denominada RBMK, del ruso *Reaktor Bolshoy Moshchnosty Kanalny*, cuyo diseño era muy diferente al resto de los reactores de potencia, ya que se utilizaba simultáneamente tanto para la producción de plutonio como para la producción de energía eléctrica.



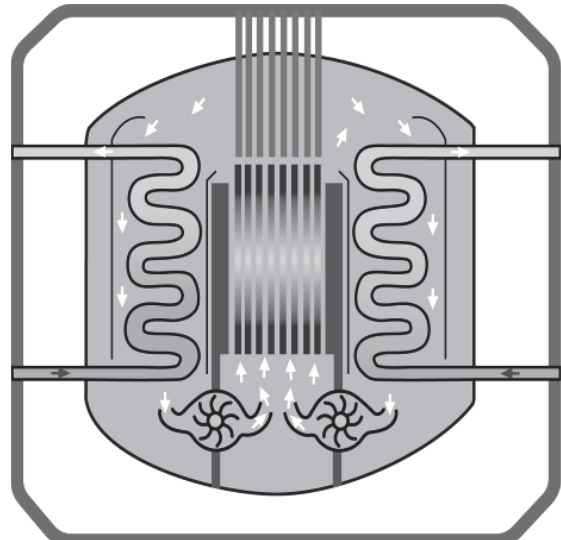
*Pressurized Water Reactor (PWR)*



*Boiling Water Reactor (BWR)*



*Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR/CANDU)*



*Gas Cooled Reactor (GCR)*

Figura 2.4 Esquema de evolución de las generaciones de los reactores nucleares (basado en WNA, 2011).

## **2.6 Factores determinantes para estudiar el diseño PWR.**

A la hora de elegir un elemento tecnológico para estudiar su evolución técnica puede ser interesante tener en cuenta diversos factores: (i) que haya favorecido al bienestar de la sociedad donde se ha desarrollado, o por el contrario, que haya dado lugar a nuevas controversias, necesidades, intereses e incluso problemas; (ii) que haya transformado la cultura, los valores o los hábitos organizativos de la sociedad; (iii) que se haya relacionado con la sociedad o haya dado lugar al surgimiento de diferentes grupos sociales: comunidades científicas, políticas, militares, medios de comunicación, partidarios, opositores, etc.; y (iv) que se haya desarrollado desde el punto de vista técnico lo suficiente como para haber dado lugar a la aparición de multitud de diseños y artefactos -incluso a diseños y artefactos carentes de éxito en su implantación- basándose en conceptos técnicos como eficiencia, seguridad, rentabilidad, fiabilidad, disponibilidad, etc.

«Mientras que la evolución del diseño BWR es relativamente sencilla, el legado del diseño PWR es bastante más complejo por las numerosas versiones desarrolladas alrededor del mundo» (Breeze, 2016, p. 66). En la historia de la evolución técnica del reactor nuclear se produjo una selección desde su origen, cuando el Almirante Rickover a cargo del proyecto de construcción del primer submarino nuclear eligió para el submarino Nautilus el diseño de reactor PWR, descartando así la otra opción existente, el diseño BWR. En 1957 se suministraron los primeros megavatios de origen nuclear a la red eléctrica estadounidense. Provenían de la central nuclear de Shippingport, cuyo reactor era también diseño PWR. Más que por su capacidad de generación eléctrica esta central será recordada como la demostración real de la energía nuclear como fuente de generación de energía eléctrica. No habían pasado más de sesenta años desde que el químico francés Henri Becquerel descubriera casi por casualidad la radiactividad, ni más de 15 años desde que Enrico Fermi consiguiera la primera reacción de fisión nuclear controlada.

«En 1960 había 17 reactores nucleares en operación con una capacidad eléctrica total de 1200 MWe en cuatro países: Francia, la URSS, el Reino Unido y los Estados Unidos. En otros siete países se habían puesto en marcha programas nucleares» (Char y Csik, 1987, p. 19). En 1968, en plena expansión del mercado nuclear (IAEA, 1968), en el mundo existían 61 reactores nucleares en operación, 13 de los cuales eran diseño PWR, lo que suponía aproximadamente el 20% de los reactores nucleares operativos (Figura 2.5). Otros diseños destacados eran el BWR y el GCR, con 12 y 16 reactores operativos respectivamente.

Estas tres tecnologías (PWR, BWR y GCR) agrupaban en ese momento el 67% de los reactores nucleares operativos en el mundo. Por otro lado, el número de reactores nucleares que se encontraban en fase de construcción alrededor del mundo -ya fuera en fase de licenciamiento, construcción, pruebas nucleares o puesta en servicio- ascendía a 88 reactores, 34 de los cuales contaban con el diseño PWR. El diseño se situaba con un número de reactores en construcción tres veces superior al número de reactores PWR operativos y suponía aproximadamente el 40% del total de reactores nucleares en construcción. Merece la pena destacar que de los 34 reactores PWR en construcción alrededor del mundo, 26 se construían en los Estados Unidos.

El diseño BWR había aumentado su expansión, con 23 reactores en construcción alrededor del mundo -16 de ellos en los Estados Unidos- mientras que los reactores GCR habían sufrido una reducción en la fase de diseño y construcción si se compara con el número de reactores que tenían operativos en ese mismo año. Solo se encontraban en fase de construcción 5 reactores GCR en Europa: 3 de ellos en Francia, 1 en España y el último en el Reino Unido. Este descenso en la construcción de reactores con diseño GCR se pudo deber a la evolución técnica del diseño, cuyo siguiente paso fue el reactor avanzado refrigerado por gas, en inglés *Advanced Gas Cooled Reactor*, cuyo acrónimo es AGR.

El diseño AGR sufrió un pequeño aumento en su implantación, con 4 reactores en fase de construcción, todos ellos en el Reino Unido. El tercer diseño en incrementar su capacidad de construcción fue el diseño PHWR, del cual se estaban construyendo 9 reactores en el mundo: 1 en Argentina, 3 en India, 1 en Pakistán y 4 en su país de origen, Canadá.

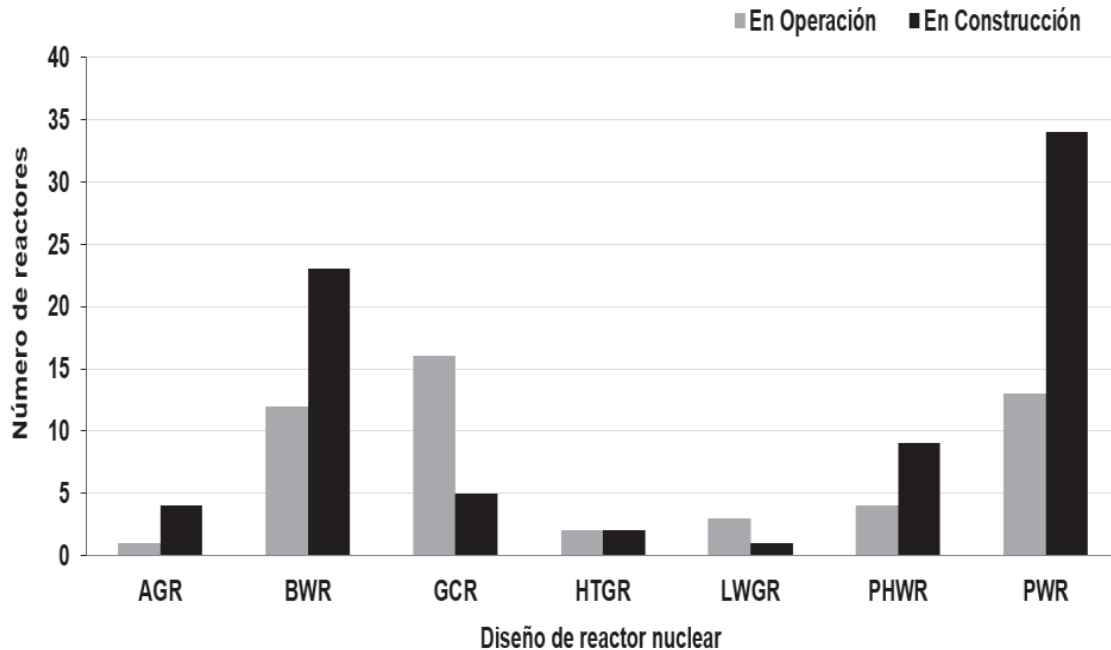


Figura 2.5 Diferentes diseños de reactores nucleares en el año 1968 (basado en IAEA, 1968).

En plena expansión comercial de los reactores nucleares para la generación de energía eléctrica no existía una tecnología con una posición aventajada dentro de la carrera nuclear, existiendo más de diez diseños diferentes de reactores nucleares. No obstante, aparece un pequeño grupo de variantes del diseño de reactor nuclear con un mayor grado de implantación. Por un lado, en una posición más aventajada se encontraban el diseño de reactor de agua a presión PWR y el reactor de agua en ebullición BWR, mientras que el diseño de reactor PHWR de agua pesada presurizada comenzaba a alcanzar una posición aventajada ante tanta variedad. Mientras, el diseño de reactor refrigerado por gas GCR luchaba por no descolgarse del grupo de diseños más implantados en el mundo, desarrollando un nuevo diseño, el AGR. Esa posición más aventajada de los diseños BWR y PWR en 1968 se ha mantenido en el tiempo si se compara con el número de reactores nucleares en operación en el mundo en el año 2010.

Incluso ha aumentado considerablemente, ya que en el año 2010 el 66% de los reactores nucleares operativos -más de 260 reactores- contaban con el diseño PWR como tecnología de referencia para la generación de energía eléctrica, mientras que el diseño BWR se sitúa en segundo lugar con más de 90 reactores, lo que suponía el 22% de los 440 en operación. El diseño PHWR mantenía la tercera posición con el 6% de los reactores nucleares operativos y el resto de diseños -entre ellos el GCR y su evolución, el diseño AGR- solo alcanzaban el 6% de los reactores nucleares operativos (IAEA, 2011, p. 76-77; WNA, 2011), lo que mantiene la tendencia descendente que ya se apreciaba en el año 1968.

Resumiendo, el reactor PWR (i) fue el diseño elegido en 1955 para la primera aplicación tecnológica de la energía nuclear, el submarino nuclear Nautilus; (ii) fue el diseño utilizado para el primer reactor nuclear de generación eléctrica; (iii) es el diseño de reactor nuclear más utilizado en la historia (Bahman y McDaniel, 2015); (iv) ha dado lugar a una industria con diversos competidores y diferentes diseños que competían por ser el más eficiente y seguro del mercado; (v) ha generado diferentes procesos de variación y selección entre sus diseños; y (vi) ha dado lugar a modelos novedosos, que rompían con el diseño original, así como fracasos técnicos de los cuales aprender.

A la vista de estos datos, resulta interesante analizar qué factores técnicos, políticos, económicos, sociales, etc., pudieron influir en esta posición aventajada a lo largo de la historia del diseño PWR. En un segundo nivel, será necesario analizar las diferentes variantes que el diseño PWR ha ido adoptando debido a un proceso de variación y elección donde los diferentes componentes del sistema técnico han tomado distintas formas debido a factores técnicos (rendimiento, seguridad, disponibilidad), sociales (seguridad, impacto social y ambiental, riesgo), económicos (amortización y rentabilidad de la inversión), etc., con el objetivo de diseñar y seleccionar el reactor PWR más eficiente y seguro.

## 2.7 Funcionamiento de una central nuclear con un reactor PWR.

Las centrales nucleares funcionan con el mismo objetivo que una central térmica de carbón o una central de gas: convertir el calor generado en electricidad. Y su principio de funcionamiento es el mismo, la utilización de un combustible que permite obtener vapor de agua que es aprovechado en una turbina para transformar su potencia calorífica en velocidad de giro y a su vez en una tensión eléctrica de salida por el alternador. En el combustible es donde recae la diferencia fundamental entre ambas tecnologías. Mientras que las centrales térmicas utilizan combustibles fósiles, las centrales nucleares utilizan combustible fisionable que permite obtener una reacción de fisión en cadena. En una central nuclear con diseño PWR existen tres circuitos de refrigeración (Bahman y McDaniel, 2015; Breeze, 2014, p. 362) (Figura 2.6).

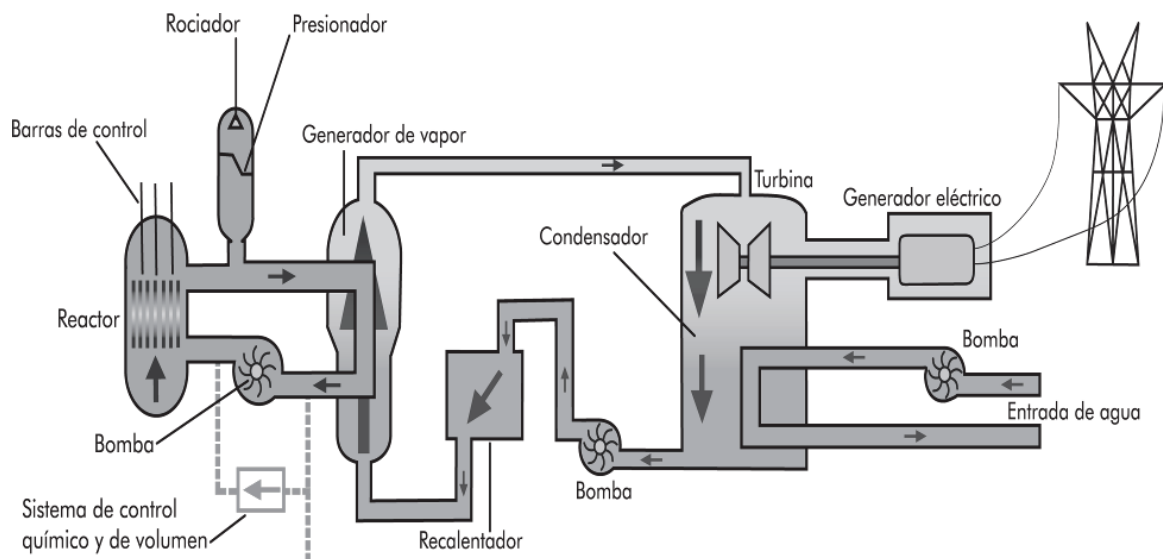


Figura 2.6 Diagrama de una central nuclear con reactor PWR.

El proceso de división de los núcleos atómicos, denominado fisión nuclear, se produce dentro de uno de los componentes fundamentales del diseño, la vasija de presión del reactor, originando el aumento de temperatura del refrigerante que circula a través de las vainas de los elementos combustibles y posteriormente a través de un circuito cerrado, denominado *circuito primario*. Cada circuito primario está compuesto por las tuberías necesarias para mantener el refrigerante, una bomba de circulación y un cambiador de calor denominado *Generador de Vapor*.

El refrigerante del circuito primario se encuentra en torno a 150 bares de presión y 300 °C de temperatura, por lo que el agua no alcanza su punto de ebullición, evitando así la formación de burbujas que dificultarían la transferencia de calor vaina-refrigerante. Si no existiera un foco de enfriamiento la temperatura del refrigerante primario podría seguir aumentando con el tiempo. Haciendo un símil cotidiano, la vasija del diseño PWR se comporta como una olla exprés al fuego. Los elementos combustibles en el interior de la vasija calientan el agua, mientras que en la olla exprés es el fuego el encargado de calentar el agua que hay en su interior. Para evitar que la temperatura siga aumentando en el tiempo, se diseña un foco frío a través del cual se consigue enfriar el refrigerante contenido en el circuito primario, para que retorne a la vasija del reactor y de nuevo se caliente como consecuencia de la transferencia de calor entre el refrigerante y los elementos combustibles. En la olla exprés, el foco frío es la liberación de vapor al exterior a través de la válvula de descarga.

En el diseño PWR, el foco frío son los generadores de vapor. Este componente fundamental cumple la doble misión de ser barrera entre el circuito primario y el secundario -en ningún momento existe contacto entre ellos- y de transformar la energía térmica generada en el reactor en energía latente mediante el vapor generado. Este vapor es conducido a través del circuito secundario a las diferentes turbinas y al generador eléctrico, encargado de convertir la energía de rotación del eje en energía eléctrica, proceso similar al que realiza una dinamo en una bicicleta. El vapor utilizado en las turbinas es condensado gracias al tercer circuito de refrigeración, con el objetivo de ser utilizado posteriormente de nuevo como agua de alimentación a los generadores de vapor. Este tercer circuito contiene agua para la condensación del vapor en la turbina se hace pasar por otro foco frío -embalse, mar, torres de refrigeración, etc.- en el cual el vapor de agua sale al exterior y el agua condensada retorna al condensador para enfriar de nuevo el vapor del circuito secundario.



Entre las principales ventajas del diseño PWR se encuentran: (i) la necesidad de instalar elevadas barras de control, que permiten parar la reacción de fisión en cadena; (ii) la existencia de dos circuitos de refrigeración y un generador de vapor a modo de barra entre el refrigerante activo del primario y el agua que alberga el circuito secundario, que hace que la dosis en las zonas convencionales sean inferiores a otros diseños; (iii) la elevada densidad de potencia que se puede alcanzar, que combinada con la posibilidad de utilizar uranio enriquecido facilita la construcción de reactores con elevadas potencias de generación eléctrica.

Pero también cuenta con claras desventajas en comparación con otros diseños: (i) el circuito primario contiene agua a alta temperatura y alta presión que acelera el fenómeno de la corrosión. Esto significa que los diferentes lazos del circuito primario deben ser construidos en acero inoxidable, lo que aumenta el coste de construcción de un reactor PWR; (ii) la recarga de combustible requiere la parada de la central durante 1-2 meses en períodos de 12-18 meses; (iii) la presión en el circuito secundario es relativamente baja en comparación con la del primario, por lo que la eficiencia termodinámica de los reactores PWR es baja en comparación con otros diseños (Bahman y McDaniel, 2015).

Por todos estos motivos, se ha escogido el reactor PWR como elemento central del análisis de esta Tesis. A lo largo de los siguientes capítulos se irán mostrando las diferentes etapas que pueden identificarse en su desarrollo, así como las distintas influencias que los cambios de su diseño han tenido.

## **CAPÍTULO 3: EL ORIGEN DEL REACTOR NUCLEAR DE AGUA A PRESIÓN.**

### **3.1 El origen del reactor nuclear.**

El origen de la tecnología nuclear se remonta al descubrimiento de Roentgen de los rayos X en el año 1895 y al descubrimiento de la radiactividad natural por parte de Becquerel en el año 1896. Años más tarde, en 1905, Albert Einstein desarrolla su teoría de la relatividad demostrando que la materia podía convertirse en energía. A partir de los años veinte comienzan a descubrirse los pesos atómicos de diferentes elementos y la existencia de varios elementos cuyos átomos podían ser divididos o fisionados. La llegada de Hitler al poder en Alemania originó que científicos europeos y norteamericanos pensaran que el líder nazi podía ser el primero en fabricar una bomba atómica para fines militares. Estos hombres instaron a sus gobiernos a iniciar programas cuya finalidad fuese llevar a la energía atómica de su etapa experimental a su aplicación práctica como arma bélica.

Una de las figuras decisivas en la promoción de los aspectos militares de la energía nuclear fue el físico húngaro Leo Szilard, huido de Alemania en 1933. Este científico comprobó que una reacción nuclear en cadena liberaba enormes cantidades de energía y podía ser utilizada tanto para usos civiles como militares. En 1939 Szilard y Albert Einstein enviaron una carta al presidente norteamericano Franklin D. Roosevelt informándole de la posibilidad de que los alemanes pudieran construir un nuevo tipo de bomba extremadamente potente. Para Basalla (2011) tanto el origen de la energía nuclear como la configuración internacional de la tecnología nuclear se han visto influidos por la necesidad militar. Un año después de dicha carta, un informe inglés sobre energía atómica apuntaba que existía una estrecha relación entre la aplicación de la energía nuclear para fines militares y la producción de energía en tiempos de paz. En 1943 el ejército de los Estados Unidos da comienzo al Proyecto Manhattan, con el fin de construir la primera bomba atómica.

El proyecto, con más de cien mil hombres y mujeres empleados tuvo un coste de unos 2000 millones de dólares y se culminó en agosto de 1945 con la detonación de dos bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki. «Suele mencionarse al proyecto Manhattan como uno de los primeros grandes proyectos tecnocientíficos del siglo XX, lo cual es muy significativo, pues la bomba atómica representa quizá el primer gran salto cualitativo hacia la posibilidad de que una sola acción humana tenga un efecto devastador de dimensiones nunca antes conocidas» (Olivé, 2006, p. 30). Los lanzamientos de la bomba *Little Boy* en Hiroshima y *Fat Man* en Nagasaki fueron el primer ejemplo del uso de la energía nuclear sin restricciones y marcaron el comienzo del desarrollo de una conciencia social en contra de la energía nuclear.

En 1946, el científico J. von Neuman decía: «La energía nuclear es una tecnología de destrucción, de prestigio y de poder, de miedo, de la energía y los beneficios. La ciencia ha superado la edad de la independencia de la sociedad» (Damian, 1992, p. 599). «En los años siguientes al lanzamiento de las bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki, los divulgadores científicos escribieron con anhelo acerca de un paraíso atómico libre de enfermedades, pobreza y malestar. Periodistas y portavoces gubernamentales prometían la posibilidad de conseguir todo esto si la humanidad abandonaba los usos militares de la energía nuclear y se aplicaba al uso pacífico de esta energía» (Basalla, 2011, p. 199).

En contra de estos anhelos, lo que surgió en su lugar fue la situación política de posguerra y el comienzo de la guerra fría. Para Basalla no puede atribuirse únicamente a las tensiones Este-Oeste la postergación del paraíso atómico (Basalla, 2011, p. 199). Hay que tener en cuenta que los diseños de reactores nucleares para generación de energía eléctrica no habían avanzado lo suficiente como para poder producirla de forma eficaz y segura. También existían dudas sobre la existencia de suficientes reservas de uranio en el mundo como para alimentar a varios grandes reactores.

Sin el desarrollo de las bombas atómicas en el proyecto Manhattan hoy en día el rechazo a la energía nuclear sería menor. Cualquier esperanza de energía nuclear barata y abundante para uso civil se desvaneció en el momento en el que científicos e ingenieros centraron todos sus esfuerzos en la creación de la primera bomba atómica. Sin embargo, hay que reconocer que todo el conocimiento científico y la práctica técnica desarrollados en el mismo favorecieron el desarrollo de la tecnología nuclear como fuente de generación de energía eléctrica en tiempo de paz.

Ambos, el conocimiento científico y la práctica técnica desarrollados durante el proyecto Manhattan se trasladaron a la construcción de la pila CP-1, momento histórico que marcaría el origen del desarrollo de los diseños de reactores nucleares de potencia. «Aun cuando la producción de energía no era la única razón de existencia de estos reactores, el conocimiento obtenido en su diseño, construcción y funcionamiento resultó útil para la industria de la energía nuclear» (Basalla, 2011, p. 198).

El primer diseño de reactor nuclear fue patentado en la Oficina de Patentes de Suiza en mayo de 1939, el cual consistía en un sistema técnico que funcionaba con uranio natural como refrigerante y agua pesada como moderador (Radulescu y Pavelescu, 2009). El primer reactor nuclear del mundo, la pila CP-1, fue construida bajo el patrocinio del Proyecto Manhattan, en la Universidad de Chicago en 1942. La pila estaba compuesta por placas de grafito y por placas alternas de uranio. Para evitar los desplazamientos, las placas quedaron sujetas con un bastidor de madera. Mediante este procedimiento quedó construida una pila semiesférica de uranio y grafito. Para evitar una reacción en cadena descontrolada, los cálculos de Fermi sobre el tamaño crítico de la pila CP-1 fueron muy conservadores. Con el objetivo de evitar la salida de neutrones al exterior, se colocó una envoltura de tela de globo sobre el reactor a la cual se le pudiera realizar el vacío.

### **3.2 Los primeros intentos de regulación de la energía nuclear.**

En 1946 el congreso de los Estados Unidos aprueba la Ley de Energía Atómica y con ella se establece la Comisión de la Energía Atómica, en inglés *Atomic Energy Commission* (AEC). La comisión tenía la doble responsabilidad de promover la energía atómica con fines pacíficos y la protección de la salud pública y la seguridad. Este mismo año, Albert Einstein y otros científicos formaban el "Comité de Emergencia" con el objetivo de educar al pueblo estadounidense acerca de la naturaleza de las armas nucleares y la guerra nuclear (Herbest y Hopley, 2007). Aunque no existía relación entre el desarrollo tecnológico de la energía nuclear como fuente de generación de energía eléctrica y el uso de la energía nuclear como arma de destrucción, la sociedad, influida por el temor de una guerra nuclear, aumentó su conciencia en contra de todo lo relacionado con la energía nuclear.

«Mientras que los reactores de energía se desvanecieron en su etapa experimental, la tecnología de las armas nucleares se disparó vertiginosamente en los Estados Unidos y la URSS» (Basalla, 2011, p. 199). En 1953, apenas un año después del lanzamiento de la primera bomba de hidrógeno estadounidense, se produjo la explosión de la primera bomba de hidrógeno soviética, demostrando por un lado la capacidad soviética para desarrollar su propia tecnología y por otro la falta de secretismo de la política estadounidense.

La situación era grave, la técnica soviética adaptada a proyectos civiles permitiría a la URSS dominar la energía nuclear y por tanto ejercer el control sobre los diferentes países donde la implantasen. Inicialmente el presidente Eisenhower, apoyado por el Reino Unido y Francia sugirió que ambas superpotencias compartiesen, en aras de la paz, su tecnología y materiales nucleares con el resto del mundo. Este plan no llegó a adoptarse nunca, pero el programa resultante, *Átomos para la Paz*, fue presentado en la Asamblea General de las Naciones Unidas el 8 de diciembre de 1953.

El programa Átomos para la Paz tiene dos perspectivas diferentes en función de los autores que lo estudian. En primer lugar, los autores Basalla (2011) y Luis Sánchez (2010) vislumbran en él intereses políticos, estratégicos y económicos ocultos dentro del objetivo principal de prestar ayuda a países terceros en la construcción de centrales nucleares. Existiría la intención por parte del gobierno estadounidense de seguir manteniendo su hegemonía mundial en materia tecnológica. Esta colaboración le otorgaría una posición estratégica privilegiada, pudiendo inspeccionar todas las actividades nucleares y verificando que no se desviaba material nuclear para armamento. Para lograr este objetivo era necesario desarrollar un reactor nuclear con la mayor brevedad posible, ya que no contaba con un diseño propio y existía la posibilidad de que rusos e ingleses estuvieran próximos a producir electricidad con sus propios diseños de reactores nucleares.

El programa Átomos para la Paz mejoraría la imagen de los Estados Unidos, debilitada tras la masacre de Hiroshima y Nagasaki, consiguiendo una nueva imagen del país vinculada a la idea de progreso tecnológico y la cooperación internacional. En el seno de la administración Eisenhower existía la convicción de que la liberalización de la política nuclear constituiría una efectiva acción de propaganda anticomunista. El programa también motivaba intereses comerciales al impulsar el desarrollo de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear. Átomos para la Paz sería «un triunfo de la propaganda norteamericana» (Basalla, 2011, p. 199).

Otro enfoque más positivo y determinista de Átomos para la Paz es el reflejado por Michel Damian (1992) e Ira Chernus (2013). El presidente Eisenhower alabó las aplicaciones de la energía nuclear -agricultura, medicina, generación eléctrica, etc.- como tecnología para alcanzar mayores cotas de bienestar y progreso. Propuso la creación de un organismo internacional de energía atómica que promoviese sus usos pacíficos en beneficio de toda la humanidad.

En vista de la carrera por las armas nucleares, el “panel Oppenheimer” -comité formado por el antecesor de Eisenhower, Harry S. Truman, y bautizado con el nombre de su miembro más distinguido, Robert Oppenheimer- recomendó que se le presentase al público estadounidense una imagen más completa de la amenaza y de los planes nacionales de defensa. Sin embargo, durante la redacción del discurso, poco a poco el énfasis fue pasando de la idea inicial de franqueza, al posterior concepto de Átomos para la paz. Meses después de la presentación de Átomos para la Paz, el discurso de Eisenhower se convirtió en pauta para la elaboración del primer borrador del estatuto de creación del organismo *International Atomic Energy Agency* (IAEA).

La Ley de Energía Atómica de 1954 ratificaba la doble responsabilidad de la AEC de promover la energía atómica con fines pacíficos y la protección de la salud pública y la seguridad. Además, la AEC adquiriría la función de licenciar a compañías privadas para comercializar la energía nuclear en su uso como fuente de producción de energía eléctrica (Herbest y Hopley, 2007, p. 2). Sin embargo, surgió un conflicto importante sobre las funciones de la AEC, ya que en muchos aspectos resultaban inseparables e incompatibles.

Por un lado, los opositores argumentaban que la AEC no proporcionaba suficiente protección contra los peligros de la radiación, el daño al medio ambiente y los accidentes severos. Mostraban poca confianza en la voluntad de la AEC en cuanto a la regulación adecuada de la industria nuclear, ya que tenía la obligación legal de promover el uso de la energía nuclear. La industria nuclear, en contra de la opinión de los opositores a la AEC, se quejaba del excesivo enfoque reglamentario de la comisión, imponiendo a veces demandas innecesarias e irrazonables. La AEC estaba interesada en el fomento del crecimiento de la energía nuclear. «El entonces jefe de la AEC, Lewis Strauss, afirmó sobre la energía eléctrica de origen nuclear: *la electricidad demasiado barata para medirla*» (Herbest y Hopley, 2007, p. 15).

Este interés de la AEC por el crecimiento de la energía nuclear era debido a la enorme e incesante presión ejercida por su comité de supervisión del Congreso y por la Comisión Mixta de la Energía Atómica, así como por su propio compromiso con el desarrollo de la tecnología (Walker, 2004). En 1957, el Congreso de los Estados Unidos acentúa la importancia de la responsabilidad civil de los operadores nucleares aprobando la Ley *Price-Anderson* (Jones, 2000; Shrader-Frechette, 1980), referencia de la responsabilidad civil de los operadores tras un accidente que generase daños en el entorno y a la población cercana.

### **3.3 El diseño militar del reactor nuclear.**

Basalla (2011) centra el origen del diseño del reactor nuclear tras el programa Átomos para la Paz, cuando Estados Unidos tenía la necesidad de desarrollar su propio diseño de reactor nuclear en el menor tiempo posible. La solución a este problema vino de un proyecto militar en marcha bajo el patrocinio de la armada norteamericana. Mientras que el ejército gastaba millones de dólares en la producción de armas nucleares, la armada no había tenido la oportunidad de entrar en la era atómica. Finalizada la guerra, la armada centró sus esfuerzos en la energía nuclear como medio de propulsión de barcos y submarinos.

Durante los primeros años de la posguerra, el almirante Hyman G. Rickover no fue el único oficial de la marina intrigado por la idea de un navío nuclear, pero a él, más que a cualquier otra persona, se le debe haber transformado esta idea en realidad. Además, las decisiones de ingeniería que adoptó Rickover al desarrollar sus sistemas de propulsión nuclear tuvieron un gran impacto en la comunidad internacional de la energía nuclear. Rickover, un oficial de ingeniería que en 1947 puso en marcha el programa de submarino nuclear de la armada, tuvo que tomar una decisión crítica en 1950 y elegir entre las variantes de diseño de reactor nuclear propuesto por las compañías estadounidenses *Westinghouse* o *General Electric*.



A la hora de diseñar un reactor nuclear es necesario tomar varias decisiones trascendentales: (i) cómo se controla y modera la reacción nuclear; (ii) cómo se mantiene una temperatura aceptable en el núcleo del reactor; y (iii) cómo se realiza la transferencia de energía calorífica entre los elementos combustibles y el refrigerante. En 1950, las opciones técnicas que existían para enfriar el calor generado en el núcleo de un reactor -independientemente de su configuración- eran el agua común (o agua ligera,  $H_2O$ ), el agua pesada (óxido de deuterio,  $D_2O$ ), un metal líquido o un gas.

Según Simon Rippon (1984), Westinghouse y General Electric desarrollaron diseños diferentes, aunque ambos utilizaban uranio altamente enriquecido para lograr una mayor eficiencia del ciclo, algo que resultaba lógico teniendo en cuenta que el objetivo era la propulsión de barcos y submarinos que recorrían largas distancias. General Electric adoptó el sodio como refrigerante, en lugar del agua ligera, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia en el ciclo.

Aunque cada una de estas opciones tenía sus ventajas e inconvenientes y ninguno de ellos se había probado ampliamente, ambos reactores funcionaban perfectamente en los dos primeros submarinos nucleares, Nautilus y Sea Wolf. Pero Rickover se había comprometido a botar un submarino nuclear en enero de 1955, por lo que no podía permitirse un error en la elección del reactor nuclear. Tras investigar minuciosamente las opciones disponibles, seleccionó un reactor que utilizaba agua común como refrigerante y moderador.

La elección era conservadora y fue adoptada por un ingeniero que sabía que se disponía de más datos técnicos sobre el agua que sobre algunos de los refrigerantes más exóticos, y que había mayores conocimientos tecnológicos sobre transferencia calorífica en calderas de vapor, turbinas, etc. La decisión de Rickover tuvo un éxito espectacular, ya que el Nautilus superó todos los récords de navegación submarina.

«El reactor nuclear del Nautilus era el más simple de la época, lo cual favoreció la construcción de una gran flota de submarinos de propulsión nuclear por parte de Westinghouse, General Electric y otros dos contratistas: *Babcock & Wilcox* (B&W) y *Combustion Engineering* (CE)» (Rippon, 1984, p. 259). Superada la fase de desarrollo de una flota de submarinos de propulsión nuclear, la prioridad de la armada fue la propulsión nuclear de grandes barcos, especialmente portaaviones. La Armada, impresionada por el progreso que había introducido Rickover en su submarino nuclear, eligió un reactor de agua ligera para su futuro portaaviones nuclear. Como condicionante, el prototipo de reactor nuclear para portaaviones diseñado por Westinghouse tenía que ser construido en tierra antes de su instalación en el buque.

Antes de que el proyecto de portaaviones hubiese progresado sustancialmente, la administración Eisenhower lo canceló por razones de presupuesto. Con el respaldo de la Comisión de Energía Atómica y con la bendición del presidente -que necesitaba este reactor para su propuesta de Átomos para la Paz-, Rickover se embarcó de nuevo en otro programa de desarrollo de un reactor nuclear. «Este programa sentó las bases de la industria norteamericana de energía nuclear» (Basalla, 2011, p. 202). «Por lo tanto, una de las razones que dieron lugar a este proyecto fue el cese de la financiación que el Almirante había obtenido para construir el prototipo de la unidad de propulsión de un gran portaaviones» (Rippon, 1984, p. 260).

En este momento histórico, cuando se planeaba el reactor nuclear de Shippingport, la Unión Soviética, Gran Bretaña, Francia y Canadá estaban ya desarrollando reactores para la producción de energía eléctrica. Estos países tenían diferentes instituciones sociales y tradiciones políticas, pero sus reactores nucleares estaban estrechamente vinculados a programas militares. El reactor soviético -al igual que ocurrió con el reactor de Shippingport- fue una modificación de un diseño de reactor para propulsión naval.

Los modelos inglés y francés se basaban en reactores originalmente construidos para producir plutonio para bombas. Y el reactor canadiense fue financiado indirecta pero decisivamente por el gobierno norteamericano mediante su compra de plutonio canadiense para la fabricación de armamento» (Basalla, 2011, p. 204). En 1951, el reactor nuclear experimental estadounidense EBR-1, del inglés *The Experimental Breeder Reactor*, demostró la viabilidad de un reactor nuclear como fuente de generación eléctrica, como quedó de manifiesto en una imagen imborrable en la historia de la tecnología, en la que 4 bombillas conectadas en serie eran capaces de encenderse gracias al funcionamiento de este reactor nuclear experimental.

### **3.4 Shippingport: ¿el primer reactor nuclear?**

En el período entre 1953-1955 el Reino Unido toma la decisión de construir ocho reactores nucleares en *Calder Hall*, con diseño *Magnox*, cuyo nombre lo recibían de la aleación de magnesio que recubrían las varillas de combustible, las cuales eran refrigeradas con dióxido de carbono bajo presión (Radulescu y Pavelescu, 2009). Mientras, Rickover -director de la división de reactores navales de la AEC y máximo responsable del proyecto- en colaboración con *Westinghouse*, como fabricante del reactor, y la *Duquesne Light Company* de Pittsburgh, diseñó los planos para el primer reactor nuclear comercial de Norteamérica.

La *Duquesne Light Company* fue elegida debido a la oferta que realizó incluyendo el terreno para construir el reactor, la turbina y cinco millones de dólares para la investigación y desarrollo de la tecnología. El reactor se construiría en el río Ohio, en Shippingport, Pennsylvania. La ceremonia de excavación comenzó el 6 de septiembre de 1954 y fue seguida por 1400 personas, incluyendo dirigentes políticos de distintos países alrededor del mundo (ASME, 1980). Ese mismo año, la central nuclear rusa de *Óbninsk*, con un reactor LWGR-RBMK, suministraba 5 MWe a la red.

Según Basalla (2011), Rickover eligió el agua como refrigerante y moderador porque satisfacía sus necesidades inmediatas para los submarinos y no porque el diseño PWR fuese el diseño con mayor rendimiento. La elección del diseño para la central nuclear de Shippingport estuvo influenciada por la determinación de los Estados Unidos en conseguir una central nuclear de muestra en el menor tiempo posible. Ese factor, el tiempo, influyó en que la opción más factible fuera la adaptación del diseño de reactor nuclear que la armada utilizaba para la propulsión de sus embarcaciones y no la investigación y el desarrollo de nuevos diseños de reactores nucleares.

Otro factor que este autor identifica como influyente en la elección del diseño fue la economía, «Shippingport formaba parte del negocio competitivo de producir electricidad para el mercado» (Basalla, 2011, p. 203). Resulta evidente pensar que si el proyecto culminaba con éxito, los principales gobernantes mundiales iban a estudiar rigurosamente el factor económico, es decir, la relación entre inversión y rendimiento. En consecuencia, toda la planta se construyó a lo largo de líneas muy flexibles, existía por tanto *flexibilidad en el diseño*. En el reactor se podían incorporar núcleos de diferentes tipos, lo que sería igual a mayor energía térmica generada.

El reactor PWR de la central nuclear de Shippingport consistió en dos partes fundamentales: (i) un sistema primario formado por cuatro lazos de refrigerante primarios a través de los cuales circulaba el agua que contenía el reactor, y (ii) un sistema secundario que contenía agua completamente aislada del circuito primario y que transfería a la turbina el calor en forma de vapor (ASME, 1980) (Figura 3.1). Dentro de este sistema primario, además de la vasija del reactor y las bombas de circulación se albergaban cuatro generadores de vapor horizontales -como se verá más adelante, esta variante técnica fue adoptada por los diseños VVER soviéticos años más tarde- y diferentes sistemas auxiliares: sistema para el tratamiento de los residuos radiactivos.

La vasija del reactor tenía un tamaño de 33 pies de alto y 9 metros de diámetro y un espesor de pared nominal de 8-7/8 pulgadas (Olson, McCardell e Illum, 2002, p. 2-5). En la parte superior de la vasija apoyaba la brida superior, que servía también como punto de entrada de los diversos tipos de instrumentación básica, y la tubería de inyección de seguridad. La brida de soporte se fijaba en su posición con unos pernos de 6 pulgadas de diámetro. El primer núcleo fue un montaje de placas y varillas dispuestas en forma de cilindro. Las placas cilíndricas fueron protegidas con una aleación de zirconio como protección contra el agua caliente; las barras de combustible eran tubos huecos de aleación de zirconio llenas de pastillas de óxido de uranio natural.



Figura 3.1 Diseño PWR de la central nuclear de Shippingport.

El reactor contenía suficiente combustible fisionable para formar una masa crítica capaz de mantener una reacción nuclear en cadena, la cual se pudo iniciar, detener y controlar por medio de 32 barras de control, realizadas en cadmio, que al insertar en el reactor eran capaces de absorber todos los neutrones parando la reacción en cadena y por tanto disminuir su potencia (ASME, 1980). Una característica fundamental del reactor de Shippingport era su coeficiente de temperatura del moderador negativo, lo que significa que el reactor por sí mismo tendía a mantener el nivel de potencia en un valor establecido.

Por ejemplo, si la temperatura del agua que entraba en el reactor bajaba por cualquier razón, el reactor automáticamente producía más calor, y por lo tanto una mayor temperatura de salida del agua. Al contrario, si la temperatura del agua de entrada del reactor aumentaba, la temperatura a la salida bajaba de forma automática. Por tanto, el propio reactor mantenía de forma automática su potencia, sin que estuvieran involucrados sistemas de control específicos. Este control automático inherente era real para las variaciones habituales de potencia en los sistemas eléctricos convencionales, así que las barras de control solo fueron necesarias para evitar grandes variaciones de potencia en la central.

Quince años después de la demostración realizada por Fermi en la *Chicago Pile* (CP-1) y el mismo año que entró en operación la central nuclear de *Calder Hall*, las barras de control de la central nuclear de *Shippingport* se situaron a la altura del punto de criticidad, donde la reacción de fisión se mantenía. Este hito histórico para la central nuclear de *Shippingport* también coincidió con el decimoquinto aniversario de la CP-1 de Enrico Fermi. El 18 de diciembre de 1957, los ingenieros sincronizaron la central nuclear de *Shippingport* con la red de la *Duquesne Light Company*, y los primeros vatios de origen nuclear para uso civil fueron inyectados a la red eléctrica a lo largo del área de Pittsburgh. Tres horas más tarde, la central estaba produciendo 12 MWh.

Al igual que en otros momentos históricos, el evento se llevó a cabo antes de que la inmensa mayoría de la gente supiera qué estaba pasando. Los habitantes de Pittsburg desconocían que estaban recibiendo energía eléctrica de origen atómico. Más tarde los medios de comunicación informaron sobre el acontecimiento. Días después, la central alcanzó su máxima capacidad de generación, 68 MWe y las pruebas continuaron para determinar las características de operación y fiabilidad de la central. Hablando para la compañía Westinghouse, el presidente de la misma dijo: «*La importancia de Shippingport es doble: es un prototipo revolucionario de central de generación de energía eléctrica a gran escala. También es un entrenamiento a gran escala y un centro de pruebas de relevancia histórica para el mundo*» (ASME, 1980, p. 11).

Otra de las características de la central nuclear de *Shippingport*, que le ha dado esa trascendencia histórica fue la capacidad de cooperación entre el organismo regulador, la Comisión de la Energía Atómica (AEC), y la compañía eléctrica *Duquesne Light Company*. Tampoco hay que olvidar el tercer actor involucrado en todo el proyecto, la compañía *Westinghouse*, que adquirió una experiencia increíble para poder desarrollar en el futuro nuevos diseños de reactores y centrales nucleares.

Del mismo modo, el éxito del proyecto pudo influir en su posterior expansión comercial. En palabras del representante de la Comisión Mixta del Congreso sobre Energía Atómica, James E. VanZandt: «*estamos desarrollando el átomo con fines pacíficos y lo estamos haciendo por los medios de "asociación" entre el gobierno y la industria. Todos nosotros podemos estar orgullosos de ello, el primer reactor totalmente comercial. Déjennos considerarlo como un monumento al genio americano y a nuestro sistema de libre mercado, que es la envidia del mundo*». El presidente de la *Duquesne* dijo: «*Shippingport será una universidad, por así decirlo, donde hablar de la industria de generación eléctrica de los Estados Unidos*» (ASME, 1980, p. 11).

Durante la vida del primer núcleo de la central de Shippingport, desde 1957 hasta 1964, la central generó casi 2 billones de kilovatios eléctricos. En 1964 la central paró durante un período de tiempo para permitir la incorporación del segundo núcleo de combustible. Con este combustible se trataba de evitar las recargas de combustible, debido a que la reproducción del torio conseguía generar más cantidad de combustible y eliminaba la necesidad de reposición de combustible.

En este diseño del núcleo se mezclaban varios factores que merece la pena desarrollar: (i) la utilización de un elemento combustible abundante y sin otro uso en aquellos tiempos, el torio; (ii) la posibilidad de que los reactores de agua a presión pudieran llevar otra configuración de combustible en el núcleo, lo cual podía mejorar aspectos como la eficiencia, el rendimiento de la central y disminuir los elevados costes en combustible. Este núcleo pudo utilizarse en Shippingport porque ya existía un conocimiento previo del comportamiento de los reactores reproductores, debido a las anteriores investigaciones militares.

«La central nuclear de *Shippingport* constituyó el origen del diseño de reactor nuclear más potente» (Radulescu y Pavelescu, 2009, p. 1419). «Tuvo una importancia decisiva en la configuración de la industria nuclear en las décadas venideras. Su reactor sirvió de prototipo a los posteriores construidos y utilizados en los Estados Unidos y a los exportados por compañías norteamericanas. *Shippingport* utilizó un reactor de agua ligera, como también lo hicieron la mayoría de las plantas a partir de entonces» (Basalla, 2011, p. 202). Aunque el reactor fue construido por *Westinghouse*, en realidad no se trataba de un prototipo del posterior reactor PWR, ya que bajo la dirección del Almirante Rickover, el núcleo, inicialmente constituido por elementos combustible con uranio enriquecido y un anillo exterior de elementos combustibles con uranio natural, fue convertido en una demostración de reactor rápido de torio, en inglés *Light Water Reactor Breeder* (LWRB).



Se trató de una modificación intencionada del diseño original del núcleo para demostrar la viabilidad de un diseño de reactor rápido que generaba más combustible que el que consumía, gracias al torio, elemento natural y abundante en la naturaleza. *Shippingport* demostró que los reactores con un núcleo basado en U-233 y Th-232 podían ser alternativas tecnológicas, pero Estados Unidos siguió apostando por la tecnología *Light Water Reactor* (LWR) y los diseños BWR y PWR (ASME, 1980; Clayton, 1993; Rippon, 1984).

Las tres empresas involucradas en el proyecto: *Reactores Navales*, *Westinghouse Electric Corporation* y *Duquesne Light Company*, explicaron pacientemente en apariciones ante diversos grupos y a través de los medios de comunicación, que todas las medidas de seguridad posibles fueron tomadas para reducir al mínimo la posibilidad de escape radiactivo. Señalaron que la diferencia entre *Shippingport* y una central de carbón convencional, de fuel o de gas, era la fuente de calor, ya que este se proporciona gracias a la fisión nuclear, mientras que en las centrales eléctricas convencionales el calor se genera por la reacción química del carbón o el gas con el oxígeno (ASME, 1980). Aparecen en este momento las primeras transferencias de conocimiento entre la comunidad científico-tecnológica y la sociedad.

### **3.5 La necesidad militar de la energía nuclear.**

Según Basalla, la central nuclear de *Shippingport* producía energía eléctrica a un precio muy superior a una central de generación convencional. Posteriormente, en la década de los sesenta comienza la competitividad económica de la tecnología frente a otras fuentes de generación. «Algunos críticos han alegado que el ejemplo de *Shippingport* cargó a la industria con un reactor de agua ligera, un modelo condenado para siempre a ser poco económico. Esta suposición no se sabe si es cierta o no pero lo cierto es que cuando se adoptó la decisión original, la economía de funcionamiento del reactor fue uno de los últimos aspectos tenidos en cuenta» (Basalla, 2011, p. 203).

Varios autores (Basalla, 2011; Shrader-Frechette, 1980) acentúan el origen del reactor nuclear en la utilización militar de la energía nuclear para fines bélicos. Hoy no habría industria de energía nuclear sino se hubiera desarrollado la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Sin la presión de la necesidad militar, y su intrínseca liberalidad, no hubiera existido la necesidad de desarrollar la tecnología. Resulta difícil imaginar otras circunstancias, aparte de una guerra o una escasez energética, que hubiesen forzado al gobierno norteamericano en 1941 a comprometer sus recursos materiales, mano de obra, talento y dinero para transformar los experimentos de reacción en cadena de los físicos en una bomba o en un reactor nuclear viable.

Para los que vivieron al otro lado de la revolución nuclear olvidaban que antes de que alcanzase su atractivo en la posguerra, la física nuclear era un campo de estudio más bien esotérico. Tuvo sus divulgadores y promotores, pero estos nunca podrían haber persuadido a la industria privada o al gobierno federal a gastar 2000 millones de dólares en investigación nuclear en un período de cuatro años (Basalla, 2011, p. 205). Esta situación forzosa de inversión de elevados recursos humanos, naturales y económicos para conseguir un diseño de reactor nuclear no fue solo exclusiva de los Estados Unidos. Como se ha podido ver anteriormente, también la Unión Soviética, Gran Bretaña, Francia y Canadá se encontraban en una situación similar, en la que los intereses militares favorecían el desarrollo de la energía nuclear.

Tras la segunda guerra mundial vinieron la guerra fría, las carreras armamentística y espacial, así como la creencia de que la seguridad nacional exigía un nivel tecnológico militar cada vez mayor. Muchas tecnologías de finales del siglo XX -los motores a reacción, el radar, la microelectrónica, etc.- tienen su origen en la necesidad militar. El extraordinario papel desempeñado por el sector militar en determinar las elecciones tecnológicas convierte a la nuestra en una época única en la historia de la tecnología.

Nunca antes habían surgido y se habían desarrollado tantas innovaciones importantes principalmente por su potencial uso bélico. Los críticos de la tecnología dominada por el interés militar afirman que estropea la economía, distorsiona los valores sociales, degrada el entorno y amenaza nuestra supervivencia en la Tierra. Desde la perspectiva de finales del siglo XX, parece que la asociación militar con la innovación tecnológica puede ser uno de los signos de nuestra época y el determinante individual más significativo del futuro inmediato del género humano (Basalla, 2011, p. 206).

«La opción nuclear parece haber sido un producto de la guerra fría: ni cálculos económicos, ni criterios de mercado eran la fuerza motriz que estaba detrás de la expansión de la energía nuclear, sino el enfrentamiento entre dos superpotencias y el equilibrio internacional de fuerzas. Las cuestiones políticas eran por lo tanto dominantes, aunque por sí solas no son suficientes para explicar el complejo proceso que desembocó en el desarrollo pacífico del átomo» (Damian, 1992, p. 598).

Dejando a un lado el origen bélico de la energía nuclear y centrándose en su interés como tecnología de futuro para la generación de energía eléctrica, factores como la innovación técnica y su interés económico tenían que ser tenidos en cuenta por los gobiernos y la industria privada de los países desarrollados, pero en plena década de los cuarenta, no eran tan importantes como para fomentar su desarrollo. Sin embargo, la posibilidad de dominar una tecnología de futuro, que podía ser implantada al resto del mundo, era un factor fundamental a tener en cuenta, ya que dominar la tecnología suponía también reducir la probabilidad de ser dominado o invadido -tanto desde una perspectiva militar o estratégica como desde una perspectiva tecnológica- por una tecnología extranjera, que tomaría el control de factores estratégicos para cualquier país como son la generación y suministro de energía eléctrica para su población.

## **CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES.**

La evolución del diseño PWR desde su inicio en Estados Unidos, en la década de los cincuenta, hasta su momento de madurez en la década de los ochenta, ha tenido diversas etapas en las que los factores que influyen en su desarrollo evolucionan en paralelo a los enfoques tradicionales de la historia de la tecnología dentro de los estudios CTS. Esta Tesis no pone en tela de juicio la antigua corriente “determinista”, sino que plantea la posibilidad de que las diferentes perspectivas, “determinista”, “sistémica” y “constructivista” permitan comprender la evolución y adaptación del diseño del reactor PWR y que, en cierta medida, todas ellas sean necesarias para afrontar su estudio.

Tanto los factores internos, relacionados con el conocimiento científico-tecnológico necesarios para diseñar un reactor nuclear, como los factores externos, tales como una mayor percepción del riesgo o una mayor conciencia ecológica, son igualmente relevantes, aunque no lo sean simultáneamente. En la etapa inicial de desarrollo del reactor PWR los únicos grupos sociales interesados e influyentes fueron las élites políticas y económicas de Estados Unidos. El resto de la sociedad no era consciente de la tecnología nuclear de generación eléctrica así como de su riesgo hasta la década de los sesenta, con el surgimiento de un movimiento social a favor de la protección del medio ambiente.

El sistema técnico del diseño de reactor nuclear PWR ha sido capaz de desarrollarse en diferentes países a lo largo del mundo. Los diferentes casos de evolución estudiados requieren de un estudio que tenga en cuenta muchos más factores, contextuales, políticos, geo-estratégicos, e incluso religiosos, como en el caso iraní.

El modelo de “macro-evolución” utilizando el análisis de redes sociales (ARS) permite avanzar -dentro del enfoque SCOT de forma general, y de forma específica en el caso de la evolución de las diferentes variantes del diseño PWR a lo largo de la *Generación II* de Reactores Nucleares- hacia la identificación de los posibles impactos de los diferentes grupos sociales involucrados en su desarrollo, así como las diferentes relaciones multidireccionales. Su alcance y visualidad para sistematizar las relaciones sociales, generan que el análisis de redes sociales pueda ser muy útil para avanzar en el alcance de los estudios CTS, dentro del enfoque *Social Construction of Technology* (SCOT).

Pese a casos como los de *Three Mile Island* o *Mülheim-Kärlich*, que supusieron un impacto negativo en el desarrollo de la tecnología PWR, el diseño sigue siendo el más implantando en el mundo y mantiene su evolución hacia diseños más seguros, pasivos y sencillos, dentro de las *Generaciones III y IV*.

Sería interesante analizar la validez de la perspectiva combinada de todos estos enfoques para otros diseños de reactores nucleares. Del mismo modo, tendría que analizarse cuantitativamente el modelo de “macro-evolución” utilizando el análisis de redes sociales (ARS), con el objetivo de identificar el peso específico de los diferentes factores dentro del modelo constructivista de evolución de un sistema técnico, pero se confía en que este trabajo haya arrojado luz a la evolución de un artefacto tecnológico como es el reactor nuclear PWR.

## BIBLIOGRAFÍA

ABC (1983, 27 de abril). Me gusta ser una zorra. *Periódico ABC, edición impresa*. Recuperado de <http://hemeroteca.abc.es/nav/Navigate.exe/hemeroteca/madrid/abc/1983/04/27/015.htm>

Abtahi, H. (2014). Introductory note to the joint plan of action on Iran's nuclear program. *International Legal Materials*, 53 (4), 732–738.

Acevedo, J.J. (2009). Estado, sociedad y economía: trilogía de la geopolítica. *El cuaderno - Escuela de Ciencias Estratégicas*, 3 (5), 91–114.

Aibar, E. (1996). La vida social de las máquinas: orígenes, desarrollo y perspectivas actuales en la sociología de la Tecnología. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 76, 141–170.

Aliende, A., Luquin, A. y Garrido, J.J. (2017). Nuclear fission technology in Spain: History and social concerns. *Public Understanding of Science*, 26 (3) 307–324.

ASME (1980). *Historical achievement recognized Shippingport atomic power station: a national engineering landmark*. American Society of Mechanical Engineers.

Atkins, R. (1998, 15 de enero). German nuclear reactor must stay shut. *Financial Times*. London edition.

Bahman, Z. y McDaniel, P. (2015). *Thermodynamics in nuclear power plant systems*. Switzerland: Springer Science+Business Media.

Ballesteros, M.A. (2010). El programa nuclear iraní. *Revista Atenea*, 17, 13–15.

Barré, B. (2005). El EPR (Reactor Presurizado Europeo). *Revista DYNA*, 80 (9), 32–36.

Basalla, G. (2011). *La evolución de la tecnología*. (J. Vigil, Trad.). Barcelona: Ed. Crítica (Trabajo original en inglés, 1988).

Benavides, O.A. (2004). La innovación tecnológica desde una perspectiva evolutiva. *Cuadernos de Economía*, XXIII (41), 49–70.

Beorlegui, D. (2009). Los nuevos movimientos sociales en EuskalHerria: los movimientos ecologistas, pacifistas y antimilitaristas desde la transición hasta el cambio de siglo. *Revista Sancho el Sabio*, 30, 161–185.

Bijker, W. (1987). The Social Construction of Bakelite: Toward a Theory of Invention. En Bijker, W., Hughes, T.P. y Pinch, T. (Ed.) (1987). *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Society and History of Technology*. Cambridge: MIT Press.

Bijker, W., Hughes, T.P. y Pinch, T. (Ed.) (1987). *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Society and History of Technology*. Cambridge: MIT Press.

Breeze, P. (2014). *Power technologies generation*. Second edition. Oxford: Elsevier.

Breeze, P. (2016). *Nuclear power*. London: Academic Press.

Broadbent, J. (1999). *Environmental politics in Japan: Networks of Power and Protest*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Bruni, L. y Giacomucci, G. (1992). *ETA: historia política de una lucha armada, Parte 2*. Navarra: Editorial Txalaparta.
- Burant S.R. (Ed.) (1988). *East Germany: a country study*. Washington D.C: Federal Research Division, Library of Congress.
- Burchill, W.E. (1982). Impact of TMI on combustion engineering technical activities. *Progress in Nuclear Energy*, 10 (3), 267–283.
- Burness, H.S., Montgomey, W.D. y Quirk, J.P. (1980). The turnkey era in nuclear power. *Land Economics*, 56 (2), 301–327.
- Buttery, N.E. (2008). Physics and nuclear power. *Journal of Physics: Conference Series*, 105, 1–9.
- Carbon, M.W. (1997). *Nuclear power: villain or victim?* Madison: Pebble Beach Publishers.
- Carlisle, R.P. (1997). Probabilistic risk assessment in nuclear reactors: engineering success, public relations failure. *Technology and Culture*, 38 (4), 920–941.
- Carson, R. (1962). *Silent spring*. Boston: Houghton Mifflin.
- Casado, M.F. (2010). *Japón en la encrucijada nuclear. Un estudio crítico de las implicaciones de la Energía nuclear para la política de seguridad medioambiental de Japón tras el desastre de Fukushima* (Tesis Doctoral). Instituto Universitario General Gutiérrez Mellado, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).
- Cebrerio, J. (1978, 9 de febrero). Primer debate público sobre la central de Lemóniz. *Periódico el País*. Recuperado de: [http://elpais.com/diario/1978/02/09/espana/255826822\\_850215.html](http://elpais.com/diario/1978/02/09/espana/255826822_850215.html).
- Cervera, J.A. (2011). Ciencia, innovación y desarrollo económico en Asia Oriental: lecciones para América Latina. *Revista Gestión de las Personas y Tecnología*, 10, 44–53.
- Char, N.L. y Csik, B.J. (1987). Nuclear power development: history and outlook. *IAEA Bulletin*, 29 (3), 19–23.
- Chávarri, I. (2014, 4 de agosto). La memoria varada de Lemóniz. *Periódico el País*, Recuperado de: [http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/08/03/paisvasco/1407091797\\_785479.html](http://ccaa.elpais.com/ccaa/2014/08/03/paisvasco/1407091797_785479.html).
- Chernus, I. (2013). Los átomos para la paz de Eisenhower, el discurso que inspiró la creación del OIEA. *Boletín OIEA*, 54 (4), 3–4.
- Chesshire, J. (1992). Why nuclear power failed the market test in the UK. *Energy Policy*, 20 (8), 744–745.
- Clayton J.C. (1993). The Shippingport pressurized water reactor and light water breeder reactor. *Proceedings of 25th Regional Meeting 3007 American Chemical Society*. Pittsburgh: Westinghouse Report.
- Collingridge, D. (1984a). Lessons of nuclear Power: US and UK history. *Energy Policy*, 12 (1), 46–67.
- Collingridge, D. (1984b). Lessons of nuclear Power: French 'success' and the breeder. *Energy Policy*, 12 (2), 189–200.

- Commoner, B. (1967). *Science and survival*. New York: Viking.
- Cornejo, M. (2011). El suministro energético renovable 2.0: la revolución imperativa. *Revista ArtefaCToS*, 4, 53–65.
- Cuerdo, M. (1999). Evaluación de los planes energéticos nacionales en España (1975-1998). *Revista de Historia Industrial*, 15, 161–178.
- Cuevas, A. (2004). La cultura tecnológica en la Corporación Cooperativa Mondragón (MCC). *Revista CTS*, 2 (1), 47–66.
- Damian, M. (1992). The ambiguous lessons of history. *Energy Policy*, 20 (7), 596–607.
- Davies, D.R., Roberts, A.C. y Ness, D. (1995). A review of the design and construction of the Sizewell B pressurized water reactor building containment structures. *Nuclear Engineering and Design*, 156 (1-2), 259–268.
- Davies, R. (1984). The Sizewell B nuclear inquiry: an analysis of public participation in decision making about nuclear power. *Science, Technology, & Human Values*, 9 (3), 21–32.
- Davies, R. (1987). The Effectiveness of the Sizewell B Public Inquiry in Facilitating Communication about the Risks of Nuclear Power. *Science, Technology, & Human Values*, 12 (3/4), 102–110.
- Davies, R. (1995). Planning and acquiring the UK's first PWR power station. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Sizewell B Power Station*, 108, 3–14.
- Davis, W. (2015). SNUPPS - Nuclear plant construction at the cutting edge, 1972. American Nuclear Society Café. Recuperado de: <http://ansnuclearcafe.org/2015/03/17/snupps-nuclear-plant-construction-at-the-cutting-edge-1972/#sthash.sE5C9yRi.5CoXN6sO.dpuf>
- DeLeon, P. (1980). Comparative technology and public policy: the development of the nuclear power reactor in six nations. *Policy Sciences*, 11 (3), 285–307.
- De los Ríos, P. (1998). Los movimientos sociales de los años sesentas en Estados Unidos: un legado contradictorio. *Revista Sociología*, 13 (38), 12–30.
- Del Sesto, S.L. (1979). The commercialization of civilian nuclear power and the evolution of opposition: The American experience, 1960-1974. *Technology in Society*, 1 (4), 301–327.
- Diario Vasco, (2014, 13 de febrero). Los éxitos del sol antinuclear y los logos de Chillida. *Diario Vasco, edición digital*. Recuperado de: <http://www.diariovasco.com/v/20140213/politica/exitos-antinuclear-logos-chillida-20140213.html>.
- Doederlein, J.M. (1978). La energía nuclear, tema de preocupación pública: Protección del interés general. *Boletín IAEA*, 20 (1), 55–63.
- Douglass, W.A. y Zulaika, J. (1990). On the interpretation of terrorist violence: ETA and the Basque political process. *Comparative Studies in Society and History*, 32 (2), 238–257.
- Echávarri, L.E. (2007). Is nuclear energy at a turning point? *The Electricity Journal*, 20 (9), 89–97.



- EFE (2016, 27 de noviembre). Suiza rechaza en referéndum el cierre de sus centrales nucleares. *Agencia EFE*. Recuperado de <http://www.efe.com/efe/espana/portada/suiza-rechaza-en-referendum-el-cierre-de-sus-centrales-nucleares/10010-3109071>.
- Espejo, E. (2002). La producción de electricidad de origen nuclear en España. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 33, 65–78.
- Evans, N. (1984). An economic evaluation of the Sizewell decision. *Energy Policy*, 12 (3), 288–295.
- Evans, R.W., Hu, Y. y Zhao, Z. (2010). The fertility effect of catastrophe: U.S. hurricane births. *Journal of Population Economics*, 23 (1), 1–36.
- Fernández, P., Cuevas, A. y Vergara, D. (2014). Historia de la evolución técnica de los reactores nucleares de agua a presión. *Revista ArtefaCToS*, 6 (1), 109–138.
- FAZ (2011). Auf wackeligem boden: Mülheim-Kärlich. (Faz) *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Recuperado de <http://www.faz.net/frankfurter-allgemeine-zeitung/politik/auf-wackeligem-boden-muelheim-kaerlich-1611050.html>.
- Fleck, J. (2000). Artefacts, knowledge and organization. En J. Ziman (Ed.): *Technological Innovation as an Evolutionary Process*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Flegel, T. (2010). Public protests against nuclear power in Germany. *Turkish Policy Quarterly*, 9, 105–115.
- Franklin, N.L. (1984). What Sizewell means for the UK power plant industry. *Energy Policy*, 12 (3), 271–275.
- Gammel, B. (2014). Connecticut Yankee and Millstone: 46 Years of Nuclear Power. Recuperado de <http://wnpr.org/post/connecticut-yankee-and-millstone-46-years-nuclear-power>
- García, M. (1981). El debate público sobre el uso de la energía nuclear. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 16, 57–90.
- Gaviria, M. (1978, 27 de junio). Los planes energéticos trucados. *Periódico el País, edición impresa*. Recuperado de: [http://elpais.com/diario/1978/06/27/economia/267746401\\_850215.html](http://elpais.com/diario/1978/06/27/economia/267746401_850215.html).
- Gerardi, G.J. y Maryam, A. (1995). An assessment of Iran's nuclear facilities. *The Nonproliferation Review*, 2 (3), 207–213.
- Glasstone, S. y Sesonske, A. (1994). *Nuclear reactor engineering: reactor systems engineering, volume two*. Dordrecht: Springer-Science+Business Media.
- González, F. (1989). *Veinte años de canción en España, 1963-1983*. Madrid: Ediciones de la Torre.
- Green, S.J. y Hetsroni, G. (1995). PWR steam generators. *International Journal Multiphase Flow*, 21 (Suppl.), 1–97.
- Greenhalgh, G. (1984). The Sizewell inquiry – is there a better way? *Energy Policy*, 12 (3), 283–287.
- Grimes, B.K., Ramos, S.L. y Weiss, B.H. (1982). Emergency planning and preparedness since Three Mile Island. *Progress in Nuclear Energy*, 10 (3), 363–386.

- Grubler, A. (2012). The French pressurized water reactor program. Historical case studies of energy technology innovation. En: Grubler A., Aguayo, F., Gallagher, K.S., Hekkert, M., Jiang, K., Mytelka, L., Neij, L., Nemet, G. & C. Wilson (autores): *The Global Energy Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press.
- HAER (1968). *Haddam neck nuclear power plant (Connecticut Yankee Nuclear Power Plant)*. Historic American Engineering Record.
- Hanauer, S.H. (1982). The human factor in nuclear power plant safety: progress since Three Mile Island. *Progress in Nuclear Energy*, 10 (3), 299–347.
- Hassaballa, M.M., y Groszko, W.J. (1986). Spare parts procurement program for Byron/Braidwood nuclear power stations. United States: American Society of Mechanical Engineers.
- Hatheway, A.W. y McClure C.R. (1979). *Geology in the siting of nuclear power plants, reviews in engineering geology, volume IV*. Geological Society of America.
- Herbest, A.M. y Hopley, G.W. (2007). Nuclear Energy Now: why the time has come for the World's most misunderstood energy source. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 14–19.
- Hirsch, H. y Nowotny, H. (1977). Information and opposition in Austrian nuclear energy policy. *Minerva*, 15 (3/4), 316–334.
- Holgado, D. (2016). Analyzing social networks. *Revista Hispana para el Análisis de Redes Sociales*, 27 (2), 141–145.
- HSE (1995). Sizewell B nuclear power station: report of the chief inspector on the basis for the decision to grant consent for full commercial operation. Norwich: Health and Safety Executive.
- HSE (2006). Sizewell B nuclear power station. The findings of NII's assessment of British energy's periodic safety review. Norwich: Health and Safety Executive.
- Hughes, T.P. (1983). *Networks of power*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- IAEA (1968). Power Reactor of the World. *IAEA Bulletin*, 11, 29–35.
- IAEA (1994). *Status of advanced containment systems for next generation water reactors*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2011). *Nuclear Power Reactors in the World*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2015a). *Advanced Large Water Cooled Reactors*. A supplement to the IAEA's Advanced Reactors Information System (ARIS). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA (2015b). *El accidente de Fukushima Daiichi informe del director general*. Viena: Sección Editorial Organismo Internacional de Energía Atómica.
- IAEA (2016a). *Country Nuclear Power Profiles, France*. Recuperado de <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/France/France.htm>
- IAEA (2016b). *Country Nuclear Power Profiles, Germany*. Recuperado de <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/Germany/Germany.htm>

- IAEA (2016c). *Country Nuclear Power Profiles, Islamic Republic of Iran*. Recuperado de <https://cnpp.iaea.org/countryprofiles/IranIslamicRepublicofIranIslamicRepublicof.htm>
- IAEA (2017). Power Reactor Information System. Website International Atomic Energy Agency. Recuperado de <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- Iglesias, I. (2015, 1 de marzo). Raúl López Romo: La sociedad vasca creía que salir contra ETA era de 'fachas'. *Periódico el Mundo, edición digital*. Recuperado de: <http://www.elmundo.es/pais-vasco/2015/03/01/54f2de3722601d13658b456c.html>.
- Imuta, Y. (2000). Changes in the international economy and knowledge-intensive industry. En Sumiya, M. (Ed.): *A History of Japanese Trade and Industry Policy*. Oxford: Oxford University Press.
- Jan, C. y Méndez R. (2006, 21 de octubre). Felipe González propone revisar la moratoria nuclear en España. *Periódico el País, edición impresa*. Recuperado de: [http://elpais.com/diario/2006/10/21/internacional/1161381606\\_850215.html](http://elpais.com/diario/2006/10/21/internacional/1161381606_850215.html).
- Jasper, J.M. (1992). Gods, titans and mortals: patterns of state involvement in nuclear development. *Energy Policy*, 20 (7), 653–659.
- Jeffery, J.W. (1991). The collapse of nuclear power. *Energy Policy*, 19 (5), 418–424.
- Jones, R. (2000). The Price-Anderson Act. *International conference: Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids*, 31 (42), 699–706.
- Kasperson, R.E., Berk, G., Pijawka, D., Sharaf, A.B. y Wood, J. (1980). Public opposition to nuclear energy: retrospect and prospect. *Science, Technology, & Human Values*, 5 (31), 11–23.
- 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 (3), 271–285.
- Kim, H.G. y Choi, K.S. (2009). Design characteristics of advanced power reactor 1400. En IAEA (Ed.): *International Conference on Opportunities and Challenges for Water Cooled Reactors in the 21st Century*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Klein, H.K. y Kleinman, D.L. (2002). The social construction of technology: structural considerations. *Science, Technology, & Human Values*, 27 (1), 28–52.
- Koch, A. y Wolf, J. (1998). Iran's nuclear facilities: a profile. Monterey: Center for International Studies. Recuperado de <http://www.bits.de/public/documents/iran/iranrpt.pdf>
- Koo, B. y Hoon, Y. (2013). High cooling water temperature effects on design and operational safety of NPPS in the Gulf Region. *Nuclear Engineering and Technology*, 45 (7), 961–968.
- Kukkola, T. (1988). A possible finish alternative. *Nuclear Engineering and Design*, 109 (1-2), 155–161.
- Lawler, D (2003). Las funciones técnicas de los artefactos y su encuentro con el constructivismo social en tecnología. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 1 (1), 27–71.

- Lee, S.S., Kim, S.H. y Suh, K.Y. (2009). The design features of the advanced power reactor 1400. *Nuclear Engineering and Technology*, 41 (8), 995–1004.
- Leverenz, R. y Gerhard, L. (2004). The European pressurized water reactor: a safe and competitive solution for future energy needs. *International Conference, Nuclear Energy for New Europe*, 903, 1–7.
- Lewis, F.W. (1981). Nuclear regulation after Three Mile Island. *Progress in Nuclear Energy*, 7 (2), 73–126.
- Levine, S. y Stetson, F.T. (1986). Safety goals for nuclear power plant regulation. *Progress in Nuclear Energy*, 17 (2), 203–229.
- Lovering, J.R., Yip, A. y Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy*, 91, 371–382.
- López, R. y Lanero, D. (2011). Antinucleares y nacionalistas. Conflictividad socioambiental en el País Vasco y la Galicia rurales de la transición. *Historia Contemporánea*, 43 (2), 749–777.
- Lovins, A. (1977). *Soft energy paths: towards a durable peace*. Cambridge: Ballinger Publishing Co.
- Mallard, G. (2010). An anthropological approach to French nuclear power, Gabrielle Hecht: *The Radiance of France: Nuclear Power and National Identity after World War II*. New edition with a foreword by Michel Callon and new afterword by the author. *Metascience*, 19, 469–474.
- Marshall, W. (1983). Technology lecture: design and safety of the Sizewell pressurized water reactor. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 241–251.
- Matzie, R.A. y Ritterbusch, S.E. (1998). Evolutionary design and construction – The System 80+™ solution to the cost-benefit dilemma. *Evolutionary Water-Cooled Reactors: Strategic Issues, Technologies and Economic Viability*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- McCormick, N.J. (1982). Changes in the nuclear power industry after TMI. *Progress in Nuclear Energy*, 10 (3), 245–248.
- Meiswinkel, R., Meyer, J. y Schnell, J. (2013). *Design and construction of nuclear power plants*. Berlín: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Melber, b.d. (1982). The impact of TMI upon the public acceptance of nuclear power. *Progress in Nuclear Energy*, 10 (3), 387–398.
- Mendoza, E. (2004). La energía nuclear en el contexto económico, tecnológico y social de Japón. *Estudios de Asia y África*, 39 (3), 597–622.
- Menéndez, A. (2010). *La legitimación de la energía nuclear en España: el fórum atómico español (192-1979)* (Tesis Doctoral). Instituto de la Paz y Conflictos, departamento de Anat. Pat. e historia de la Ciencia, Universidad de Granada.
- Meyer, G. y Stokke, E. (1997). Description of Sizewell B nuclear power plant, NKS/RAK-2, Halden: Institutt for energiteknikk (IFE). Recuperado de <http://www.nks.org/scripts/getdocument.php?file=111010111119605>
- MHI (2017). History PWR. Recuperado de: [https://www.mhi-global.com/products/category/pressurized\\_water\\_reactor\\_nuclear\\_power\\_plant.html](https://www.mhi-global.com/products/category/pressurized_water_reactor_nuclear_power_plant.html).

- Mizuo, J. (2008). The social responsibility of nuclear energy. *Progress in Nuclear Energy*, 50 (2), 694-699.
- Monforte, C. (2015, 7 de febrero). La moratoria nuclear, aquel rescate financiero de las eléctricas. *Periódico Cinco Días, edición digital*. Recuperado de [http://cincodias.com/cincodias/2015/02/05/empresas/1423161623\\_306949.html](http://cincodias.com/cincodias/2015/02/05/empresas/1423161623_306949.html).
- Montero, R. (1983, 4 de mayo). El mundo subterráneo del grupo 'punk' las Vulpes. *Periódico el País*. Recuperado de: [http://elpais.com/diario/1983/05/04/cultura/420847201\\_850215.html](http://elpais.com/diario/1983/05/04/cultura/420847201_850215.html)
- Morales, J. (2015). *Electrical Generation in Europe*. Switzerland: Springer Science+Business Media.
- Morera, C. (2014). Los primeros momentos de la revolución islámica en el discurso periodístico español (1979). *Revista Internacional de Historia de la Comunicación*, 2 (1), 97–125.
- Moso, R. (2004). *Flores en la basura. Los días del rock radical*. Algorta: Ediciones Hilargi.
- NEA (2011). *Technical and economic aspects of load following with nuclear power plants*. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Co-Operation and Development.
- NEI (2010). Excavating Chooz A. *Nuclear Engineering International*. Recuperado de <http://www.neimagazine.com/features/featureexcavating-chooz-a>
- Nowotny, H. (1980). The role of the experts in developing public policy: The austrian debate on nuclear power. *Science, Technology, & Human Values*, 5 (32), 10–18.
- NRC (2013). Backgrounder on the Three Mile Island accident. Recuperado de <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>.
- NTI (2016). South Korea facilities. Washington: Nuclear Threat Initiative. Recuperado de <http://www.nti.org/learn/countries/south-korea/facilities/>
- Ogburn, W. (1922). *Social change with respect to culture and original nature*. New York : B.W. Huebsch, Inc.
- Oguma, E. (2012). Japan's nuclear power and anti-nuclear movement from a socio-historical perspective. (B. Cary, Trad.). *Towards long-term sustainability: In response to the 3/11 Earthquake and the Fukushima Nuclear Disaster. Working Paper*, Tokio: Center for Japanese Studies, Inst. of East Asian Studies and the Dept. of Anthropology, UC Berkeley. Recuperado de: [http://ieas.berkeley.edu/events/pdf/2012.04.20\\_sustainability\\_oguma\\_en.pdf](http://ieas.berkeley.edu/events/pdf/2012.04.20_sustainability_oguma_en.pdf)
- Ojea, L. (2016). La central nuclear de Fessenheim, la manzana de la discordia entre Francia y Alemania. *Elperiódicodelaenergía.com*, Recuperado de <http://elperiodicodelaenergía.com/la-central-nuclear-de-fessenheim-la-manzana-de-la-discordia-entre-francia-y-alemania/>
- Oka, Y., Uchikawa, S. y Suzuki, K. (2014). Light water reactor design. En Yoshiaki Oka (Ed.): *Nuclear Reactor Design*. Tokio: Springer Science+Business Media.

Olson, G.L., McCardell, R.K. e Illum, D.B. (2002). *Fuel summary report: Shippingport light water breeder reactor*. Idaho: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel.

Olivé, L. (2006). Los desafíos de la sociedad del conocimiento: cultura científico-tecnológica, diversidad cultural y exclusión. *Revista Científica de Información y Comunicación*, 3, 29–51.

ONU (2007). Ítem 040: La cuestión de revisar los programas nucleares en la República Democrática Popular de Corea e Irán. El rol de las Naciones Unidas en la aplicación de sanciones. Comité de Desarme y Seguridad Internacional de las Naciones Unidas, 2–29,

OTA (1984). *Nuclear power in an age of uncertainty*. Washington: U.S. Government Printing Office.

OTA (1990). *Physical vulnerability of electric system to natural disasters and sabotage*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

O'Riordan, T. (1984). The Sizewell B inquiry and a national energy strategy. *The Geographical Journal*, 150 (2), 171–182.

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.

Park, Ch-T. (1992). The experience of nuclear power development in the Republic of Korea growth and future challenge. *Energy Policy*, 20 (8), 721–734.

Peachy, C. (2014). Chinese reactor design evolution. *Nuclear Engineering International*. Recuperado de <http://www.neimagazine.com/features/featurechinese-reactor-design-evolution-4272370/>

Pelinka, A. (1983). The nuclear power referendum in Austria. *Electoral Studies*, 2 (3), 253–261.

Petrick, A.N. (1977). Progress report on the SNUPPS nuclear Stat Ions. Nuclear Engineering International. En Office Technological Assessment (OTA) (Ed.) (1981): *Nuclear Powerplant Standardization: Light Water Reactors*. Washington: U.S. Government Printing Office.

Petroski, H. (1994). *The evolution of useful things*. New York: Vintage Books, a division of Random House, Inc.

Petroski, H. (2007). *La ingeniería es humana, la importancia del fallo en el éxito del diseño*. (M. E. Matamala Trad.). Madrid: Cinter Divulgación Técnica (Trabajo original en inglés, 1992).

Pinch, T. y Bijker, W. (1987). The Social Construction of Facts and Artifacts: or how the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other. En Bijker, W., Hughes, T.P. y Pinch, T. (Ed.) (1987). *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Society and History of Technology*. Cambridge: MIT Press.

Pressman, G. (2011). Remembering when the lights went out in 1965. *NBC New York*, Recuperado de <http://www.nbcnewyork.com/news/local/When-the-Lights-Went-Out-in-1965-133488738.html>

- Purdue, M., Kemp, R. y O'Riordan, T. (1984). The context and conduct of the Sizewell B inquiry. *Energy Policy*, 12 (3), 276–282.
- Quintanilla, M.A. (1988). Bases para la filosofía de la técnica (La estructura de los sistemas técnicos. *Arbor*, 507, 11–28.
- Quintanilla, M.A. (2002). Tecnología y Cultura. En E. Aibar y M. A. Quintanilla, *Cultura y Tecnología. Estudios de Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 15–38. Barcelona: Horsori.
- Radulescu, L. y Pavelescu, M. (2009). Technological transfer from research nuclear reactors to new generation nuclear power reactors. *CPI203, 7th International Conference of the Balkan Physical Union*, 1418–1823.
- Rankin, J. (2016, 27 de julio). Flamanville: France's beleaguered forerunner to Hinkley Point C. *The Guardian*. Recuperado de <https://www.theguardian.com/environment/2016/jul/27/flamanville-france-edf-nuclear-reactor-hinkley-point-c>
- Requena, F. (1989). El concepto de red social. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 48, 137–152.
- Revista Rolling Stone (2012). Canciones antinucleares en español. Recuperado de <http://rollingstone.es/noticias/canciones-antinucleares-en-espanol/>
- Rippon, S. (1984). History of the PWR and its worldwide development. *Energy Policy*, 12 (3), 259–265.
- Rippon, S. (1999). Doing it right: The Loviisa way. *Nuclear News*, 42 (11), 29–35.
- Rochlin, G.I. (1999). Safe operation as a social construct. *Ergonomics*, 42 (11), 1549–1560.
- Rodríguez, I. (2011). La tesis de los límites físicos del crecimiento: una revisión a los informes del Club de Roma. *Perspectivas. Revista de Análisis de Economía, Comercio y Negocios Internacionales*, 5 (2), 75–103.
- Rodríguez, S. (1999). *El NO-DO, catecismo social de una época*. Madrid: Editorial Complutense.
- Roucek, J.S. (1972). La nueva política económica del presidente Nixon. *Revista de Política Internacional*, 119, 59–89.
- Rouellé, P. (1999). The French nuclear power plant reactor building containment improving confinement performance with the latest civil Works technics for structure integrity, dynamic behaviour and seismic design. *7th International Conference on Nuclear Engineering*, 1–10.
- Ryzhov, S.B., Mokhov, V.A., Nikitenko, M.P., Bessalov, G.G., Podshibyakin, A.K., Anufriev, D.A., Gado, J. y Rohde, U. (2010). VVER-Type reactors of Russian design. En Dan Gabriel Cacuci (Ed.): *Handbook of Nuclear Engineering, Volume 4 Reactor of Generations III and IV*. New York: Springer Science+Business Media.
- Safer, D. y Barczak, S. (2015, 8 de octubre). Watts Bar Unit 2, last old reactor of the 20th century: a cautionary tale. *Bulletin of the Atomic Scientist*. Recuperado de: <http://thebulletin.org/watts-bar-unit-2-last-old-reactor-20th-century-cautionary-tale8783>

- Sánchez, L. (2010). *La legitimación de la energía nuclear en España: el fórum atómico español (1962-1979)* (Tesis Doctoral). Instituto de la Paz y los Conflictos. Departamentos de Anatomía, Patología e Historia de la Ciencia. Editorial de la Universidad de Granada.
- Sánchez, L. (2011). Conflictos socioambientales en torno a la energía nuclear. *Perspectivas desde la Investigación para la Paz, Revista de Paz y Conflictos*, 4, 1–21.
- Sánchez, L. y Menéndez, A. (2015). Nuclear energy in the public sphere: anti-nuclear movements vs. industrial lobbies in Spain (1962–1979). *Minerva, a Review of Science, Learning and Policy*, 53, 69–88.
- Schaefer, A. (1990). Nuclear power in Germany. In *Proceedings of the First MIT International Conference on the Next Generation of Nuclear Power Technology*, 4, 2–4.
- Schatz, A., Richard, C.C. y Stürmer, W. (1976). Standardization of nuclear power plants-its difficulties in the international market. *Annals of Nuclear Energy*, 3, 191–196.
- Schneider, R. y Wirtz, P. (1991). Adaptation of a pressurized water reactor of American design to the requirements of the German standards program and licensing procedure. *Nuclear Engineering and Design*, 127, 173–17.
- Scholten, V. y Seidelberger, H. (1988). The KWU convoy concept: expectations and achievements during project implementation. *Nuclear Power Performance and Safety*, 2, 3–12.
- Semenov, B.A. (1983). Nuclear power in the Soviet Union. *IAEA Bulletin*, 25 (2), 47–59.
- Shrader-Frechette, K. (1980). *Nuclear power and public policy. The social and ethical problems of fission technology*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Siltanen, S., Routamo, T., Tuomisto, H. y Lundström, P. (2005). *Severe accident management at the Loviisa NPP – Application of Integrated ROAAM and PSA Level 2*. Nuclear Energy Agency (NEA). Session IV: Applications to Uncertainty Assessment in Level 2 PSA.
- Sotoodehnia, A. (1977). Implementation of nuclear energy in Iran. *Annals of Nuclear Energy*, 4 (6-8), 279–282.
- Spangler, M.B. (1974). Environmental and social issues of site choice for nuclear power plants. *Energy Policy*, 2 (1), 18–32.
- Steinhäusler, F. (2008). Countering security risks to nuclear power plant. *International Symposium on the Peaceful Applications of Nuclear Technology in the GCC Countries, Nuclear Power, Session 5 (4)*.
- Stokes, R.G. (1991). Technology and the West German wirtschaftswunder. *Technology and Culture*, 32 (1), 1–22.
- ST&HV (1980). Three Mile Island on Film. *Science, Technology, & Human Values*, 5 (31), 39.
- Surrey, J. y Huggett, Ch. (1976). Opposition to nuclear power, a review of international experience. *Energy Policy*, 4 (4), 286–307.
- Svedin, U. (1975). Sweden's energy debate. The nuclear controversy. *Energy Policy*, 3 (3), 258–261.



Tabares, J. y Correa, S. (2014). Tecnología y sociedad: una aproximación a los estudios sociales de la tecnología. *Revista CTS*, 26 (9), 129–144.

TIME (1979). Three Mile Island: nuclear nightmare. *Magazine Time*, 113, 15. Recuperado de <http://content.time.com/time/magazine/article/0,9171,920196,00.html>

Thomson, E. (2011). China's nuclear energy in light of the disaster in Japan. *Eurasian Geography and Economics*, 52 (4), 464–482.

Unzueta, P. (1981, 6 de febrero). 10.000 personas se manifiestan en Bilbao para pedir la libertad de José María Ryan. *Periódico el País, edición impresa*. Recuperado de <http://www.march.es/ceacs/biblioteca/proyectos/linz/Documento.asp?Reg=r-71140>.

Urdangarin, C. (2013, 7 de agosto). El movimiento antinuclear cumple 50 años. *Diario Vasco*. Recuperado de: <http://www.diariovasco.com/20130807/local/bajo-deba/movimiento-anti-nuclear-cumple-201308070841.html>.

Urevbu, A.O. (1997). Culture and technology: a study on the 1997 theme. *World Decade for Cultural Development Secretariat*. Paris: UNESCO.

Uriona, A. (2013, 17 de diciembre). .El tabú de Lemóniz. *Periódico eldiario.es, edición digital*. Recuperado de: [http://www.eldiario.es/norte/euskadi/tabu-Lemoiz\\_0\\_204030317.html](http://www.eldiario.es/norte/euskadi/tabu-Lemoiz_0_204030317.html).

Valderrama, A. (2004). Teoría y crítica de la construcción social de la tecnología. *Revista Colombiana de Sociología*, 23, 271–233.

Valverde, A. (1982, 18 de febrero). El Gobierno vasco quiere crear una entidad autónoma de energía dentro del 'paquete' de negociaciones sobre Lemóniz. *Periódico el País, edición impresa*. Recuperado de [http://elpais.com/diario/1982/02/18/economia/382834804\\_850215.html](http://elpais.com/diario/1982/02/18/economia/382834804_850215.html).

Vega, R. y Pérez, C. (2000). Radical unionism and the workers' struggle in Spain. *Latin American Perspectives*, 27 (5), 111–133.

Viana, I. (2011, 16 de agosto). Franco y el nacimiento de las centrales nucleares en España. *Hemeroteca Periódico ABC*. Recuperado de <http://www.abc.es/20110318/archivo/abci-franco-centrales-nucleares-espaa-201103172157.html>

Vilarós, T.M. (2004). El baño del ministro y el embajador: Fraga y Duke en Palomares, 1966. *Res Publica*, 13 (14), 247–262.

Vincenti, W.G. (2000). Real-world variation-selection in the evolution of technological forma: historical examples. En J. Ziman (Ed.): *Technological Innovation as an Evolutionary Process*. Cambridge: Cambridge University Press.

Walker, J.S. (2004). *Three Mile Island: a nuclear crisis in historical perspective*. California: University of California Press.

Winner, L. (2008). *La Ballena y el reactor*. (E.B. Casals, Trad.). Barcelona: Ed. Gedisa S.A (Trabajo original en inglés, 1986).

Wirtz, P. (1987). The erection and commissioning Mülheim-Kärlich nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design*, 100 (3), 297–306.

WNA (2011). Nuclear power reactor characteristics. *WNA Pocket Guide*. London: World Nuclear Association.

WNA (2012). Three Mile Island accident. Recuperado de <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/three-mile-island-accident.aspx>

WNA (2016). Nuclear power in Iran. World Nuclear Association, Country Profiles. Recuperado de <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/iran.aspx>

WNA (2017a). Nuclear power in Germany. Recuperado de: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspxpower.aspx>

WNA (2017b). Nuclear power in Japan. Recuperado de <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>

WNN (2016). First Taishan EPR completes cold tests. Recuperado de <http://www.world-nuclear-news.org/NN-First-Taishan-EPR-completes-cold-tests-0102164.html>

Zaccara, L. (2006). Irán y la cuestión nuclear. *Política Exterior*, 109, 113–121.

Zaccara, L. (2009). Irán, cronología básica Siglos XX y XXI, Irán, 30 aniversario de la revolución. *Revista Culturas*, 3, 4–7.

