

ENERGIA NUCLEAR

Fundamentos, reactores, residuos

Contenidos

Artículos

Energía nuclear	1
Reactor nuclear	31
Radiación de Cherenkov	36
Fisión nuclear	38
Uranio	41
Uranio-235	48
Plutonio	50
Torio	52
Radiactividad	56
Partícula alfa	64
Rayos gamma	65
Periodo de semidesintegración	70
Residuo radiactivo	72
Cementerio nuclear	74
Abandono de la energía nuclear	78
Desmantelamiento de instalaciones nucleares	100

Referencias

Fuentes y contribuyentes del artículo	103
Fuentes de imagen, Licencias y contribuyentes	104

Licencias de artículos

Licencia	106
----------	-----

Energía nuclear

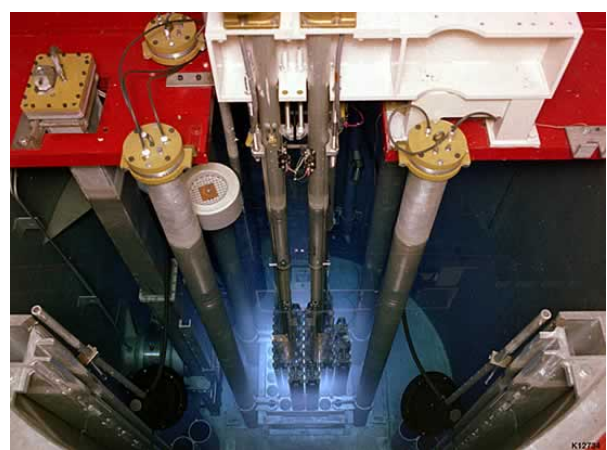
La **energía nuclear** o **energía atómica** es la energía que se libera espontánea o artificialmente en las reacciones nucleares. Sin embargo, este término engloba otro significado, el aprovechamiento de dicha energía para otros fines, tales como la obtención de energía eléctrica, térmica y mecánica a partir de reacciones atómicas, y su aplicación, bien sea con fines pacíficos o bélicos.^[1] Así, es común referirse a la energía nuclear no solo como el resultado de una reacción sino como un concepto más amplio que incluye los conocimientos y técnicas que permiten la utilización de esta energía por parte del ser humano.

Estas reacciones se dan en los núcleos de algunos isótopos de ciertos elementos químicos, siendo la más conocida la fisión del uranio-235 (^{235}U), con la que funcionan los reactores nucleares, y la más habitual en la naturaleza, en el interior de las estrellas, la fusión del par deuterio-tritio (^2H - ^3H). Sin embargo, para producir este tipo de energía aprovechando reacciones nucleares pueden ser utilizados muchos otros isótopos de varios elementos químicos, como el torio-232, el plutonio-239, el estroncio-90 o el polonio-210 (^{232}Th , ^{239}Pu , ^{90}Sr , ^{210}Po ; respectivamente).

Existen varias disciplinas y técnicas que usan de base la energía nuclear y van desde la generación de electricidad en las centrales nucleares hasta las técnicas de análisis de datación arqueológica (arqueometría nuclear), la medicina nuclear usada en los hospitales, etc.

Los dos sistemas más investigados y trabajados para la obtención de energía aprovechable a partir de la energía nuclear de forma masiva son la fisión nuclear y la fusión nuclear. La energía nuclear puede transformarse de forma descontrolada, dando lugar al armamento nuclear; o controlada en reactores nucleares en los que se produce energía eléctrica, energía mecánica o energía térmica. Tanto los materiales usados como el diseño de las instalaciones son completamente diferentes en cada caso.

Otra técnica, empleada principalmente en pilas de mucha duración para sistemas que requieren poco



Núcleo de un reactor nuclear de fisión de investigación TRIGA.
Puede apreciarse la radiación Cherenkov, en azul.



Central nuclear de Ikata, con tres reactores de agua a presión (PWR).
La refrigeración se realiza mediante un intercambio de agua con el océano.

consumo eléctrico, es la utilización de generadores termoeléctricos de radioisótopos (GTR, o *RTG* en inglés), en los que se aprovechan los distintos modos de desintegración para generar electricidad en sistemas de termopares a partir del calor transferido por una fuente radiactiva.

La energía desprendida en esos procesos nucleares suele aparecer en forma de partículas subatómicas en movimiento. Esas partículas, al frenarse en la materia que las rodea, producen energía térmica. Esta energía térmica se transforma en energía mecánica utilizando motores de combustión externa, como las turbinas de vapor. Dicha energía mecánica puede ser empleada en el transporte, como por ejemplo en los buques nucleares; o para la generación de energía eléctrica en centrales nucleares.

La principal característica de este tipo de energía es la alta calidad de la energía que puede producirse por unidad de masa de material utilizado en comparación con cualquier otro tipo de energía conocida por el ser humano, pero sorprende la poca eficiencia del proceso, ya que se desaprovecha entre un 86 y 92% de la energía que se libera.^[2]

Historia



Planta de energía nuclear Susquehanna, con dos reactores de agua en ebullición (*BWR*). La refrigeración se realiza en circuito cerrado mediante dos torres de refrigeración que emiten vapor de agua.



Central nuclear de Lemóniz (España) cuya puesta en marcha fue abandonada por la actividad terrorista de ETA

Las reacciones nucleares

En 1896 Henri Becquerel descubrió que algunos elementos químicos emitían radiaciones.^[3] Tanto él como Marie Curie y otros estudiaron sus propiedades, descubriendo que estas radiaciones eran diferentes de los ya conocidos Rayos X y que poseían propiedades distintas, denominando a los tres tipos que consiguieron descubrir alfa, beta y gamma.

Pronto se vio que todas ellas provenían del núcleo atómico que describió Rutherford en 1911.

Con el descubrimiento del neutrino, partícula descrita teóricamente en 1930 por Pauli pero no detectada hasta 1956 por Clyde Cowan y sus colaboradores, se pudo explicar la radiación beta.

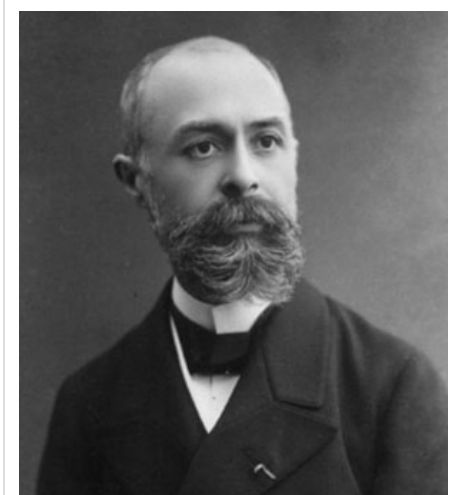
En 1932 James Chadwick descubrió la existencia del neutrón que Wolfgang Pauli había predicho en 1930, e inmediatamente después Enrico Fermi descubrió que ciertas radiaciones emitidas en fenómenos no muy comunes de desintegración eran en realidad estos neutrones.

Durante los años 1930, Enrico Fermi y sus colaboradores bombardearon con neutrones más de 60 elementos, entre ellos ^{235}U , produciendo las primeras fisiones nucleares artificiales. En 1938, en Alemania, Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann verificaron los experimentos de Fermi y en 1939 demostraron que parte de los productos que aparecían al llevar a cabo estos experimentos con uranio eran núcleos de bario. Muy pronto llegaron a la conclusión de que eran resultado de la división de los núcleos del uranio. Se había llevado a cabo el descubrimiento de la fisión.

En Francia, Joliot Curie descubrió que además del bario, se emitían neutrones secundarios en esa reacción, haciendo factible la reacción en cadena.

También en 1932 Mark Oliphant teorizó sobre la fusión de núcleos ligeros (de hidrógeno), describiendo poco después Hans Bethe el funcionamiento de las estrellas basándose en este mecanismo.

Véanse también: Radiactividad, Fuerzas nucleares y procesos nucleares



Henri Becquerel.

La fisión nuclear



De izda. a dcha.: J. Robert Oppenheimer, Enrico Fermi y Ernest Lawrence.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el Departamento de Desarrollo de Armamento de la Alemania Nazi desarrolló un proyecto de energía nuclear (Proyecto Uranio) con vistas a la producción de un artefacto explosivo nuclear. Albert Einstein, en 1939, firmó una carta al presidente Franklin Delano Roosevelt de los Estados Unidos, escrita por Leó Szilárd, en la que se prevenía sobre este hecho.^[4]

El 2 de diciembre de 1942, como parte del proyecto Manhattan dirigido por J. Robert Oppenheimer, se construyó el primer reactor del mundo hecho por el ser humano (existió un reactor natural en Oklo): el Chicago Pile-1 (CP-1).

Como parte del mismo programa militar, se construyó un reactor mucho mayor en Hanford, destinado a la producción de plutonio, y al mismo tiempo, un proyecto de enriquecimiento de uranio en cascada. El 16 de julio de 1945 fue probada la primera bomba nuclear (nombre en clave Trinity) en el desierto de Alamogordo. En esta prueba se llevó a cabo una explosión equivalente a 19.000.000 de kg de TNT (19 kilotones), una potencia jamás observada anteriormente en ningún otro explosivo. Ambos proyectos desarrollados finalizaron con la construcción de dos bombas, una de uranio enriquecido y una de plutonio (Little Boy y Fat Man) que fueron lanzadas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima (6 de agosto de 1945) y Nagasaki (9 de agosto de 1945) respectivamente. El 15 de agosto de 1945 acabó la segunda guerra mundial en el Pacífico con la rendición de Japón. Por su parte el programa de armamento nuclear alemán (liderado este por Werner Heisenberg), no alcanzó su meta antes de la rendición de Alemania el 8 de mayo de 1945.

Posteriormente se llevaron a cabo programas nucleares en la Unión Soviética (primera prueba de una bomba de fisión el 29 de agosto de 1949), Francia y Gran Bretaña, comenzando la carrera armamentística en ambos bloques creados tras la guerra, alcanzando límites de potencia destructiva nunca antes sospechada por el ser humano (cada bando podía derrotar y destruir varias veces a todos sus enemigos).

Ya en la década de 1940, el almirante Hyman Rickover propuso la construcción de reactores de fisión no encaminados esta vez a la fabricación de material para bombas, sino a la generación de electricidad. Se pensó, acertadamente, que estos reactores podrían constituir un gran sustituto del diésel en los submarinos. Se construyó el primer reactor de prueba en 1953, botando el primer submarino nuclear (el USS Nautilus (SSN-571)) el 17 de enero de 1955 a las 11:00. El Departamento de Defensa estadounidense propuso el diseño y construcción de un reactor nuclear utilizable para la generación eléctrica y propulsión en los submarinos a dos empresas distintas norteamericanas: General Electric y Westinghouse. Estas empresas desarrollaron los reactores de agua ligera tipo BWR y PWR respectivamente.

Estos reactores se han utilizado para la propulsión de buques, tanto de uso militar (submarinos, cruceros, portaaviones,...) como civil (rompehielos y cargueros), donde presentan potencia, reducción del tamaño de los motores, reducción en el almacenamiento de combustible y autonomía no mejorados por ninguna otra técnica existente.

Los mismos diseños de reactores de fisión se trasladaron a diseños comerciales para la generación de electricidad. Los únicos cambios producidos en el diseño con el transcurso del tiempo fueron un aumento de las medidas de seguridad, una mayor eficiencia termodinámica, un aumento de potencia y el uso de las nuevas tecnologías que fueron apareciendo.

Entre 1950 y 1960 Canadá desarrolló un nuevo tipo, basado en el PWR, que utilizaba agua pesada como moderador y uranio natural como combustible, en lugar del uranio enriquecido utilizado por los diseños de agua ligera. Otros diseños de reactores para su uso comercial utilizaron carbono (Magneox, AGR, RBMK o PBR entre otros) o sales fundidas (litio o berilio entre otros) como moderador. Este último tipo de reactor fue parte del diseño del primer avión bombardero (1954) con propulsión nuclear (el US Aircraft Reactor Experiment o ARE). Este diseño se abandonó tras el desarrollo de los misiles balísticos intercontinentales (ICBM).

Otros países (Francia, Italia, entre otros) desarrollaron sus propios diseños de reactores nucleares para la generación eléctrica comercial.

En 1946 se construyó el primer reactor de neutrones rápidos (*Clementine*) en Los Álamos, con plutonio como combustible y mercurio como refrigerante. En 1951 se construyó el EBR-I, el primer reactor rápido con el que se consiguió generar electricidad. En 1996, el Superfénix o SPX, fue el reactor rápido de mayor potencia construido hasta el momento (1200 MWe). En este tipo de reactores se pueden utilizar como combustible los radioisótopos del plutonio, el torio y el uranio que no son fisibles con neutrones térmicos (lentos).

En la década de los 50 Ernest Lawrence propuso la posibilidad de utilizar reactores nucleares con geometrías inferiores a la criticidad (reactores subcríticos cuyo combustible podría ser el torio), en los que la reacción sería soportada por un aporte externo de neutrones. En 1993 Carlo Rubbia propone utilizar una instalación de espalación

en la que un acelerador de protones produjera los neutrones necesarios para mantener la instalación. A este tipo de sistemas se les conoce como *Sistemas asistidos por aceleradores* (en inglés *Accelerator driven systems*, ADS sus siglas en inglés), y se prevé que la primera planta de este tipo (MYRRHA) comience su funcionamiento entre el 2016 y el 2018 en el centro de Mol (Bélgica).^[5]

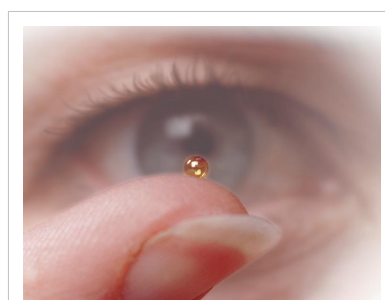
La fusión nuclear

Hasta el principio del s.XX no se entendió la forma en que se generaba energía en el interior de las estrellas para contrarrestar el colapso gravitatorio de estas. No existía reacción química con la potencia suficiente y la fisión tampoco era capaz. En 1938 Hans Bethe logró explicarlo mediante reacciones de fusión, con el ciclo CNO, para estrellas muy pesadas. Posteriormente se descubrió el ciclo protón-protón para estrellas de menor masa, como el Sol.

En los años 1940, como parte del proyecto Manhattan, se estudió la posibilidad del uso de la fusión en la bomba nuclear. En 1942 se investigó la posibilidad del uso de una reacción de fisión como método de ignición para la principal reacción de fusión, sabiendo que podría resultar en una potencia miles de veces superior. Sin embargo, tras finalizar la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de una bomba de estas características no fue considerado primordial hasta la explosión de la primera bomba atómica rusa en 1949, RDS-1 o *Joe-1*. Este evento provocó que en 1950 el presidente estadounidense Harry S. Truman anunciara el comienzo de un proyecto que desarrollara la bomba de hidrógeno. El 1 de noviembre de 1952 se probó la primera bomba nuclear (nombre en clave *Mike*, parte de la *Operación Ivy* o Hiedra), con una potencia equivalente a 10.400.000.000 de kg de TNT (10,4 megatonnes). El 12 de agosto de 1953 la Unión Soviética realiza su primera prueba con un artefacto termonuclear (su potencia alcanzó algunos centenares de kilotonnes).

Las condiciones que eran necesarias para alcanzar la ignición de un reactor de fusión controlado, sin embargo, no fueron derivadas hasta 1955 por John D. Lawson.^[6] Los criterios de Lawson definieron las condiciones mínimas necesarias de tiempo, densidad y temperatura que debía alcanzar el combustible nuclear (núcleos de hidrógeno) para que la reacción de fusión se mantuviera. Sin embargo, ya en 1946 se patentó el primer diseño de reactor termonuclear.^[7] En 1951 comenzó el programa de fusión de Estados Unidos, sobre la base del stellarator. En el mismo año comenzó en la Unión Soviética el desarrollo del primer Tokamak, dando lugar a sus primeros experimentos en 1956. Este último diseño logró en 1968 la primera reacción termonuclear cuasi-estacionaria jamás conseguida, demostrándose que era el diseño más eficiente conseguido hasta la época. ITER, el diseño internacional que tiene fecha de comienzo de sus operaciones en el año 2016 y que intentará resolver los problemas existentes para conseguir un reactor de fusión de confinamiento magnético, utiliza este diseño.

En 1962 se propuso otra técnica para alcanzar la fusión basada en el uso de láseres para conseguir una implosión en pequeñas cápsulas llenas de combustible nuclear (de nuevo núcleos de hidrógeno). Sin embargo hasta la década de los 70 no se desarrollaron láseres suficientemente potentes. Sus inconvenientes prácticos hicieron de esta una opción secundaria para alcanzar el objetivo de un reactor de fusión. Sin embargo, debido a los tratados internacionales que prohibían la realización de ensayos nucleares en la atmósfera, esta opción (básicamente microexplosiones termonucleares) se convirtió en un excelente laboratorio de ensayos para los militares, con lo que consiguió financiación para su continuación. Así se han construido el National Ignition Facility (NIF, con inicio de sus pruebas programadas para 2010) estadounidense y el Láser Megajoule (LMJ, que será completado en el 2010) francés, que persiguen el mismo objetivo de conseguir un dispositivo que consiga mantener la reacción de fusión a partir de este diseño. Ninguno de los proyectos de investigación actualmente en marcha predicen una ganancia de energía significativa, por lo que está previsto un proyecto posterior que pudiera dar lugar a los primeros reactores de fusión comerciales (DEMO para el confinamiento magnético e HiPER para el confinamiento inercial).



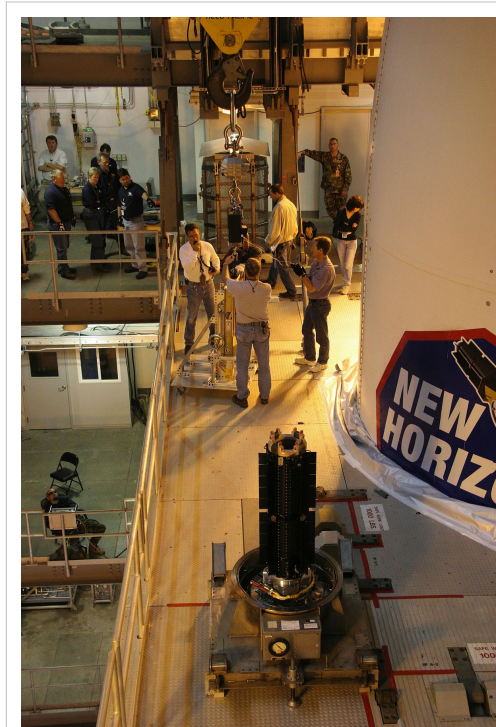
Cápsula de combustible preparada para el reactor de fusión de confinamiento inercial NIF, rellena de deuterio y tritio.

Otros sistemas de energía nuclear

Con la invención de la pila química por Volta en 1800 se dio lugar a una forma compacta y portátil de generación de energía. A partir de entonces fue incesante la búsqueda de sistemas que fueran aun menores y que tuvieran una mayor capacidad y duración. Este tipo de pilas, con pocas variaciones, han sido suficientes para muchas aplicaciones diarias hasta nuestros tiempos. Sin embargo, en el siglo XX surgieron nuevas necesidades, a causa principalmente de los programas espaciales. Se precisaban entonces sistemas que tuvieran una duración elevada para consumos eléctricos moderados y un mantenimiento nulo. Surgieron varias soluciones (como los paneles solares o las células de combustible), pero según se incrementaban las necesidades energéticas y aparecían nuevos problemas (las placas solares son inútiles en ausencia de luz solar), se comenzó a estudiar la posibilidad de utilizar la energía nuclear en estos programas.

A mediados de la década de los 50 comenzaron en Estados Unidos las primeras investigaciones encaminadas a estudiar las aplicaciones nucleares en el espacio. De estas surgieron los primeros prototipos de los *generadores termoeléctricos de radioisótopos* (RTG). Estos dispositivos mostraron ser una alternativa sumamente interesante tanto en las aplicaciones espaciales como en aplicaciones terrestres específicas. En estos artefactos se aprovechan las desintegraciones alfa y beta, convirtiendo toda o gran parte de la energía cinética de las partículas emitidas por el núcleo en calor. Este calor es después transformado en electricidad aprovechando el efecto Seebeck mediante unos termopares, consiguiendo eficiencias aceptables (entre un 5 y un 40% es lo habitual). Los radioisótopos habitualmente utilizados son ^{210}Po , ^{244}Cm , ^{238}Pu , ^{241}Am , entre otros 30 que se consideraron útiles. Estos dispositivos consiguen capacidades de almacenamiento de energía 4 órdenes de magnitud superiores (10.000 veces mayor) a las baterías convencionales.

En 1959 se mostró al público el primer *generador atómico*.^[8] En 1961 se lanzó al espacio el primer RTG, a bordo del SNAP 3. Esta batería nuclear, que alimentaba a un satélite de la armada norteamericana con una potencia de 2,7 W, mantuvo su funcionamiento ininterrumpido durante 15 años.



RTG del New Horizons (en el centro abajo, en negro), misión no tripulada a Plutón. La sonda fue lanzada en enero de 2006 y alcanzará su objetivo en julio de 2015.

Estos sistemas se han utilizado y se siguen usando en programas espaciales muy conocidos (Pioneer, Voyager, Galileo, Apolo y Ulises entre otros). Así por ejemplo en 1972 y 1973 se lanzaron los Pioneer 10 y 11, convirtiéndose el primero de ellos en el primer objeto humano de la historia que abandonaba el sistema solar. Ambos satélites continuaron funcionando hasta 17 años después de sus lanzamientos.

La misión Ulises (misión conjunta ESA-NASA) se envió en 1990 para estudiar el Sol, siendo la primera vez que un satélite cruzaba ambos polos solares. Para poder hacerlo hubo que enviar el satélite en una órbita alrededor de Júpiter. Debido a la duración del RTG que mantiene su funcionamiento se prolongó la misión de modo que se pudiera volver a realizar otro viaje alrededor del Sol. Aunque pareciera extraño que este satélite no usara paneles solares en lugar de un RTG, puede entenderse al comparar sus pesos (un panel de 544 kg generaba la misma potencia que un RTG de 56). En aquellos años no existía un cohete que pudiera enviar a su órbita al satélite con ese peso extra.

Estas baterías no solo proporcionan electricidad, sino que en algunos casos, el propio calor generado se utiliza para evitar la congelación de los satélites en viajes en los que el calor del Sol no

es suficiente, por ejemplo en viajes fuera del sistema solar o en misiones a los polos de la Luna.

En 1966 se instaló el primer RTG terrestre en la isla deshabitada Fairway Rock, permaneciendo en funcionamiento hasta 1995, momento en el que se desmanteló. Otros muchos faros situados en zonas inaccesibles cercanas a los polos (sobre todo en la Unión Soviética), utilizaron estos sistemas. Se sabe que la Unión Soviética fabricó más de 1000 unidades para estos usos.

Una aplicación que se dio a estos sistemas fue su uso como marcapasos.^[9] Hasta los 70 se usaba para estas aplicaciones baterías de mercurio-zinc, que tenían una duración de unos 3 años. En esta década se introdujeron las baterías nucleares para aumentar la longevidad de estos artefactos, posibilitando que un paciente joven tuviera implantado solo uno de estos artefactos para toda su vida. En los años 1960, la empresa Medtronic contactó con Alcatel para diseñar una batería nuclear, implantando el primer marcapasos alimentado con un RTG en un paciente en 1970 en París. Varios fabricantes construyeron sus propios diseños, pero a mediados de esta década fueron desplazados por las nuevas baterías de litio, que poseían vidas de unos 10 años (considerado suficiente por los médicos aunque debiera sustituirse varias veces hasta la muerte del paciente). A mediados de los años 1980 se detuvo el uso de estos implantes, aunque aún existen personas que siguen portando este tipo de dispositivos.

Fundamentos físicos

Sir James Chadwick descubrió el neutrón en 1932, año que puede considerarse como el inicio de la física nuclear moderna.^[10]

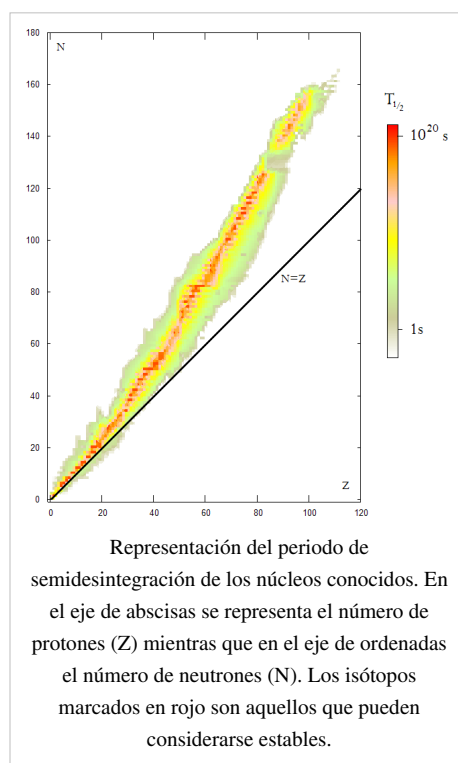
El modelo de átomo propuesto por Niels Bohr consiste en un núcleo central compuesto por partículas que concentran la práctica mayoría de la masa del átomo (neutrones y protones), rodeado por varias capas de partículas cargadas casi sin masa (electrones). Mientras que el tamaño del átomo resulta ser del orden del angstrom (10^{-10} m), el núcleo puede medirse en fermis (10^{-15} m), o sea, el núcleo es 100.000 veces menor que el átomo.

Todos los átomos neutros (sin carga eléctrica) poseen el mismo número de electrones que de protones. Un elemento químico se puede identificar de forma inequívoca por el número de protones que posee su núcleo; este número se llama número atómico (Z). El número de neutrones (N) sin embargo puede variar para un mismo elemento. Para valores bajos de Z ese número tiende a ser muy parecido al de protones, pero al aumentar Z se necesitan más neutrones para mantener la estabilidad del núcleo. A los átomos a los que solo les distingue el número de neutrones en su núcleo (en definitiva, su masa), se les llama isótopos de un mismo elemento. La masa atómica de un isótopo viene dada por $A = Z + N$ u, el número de protones más el de neutrones (nucleones) que posee en su núcleo.

Para denominar un isótopo suele utilizarse la letra que indica el elemento químico, con un superíndice que es la masa atómica y un subíndice que es el número atómico (p. ej. el isótopo 238 del uranio se escribiría como ${}^{238}_{92}\text{U}$).

El núcleo

Los neutrones y protones que forman los núcleos tienen una masa aproximada de 1 u, estando el protón cargado eléctricamente con carga positiva +1, mientras que el neutrón no posee carga eléctrica. Teniendo en cuenta únicamente la existencia de las fuerzas electromagnética y gravitatoria, el núcleo sería inestable (ya que las partículas de igual carga se repelerían deshaciendo el núcleo), haciendo imposible la existencia de la materia. Por este motivo (ya que es obvio que la materia existe) fue necesario añadir a los modelos una tercera fuerza: la fuerza fuerte (hoy en día *fuerza nuclear fuerte residual*). Esta fuerza debía tener como características, entre otras, que era



muy intensa, atractiva a distancias muy cortas (solo en el interior de los núcleos), siendo repulsiva a distancias más cortas (del tamaño de un nucleón), que era central en cierto rango de distancias, que dependía del espín y que no dependía del tipo de nucleón (neutrones o protones) sobre el que actuaba. En 1935, Hideki Yukawa dio una primera solución a esta nueva fuerza estableciendo la hipótesis de la existencia de una nueva partícula: el mesón. El más ligero de los mesones, el pion, es el responsable de la mayor parte del potencial entre nucleones de largo alcance (1 fm). El potencial de Yukawa (potencial OPEP) que describe adecuadamente la interacción para dos partículas de espines s_1 y s_2 respectivamente, se puede escribir como:

$$V(r) = \frac{g_\pi^2 (m_\pi c^2)^3}{3(Mc^2)^2 \hbar^2} \left[s_1 s_2 + S_{12} \mathbf{1} + \frac{3R}{r} + \frac{3R^2}{r^2} \right] \frac{e^{-\frac{r}{R}}}{\frac{r}{R}}$$

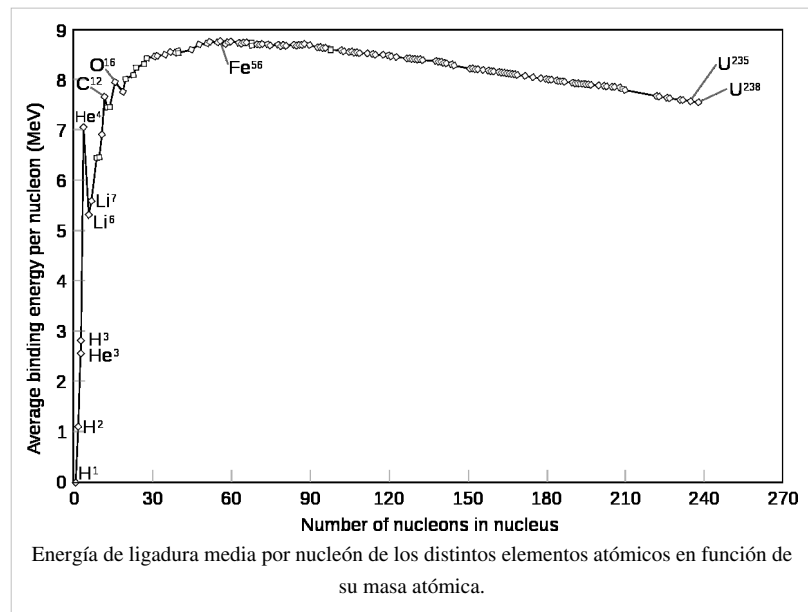
Otros experimentos que se realizaron sobre los núcleos indicaron que su forma debía de ser aproximadamente esférica de radio $R = 1,5 \cdot A^{1/3}$ fm, siendo A la masa atómica, es decir, la suma de neutrones y protones. Esto exige además que la densidad de los núcleos sea la misma ($V \propto R^3 \propto A$, es decir el volumen es proporcional a A . Como la densidad se halla dividiendo la masa por el volumen $\rho = \frac{A}{V} = cte$). Esta característica llevó a la equiparación de los núcleos con un líquido, y por tanto al modelo de la gota líquida, fundamental en la comprensión de la fisión de los núcleos.

La masa de un núcleo, sin embargo, no resulta exactamente de la suma de sus nucleones. Tal y como demostró Albert Einstein, la energía que mantiene unidos a esos nucleones se observa como una diferencia en la masa del núcleo, de forma que esa diferencia viene dada por la ecuación $E = m \cdot c^2$. Así, pesando los distintos átomos por una parte, y sus componentes por otra, puede determinarse la energía media por nucleón que mantiene unidos a los diferentes núcleos.

En la gráfica puede contemplarse como los núcleos muy ligeros poseen menos

energía de ligadura que los que son un poquito más pesados (la parte izquierda de la gráfica). Esta característica es la base de la liberación de la energía en la fusión. Y al contrario, en la parte de la derecha se ve que los muy pesados tienen menor energía de ligadura que los que son algo más ligeros. Esta es la base de la emisión de energía por fisión. Como se ve, es mucho mayor la diferencia en la parte de la izquierda (fusión) que en la de la derecha (fisión).

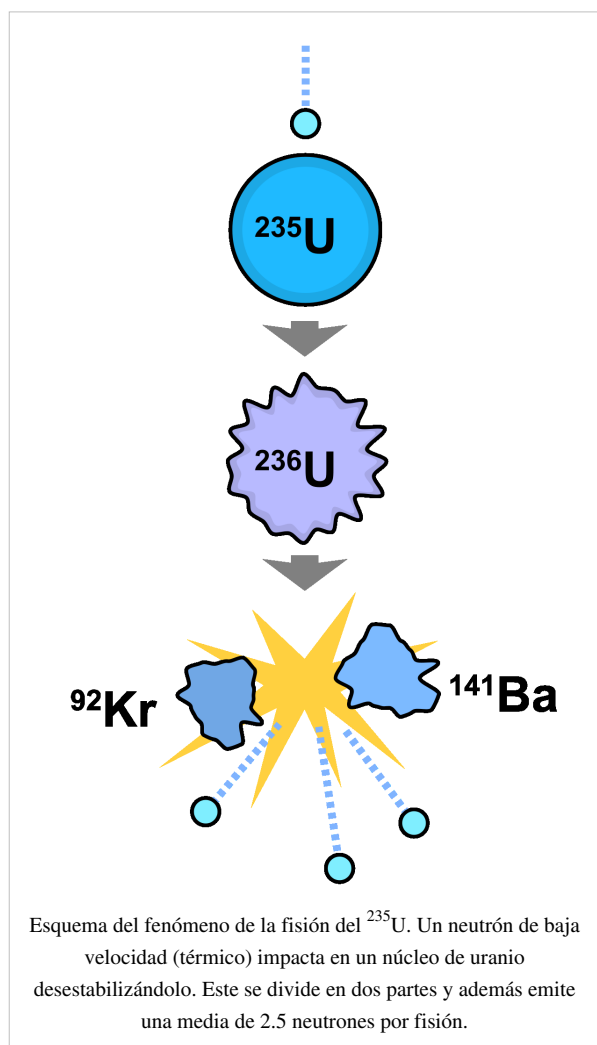
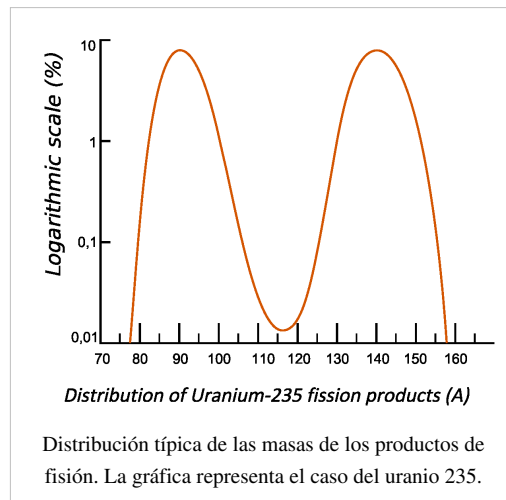
Véanse también: *neutrón y protón*



Fisión

Fermi, tras el descubrimiento del neutrón, realizó una serie de experimentos en los que bombardeaba distintos núcleos con estas nuevas partículas. En estos experimentos observó que cuando utilizaba neutrones de energías bajas, en ocasiones el neutrón era absorbido emitiéndose fotones.

Para averiguar el comportamiento de esta reacción repitió el experimento sistemáticamente en todos los elementos de la tabla periódica. Así descubrió nuevos elementos radiactivos, pero al llegar al uranio obtuvo resultados distintos. Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann consiguieron explicar el nuevo fenómeno al suponer que el núcleo de uranio al capturar el neutrón se escindía en dos partes de masas aproximadamente iguales. De hecho detectaron bario, de masa aproximadamente la mitad que la del uranio. Posteriormente se averiguó que esa escisión (o fisión) no se daba en todos los isótopos del uranio, sino solo en el ^{235}U . Y más tarde aun se supo que esa escisión podía dar lugar a muchísimos elementos distintos, cuya distribución de aparición es muy típica (similar a la doble joroba de un camello).



En la fisión de un núcleo de uranio, no solo aparecen dos núcleos más ligeros resultado de la división del de uranio, sino que además se emiten 2 o 3 (en promedio 2,5 en el caso del ^{235}U) neutrones a una alta velocidad (energía). Como el uranio es un núcleo pesado no se cumple la relación $N=Z$ (igual número de protones que de neutrones) que sí se cumple para los elementos más ligeros, por lo que los productos de la fisión poseen un exceso de neutrones. Este exceso de neutrones hace inestables (radiactivos) a esos productos de fisión, que alcanzan la estabilidad al desintegrarse los neutrones excedentes por desintegración beta generalmente. La fisión del ^{235}U puede producirse en más de 40 formas diferentes, originándose por tanto más de 80 productos de fisión distintos, que a su vez se desintegran formando cadenas de desintegración, por lo que finalmente aparecen cerca de 200 elementos a partir de la fisión del uranio.

La energía desprendida en la fisión de cada núcleo de ^{235}U es en promedio de 200 MeV. Los minerales explotados para la extracción del uranio suelen poseer contenidos de alrededor de 1 gramo de uranio por kg de mineral (la pechblenda por ejemplo). Como el contenido de ^{235}U en el uranio natural es de un 0,7%, se obtiene que por cada kg de mineral extraído tendríamos $1,8 \cdot 10^{19}$ átomos de ^{235}U . Si fisionamos todos esos átomos (1 gramo de uranio) obtendríamos una energía liberada de $3,6 \cdot 10^{27} \text{ eV} = 5,8 \cdot 10^8 \text{ J}$ por gramo. En comparación, por la combustión de 1 kg de carbón de la mejor calidad (antracita) se obtiene una energía de unos $4 \cdot 10^7 \text{ J}$, es decir, se necesitan más de 10 toneladas de antracita (el tipo de carbón con mayor poder calorífico) para obtener la misma energía contenida en 1 kg de uranio natural.

La aparición de los 2,5 neutrones por cada fisión posibilita la idea de llevar a cabo una reacción en cadena, si se logra hacer que de esos 2,5 al menos un neutrón consiga fisionar un nuevo núcleo de uranio. La idea de la reacción en cadena es habitual en otros procesos químicos. Los neutrones emitidos por la fisión no son útiles inmediatamente, sino que hay que frenarlos (moderarlos) hasta una velocidad adecuada. Esto se consigue rodeando los átomos por otro elemento con un Z pequeño, como por ejemplo hidrógeno, carbono o litio, material denominado moderador.

Otros átomos que pueden fisionar con neutrones lentos son el ^{233}U o el ^{239}Pu . Sin embargo también es posible la fisión con neutrones rápidos (de energías altas), como por ejemplo el ^{238}U (140 veces más abundante que el ^{235}U) o el ^{232}Th (400 veces más abundante que el ^{235}U).

La teoría elemental de la fisión la proporcionaron Bohr y Wheeler, utilizando un modelo según el cual los núcleos de los átomos se comportan como gotas líquidas.

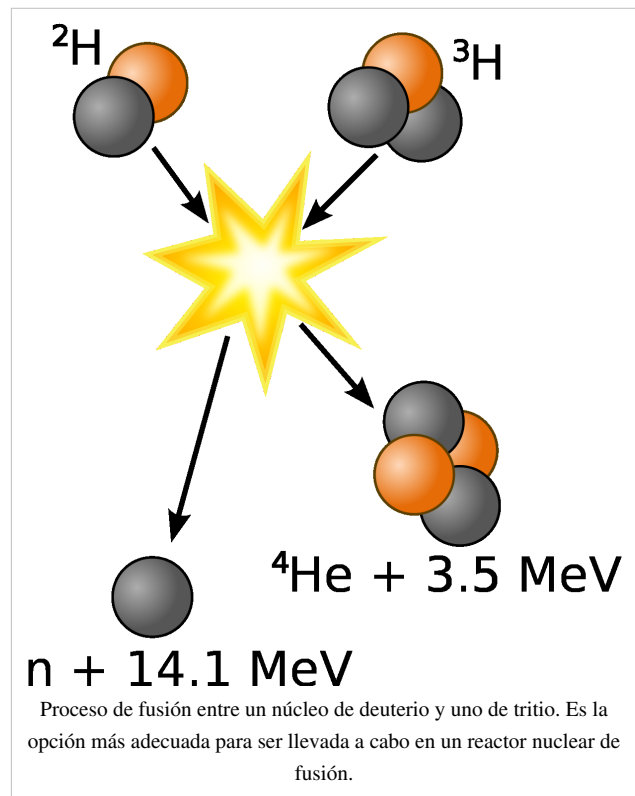
La fisión se puede conseguir también mediante partículas alfa, protones o deuterones.

Fusión

Así como la fisión es un fenómeno que aparece en la corteza terrestre de forma natural (si bien con una frecuencia pequeña), la fusión es absolutamente artificial en nuestro entorno. Sin embargo, esta energía posee ventajas con respecto a la fisión. Por un lado el combustible es abundante y fácil de conseguir, y por otro, sus productos son elementos estables y ligeros.

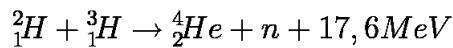
En la fusión, al contrario que en la fisión donde se dividen los núcleos, la reacción consiste en la unión de dos o más núcleos ligeros. Esta unión da lugar a un núcleo más pesado que los usados inicialmente y a neutrones. La fusión se consiguió antes incluso de comprender completamente las condiciones que se necesitaban, limitándose a conseguir condiciones extremas de presión y temperatura usando una bomba de fisión. Pero no es hasta que Lawson define unos criterios de tiempo, densidad y temperatura mínimos^[6] cuando se comienza a comprender el funcionamiento de la fusión.

Aunque en las estrellas la fusión se da entre una variedad de elementos químicos, el elemento con el que es más sencillo alcanzarla es el hidrógeno. El hidrógeno posee tres isótopos: el hidrógeno común (^1_1H), el deuterio (^2_1H) y el tritio (^3_1H). Esto es así porque la fusión requiere que se venza la repulsión electrostática que experimentan los núcleos al unirse, por lo que a menor carga eléctrica, menor será esta. Además, a mayor cantidad de neutrones, más pesado será el núcleo resultante (más arriba



estaremos en la gráfica de las energías de ligadura), con lo que mayor será la energía liberada en la reacción.

Una reacción particularmente interesante es la fusión de deuterio y tritio:



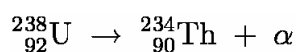
En esta reacción se liberan 17,6 MeV por fusión, más que en el resto de combinaciones con isótopos de hidrógeno. Además esta reacción proporciona un neutrón muy energético que puede aprovecharse para generar combustible adicional para reacciones posteriores de fusión, utilizando litio, por ejemplo. La energía liberada por gramo con esta reacción es casi 1.000 veces mayor que la lograda en la fisión de 1 gramo de uranio natural (unas 7 veces superior si fuera un gramo de ${}^{235}\text{U}$ puro).

Para vencer la repulsión electrostática, es necesario que los núcleos a fusionar alcancen una energía cinética de aproximadamente 10 keV. Esta energía se obtiene mediante un intenso calentamiento (igual que en las estrellas, donde se alcanzan temperaturas de 10^8 K), que implica un movimiento de los átomos igual de intenso. Además de esa velocidad para vencer la repulsión electrostática, la probabilidad de que se produzca la fusión debe ser elevada para que la reacción suceda. Esto implica que se deben poseer suficientes átomos con energía suficiente durante un tiempo mínimo. El criterio de Lawson define que el producto entre la densidad de núcleos con esa energía por el tiempo durante el que deben permanecer en ese estado debe ser $n \cdot \tau = 10^{14} \text{s} \cdot \text{nucleos} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Los dos métodos en desarrollo para aprovechar de forma útil la energía desprendida en esta reacción son el confinamiento magnético y el confinamiento inercial (con fotones que provienen de láser o partículas que provienen de aceleradores).

Desintegración alfa

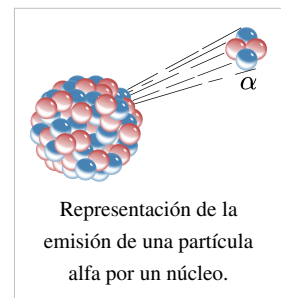
Esta reacción es una forma de fisión espontánea, en la que un núcleo pesado emite una partícula alfa (α) con una energía típica de unos 5 MeV. Una partícula α es un núcleo de helio, constituido por dos protones y dos neutrones. En su emisión el núcleo cambia, por lo que el elemento químico que sufre este tipo de desintegración muta en otro distinto. Una reacción natural típica es la siguiente:



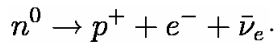
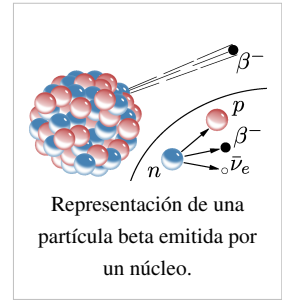
En la que un átomo de ${}^{238}\text{U}$ se transforma en otro de ${}^{234}\text{Th}$.

Fue en 1928 cuando George Gamow dio una explicación teórica a la emisión de estas partículas. Para ello supuso que la partícula alfa convivía en el interior del núcleo con el resto de los nucleones, de una forma casi independiente. Por efecto túnel en algunas ocasiones esas partículas superan el pozo de potencial que crea el núcleo, separándose de él a una velocidad de un 5% la velocidad de la luz.

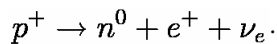
Desintegración beta



Existen dos modos de desintegración beta. En el tipo β^- la fuerza débil convierte un neutrón (n^0) en un protón (p^+) y al mismo tiempo emite un electrón (e^-) y un antineutrino ($\bar{\nu}_e$):

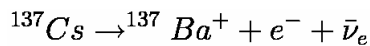


En el tipo β^+ un protón se transforma en un neutrón emitiendo un positrón (e^+) y un neutrino (ν_e):



Sin embargo, este último modo no se presenta de forma aislada, sino que necesita un aporte de energía.

La desintegración beta hace cambiar al elemento químico que la sufre. Por ejemplo, en la desintegración β^- el elemento se transforma en otro con un protón (y un electrón) más. Así en la desintegración del ^{137}Cs por β^- ;



En 1934, Enrico Fermi consiguió crear un modelo de esta desintegración que respondía correctamente a su fenomenología.

Véase también: *neutrino*

Véase también: *captura electrónica*

Tecnología nuclear

Armas nucleares

Un arma es todo instrumento, medio o máquina que se destina a atacar o a defenderse.^[11] Según tal definición, existen dos categorías de armas nucleares:

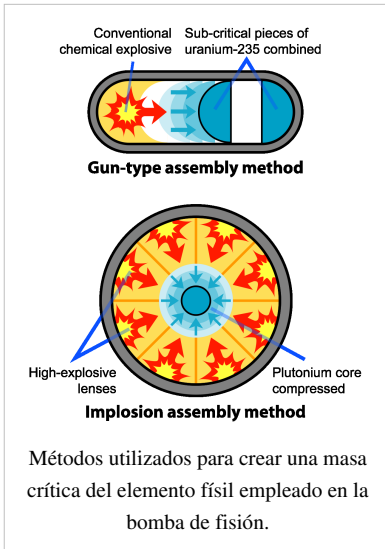
1. Aquellas que utilizan la energía nuclear de forma directa para el ataque o la defensa, es decir, los explosivos que usan la fisión o la fusión.
2. Aquellas que utilizan la energía nuclear para su propulsión, pudiendo a su vez utilizar o no munición que utilice la energía nuclear para su detonación. En esta categoría se pueden citar los buques de guerra de propulsión nuclear (cruceros, portaaviones, submarinos, bombarderos, etc.).

Véanse también: *Arma nuclear y propulsión nuclear*

Bomba atómica

Existen dos formas básicas de utilizar la energía nuclear desprendida por reacciones en cadena descontroladas de forma explosiva: la fisión y la fusión.

Bomba de fisión



El 16 de julio de 1945 se produjo la primera explosión de una bomba de fisión creada por el ser humano: La Prueba Trinity.

Existen dos tipos básicos de bombas de fisión: utilizando uranio altamente enriquecido (enriquecimiento superior al 90% en ^{235}U) o utilizando plutonio. Ambos tipos se fundamentan en una reacción de fisión en cadena descontrolada y solo se han empleado en un ataque real en Hiroshima y Nagasaki, al final de la Segunda Guerra Mundial.

Para que este tipo de bombas funcionen es necesario utilizar una cantidad del elemento utilizado superior a la Masa crítica. Suponiendo una riqueza en el elemento del 100%, eso suponen 52 kg de ^{235}U o 10 kg de ^{239}Pu . Para su funcionamiento se crean 2 o más partes subcríticas que se unen mediante un explosivo químico convencional de forma que se supere la masa crítica.

Los dos problemas básicos que se debieron resolver para crear este tipo de bombas fueron:

- Generar suficiente cantidad del elemento fisible a utilizar, ya sea uranio enriquecido o plutonio puro.
- Alcanzar un diseño en el que el material utilizado en la bomba no sea destruido por la primera explosión antes de alcanzar la criticidad.

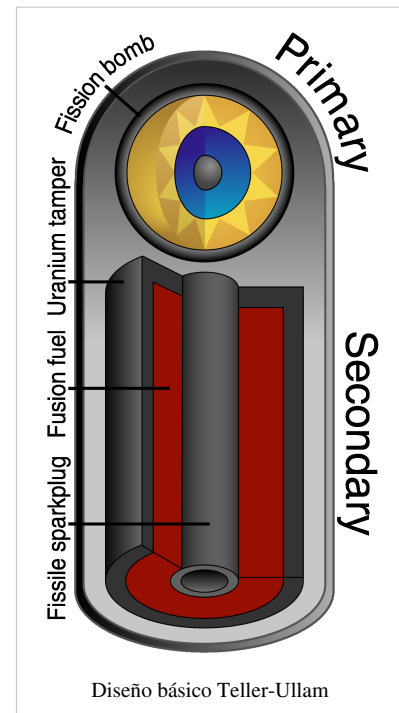
El rango de potencia de estas bombas se sitúa entre aproximadamente el equivalente a una tonelada de TNT hasta los 500.000 kilotones.

Bomba de fusión

Tras el primer ensayo exitoso de una bomba de fisión por la Unión Soviética en 1949 se desarrolló una segunda generación de bombas nucleares que utilizaban la fusión. Se la llamó *bomba termonuclear*, *bomba H* o bomba de hidrógeno. Este tipo de bomba no se ha utilizado nunca contra ningún objetivo real. El llamado diseño Teller-Ullam (o secreto de la bomba H) separa ambas explosiones en dos fases.

Este tipo de bombas pueden ser miles de veces más potentes que las de fisión. En teoría no existe un límite a la potencia de estas bombas, siendo la de mayor potencia explotada la bomba del Zar, de una potencia superior a los 50 megatones.

Las bombas de hidrógeno utilizan una bomba primaria de fisión que genera las condiciones de presión y temperatura necesarias para comenzar la reacción de fusión de núcleos de hidrógeno. Los únicos productos radiactivos que generan estas bombas son los producidos en la explosión primaria de fisión, por lo que a veces se le ha llamado *bomba nuclear limpia*. El extremo de esta característica son las llamadas bombas de neutrones o *bomba N*, que minimizan la bomba de fisión primaria, logrando un mínimo de productos de fisión. Estas bombas además se diseñaron de tal modo que la mayor cantidad



de energía liberada sea en forma de neutrones, con lo que su potencia explosiva es la décima parte que una bomba de fisión. Fueron concebidas como armas anti-tanque, ya que al penetrar los neutrones en el interior de los mismos, matan a sus ocupantes por las radiaciones.

Véase también: Proceso Teller-Ulam

Buques militares de propulsión nuclear

Durante la segunda guerra mundial se comprobó que el submarino podía ser un arma decisiva, pero poseía un grave problema: su necesidad de emerger tras cortos períodos para obtener aire para la combustión del diésel en que se basaban sus motores (la invención del snorkel mejoró algo el problema, pero no lo solucionó). El Almirante Hyman G. Rickover fue el primero que pensó que la energía nuclear podría ayudar con este problema.



USS Enterprise (CVN-65) junto con otros buques de apoyo de propulsión nuclear (un crucero y un destructor) en el Mediterráneo. La tripulación forma en su cubierta la famosa fórmula de Einstein $E=mc^2$ sobre la equivalencia masa-energía.

Los desarrollos de los reactores nucleares permitieron un nuevo tipo de motor con ventajas fundamentales:

1. No precisa aire para el funcionamiento del motor, ya que no se basa en la combustión.
2. Una pequeña masa de combustible nuclear permite una autonomía de varios meses (años incluso) sin repostar. Por ejemplo, los submarinos de Estados Unidos no necesitan repostar durante toda su vida útil.
3. Un empuje que ningún otro motor puede equiparar, con lo que pudieron construirse submarinos mucho más grandes que los existentes hasta el momento. El mayor submarino construido hasta la fecha son los de la clase Akula rusos (desplazamiento de 48 mil toneladas, 175 m de longitud).

Estas ventajas condujeron a buques que alcanzan velocidades de más de 25 nudos, que pueden permanecer semanas en inmersión profunda y que además pueden almacenar enormes cantidades de munición (nuclear o convencional) en sus bodegas. De hecho las armadas de Estados Unidos, Francia y el Reino Unido sólo poseen submarinos que utilizan este sistema de propulsión.

En los submarinos se han utilizado reactores de agua a presión, de agua en ebullición o de sales fundidas. Para conseguir reducir el peso del combustible en estos reactores se usa uranio con altos grados de enriquecimiento (del 30 al 40% en los rusos o del 96% en los estadounidenses). Estos reactores presentan la ventaja de que no es necesario (aunque sí es posible) convertir el vapor generado por el calor en electricidad, sino que puede utilizarse de forma directa sobre una turbina que proporciona el movimiento a las hélices que impulsan el buque, mejorando notablemente el rendimiento.

Se han construido una gran variedad de buques militares que usan motores nucleares y que, en algunos casos, portan a su vez misiles de medio o largo alcance con cabezas nucleares:

- Cruceros. Como el USS Long Beach (CGN-9), 2 reactores nucleares integrados tipo C1W.
- Destruyores. Como el USS Bainbridge (CGN-25) fue el buque de propulsión nuclear más pequeño jamás construido, usa 2 reactores nucleares integrados tipo D2G.
- Portaaviones. El más representativo es el USS Enterprise (CVN-65), construido en 1961 y aún operativo, que utiliza para su propulsión 8 reactores nucleares tipo A2W.
- Submarinos balísticos. Utilizan la energía nuclear como propulsión y misiles de medio o largo alcance como armamento. La clase Akula son de este tipo, utilizando 2 reactores nucleares tipo OK-650 y portando además de otro armamento convencional 20 misiles nucleares RSM-52, cada uno con 10 cabezas nucleares de 200 kilotones cada una.
- Submarinos de ataque. Como el USS Seawolf (SSN-21) de la clase Seawolf que usa un reactor nuclear integrado PWR tipo S6W. Alcanza una velocidad de 30 nudos.

Estados Unidos, Gran Bretaña, Rusia, China y Francia poseen buques de propulsión nuclear.

Véase también: Propulsión nuclear marina

Aviones militares de propulsión nuclear

Tanto Estados Unidos como la Unión Soviética se plantearon la creación de una flota de bombarderos de propulsión nuclear. De este modo se pretendía mantenerlos cargados con cabezas nucleares y volando de forma permanente cerca de los objetivos prefijados. Con el desarrollo del Misil balístico intercontinental (ICBM) a finales de los 50, más rápidos y baratos, sin necesidad de pilotos y prácticamente invulnerables, se abandonaron todos los proyectos.

Los proyectos experimentales fueron:

- Convair X-6. Proyecto estadounidense a partir de un bombardero B-36. Llegó a tener un prototipo (el NB-36H) que realizó 47 vuelos de prueba de 1955 a 1957, año en el que se abandonó el proyecto. Se utilizó un reactor de fisión de 3 MW refrigerado con aire que solo entró en funcionamiento para las pruebas de los blindajes, nunca propulsando el avión.
- Tupolev Tu-119. Proyecto soviético a partir de un bombardero Tupolev Tu-95. Tampoco pasó de la etapa de pruebas.

Véanse también: Guerra Fría#Carrera Armamentista, Estrategia de las armas nucleares, Escudo Antimisiles y Tratado de No Proliferación Nuclear

Propulsión nuclear civil

La energía nuclear se utiliza desde los años 50 como sistema para dar empuje (propulsar) distintos sistemas, desde los submarinos (el primero que utilizó la energía nuclear), hasta naves espaciales en desarrollo en este momento.

Véase también: Propulsión nuclear

Buques nucleares civiles

Tras el desarrollo de los buques de propulsión nuclear de uso militar se hizo pronto patente que existían ciertas situaciones en las que sus características podían ser trasladadas a la navegación civil.

Se han construido cargueros y rompehielos que usan reactores nucleares como motor.

El primer buque nuclear de carga y pasajeros fue el NS Savannah, botado en 1962. Solo se construyeron otros 3 buques de carga y pasajeros: El Mutsu japonés, el Otto Hahn alemán y el Sevmorput ruso. El Sevmorput (acrónimo de 'Severnii Morskoi Put'), botado en 1988 y dotado con un reactor nuclear tipo KLT-40 de 135 MW, sigue en activo hoy en día transitando la ruta del mar del norte.

Rusia ha construido 9 rompehielos nucleares desde 1959 hasta 2007, realizando recorridos turísticos, viajando hacia el polo norte, desde 1989. El coste de uno de sus viajes es de 25.000 dólares por un viaje de 3 semanas.

Véase también: Propulsión nuclear marina



El NS Savannah, el primer buque nuclear de mercancías y pasajeros jamás construido, fue botado en 1962 y desguazado 8 años más tarde por su inviabilidad económica.

Propulsión aeroespacial



Recreación artística del Proyecto Orión.

Aunque existen varias opciones que pueden utilizar la energía nuclear para propulsar cohetes espaciales, solo algunas han alcanzado niveles de diseño avanzados.

El cohete termonuclear, por ejemplo, utiliza hidrógeno recalentado en un reactor nuclear de alta temperatura, consiguiendo empujes al menos dos veces superiores a los cohetes químicos. Este tipo de cohetes se probaron por primera vez en 1959 (el Kiwi 1), dentro del Proyecto Nerva, cancelado en 1972. En 1990 se relanzó el proyecto bajo las siglas SNTP (Space Nuclear Thermal Propulsión) dentro del proyecto para un viaje tripulado a Marte en 2019. En 2003 comenzó con el nombre de Proyecto Prometeo. Otra de las

posibilidades contempladas es el uso de un reactor nuclear que alimente a un propulsor iónico (el Nuclear Electric Xenon Ion System o 'NEXIS').

El Proyecto Orión^[12] fue un proyecto ideado por Stanisław Ulam en 1947, que comenzó en 1958 en la empresa General Atomics. Su propósito era la realización de viajes interplanetarios de forma barata a una velocidad de un 10% de *c*. Para ello utilizaba un método denominado propulsión nuclear pulsada (External Pulsed Plasma Propulsión es su denominación oficial en inglés). El proyecto fue abandonado en 1963, pero el mismo diseño se ha utilizado como base en el Proyecto Dédalo^[13] británico con motor de fusión, el Proyecto Longshot^[14] americano con motor de fisión acoplado a un motor de fusión inercial o el Proyecto Medusa.

También se ha propuesto el uso de RTG como fuente para un cohete de radioisótopos.^[15]

Automóvil nuclear

La única propuesta conocida es el diseño conceptual lanzado por Ford en 1958: el Ford Nucleon.^[16] Nunca fue construido un modelo operacional. En su diseño se proponía el uso de un pequeño reactor de fisión que podía proporcionar una autonomía de más de 8.000 km. Un prototipo del coche se mantiene en el museo Henry Ford.

Una opción, incluida en las alternativas al petróleo, es el uso del hidrógeno en células de combustible como combustible para vehículos de hidrógeno. Se está investigando en este caso el uso de la energía nuclear para la generación del hidrógeno necesario mediante reacciones termoquímicas o de electrólisis con vapor a alta temperatura.^{[17] [18]}

Véanse también: *Ford Nucleon* y *Célula de combustible*

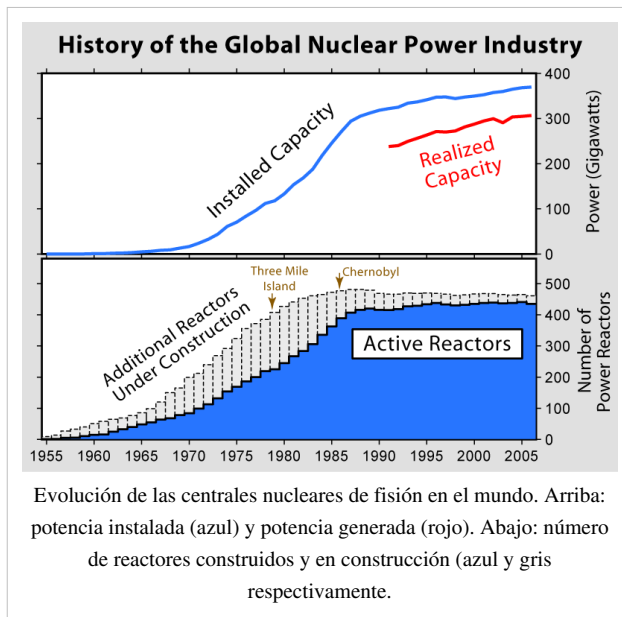
Generación de electricidad

Probablemente, la aplicación práctica más conocida de la energía nuclear es la generación de energía eléctrica para su uso civil, en particular mediante la fisión de uranio enriquecido. Para ello se utilizan reactores en los que se hace fisionar o fusionar un combustible. El funcionamiento básico de este tipo de instalaciones industriales es similar a cualquier otra central térmica, sin embargo poseen características especiales con respecto a las que usan combustibles fósiles:

- Se necesitan medidas de seguridad y control mucho más estrictas. En el caso de los reactores de cuarta generación estas medidas podrían ser menores,^[19] mientras que en la fusión se espera que no sean necesarias.^[20]
- La cantidad de combustible necesario anualmente en estas instalaciones es varios órdenes de magnitud inferior al que precisan las térmicas convencionales.
- Las emisiones directas de CO₂ y NO_x en la generación de electricidad, principales gases de efecto invernadero de origen antrópico, son nulas; aunque indirectamente, en procesos secundarios como la obtención de mineral y construcción de instalaciones, sí se producen emisiones.^[21]

A partir de la fisión

Tras su uso exclusivamente militar, se comenzó a plantear la aplicación del conocimiento adquirido a la vida civil. El 20 de diciembre de 1951 fue el primer día que se consiguió generar electricidad con un reactor nuclear (en el reactor estadounidense EBR-I, con una potencia de unos 100 kW), pero no fue hasta 1954 cuando se conectó a la red eléctrica una central nuclear (fue la central nuclear soviética Obninsk, generando 5 MW con solo un 17% de rendimiento térmico). El primer reactor de fisión comercial fue el Calder Hall en Sellafield, que se conectó a la red eléctrica en 1956. El 25 de marzo de 1957 se creó la Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM), el mismo día que se creó la Comunidad Económica Europea, entre Bélgica, Francia, Alemania, Italia, Luxemburgo y los Países Bajos. Ese mismo año se creó el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Ambos organismos con la misión, entre otras, de impulsar el uso pacífico de la energía nuclear.



Su desarrollo en todo el mundo experimentó a partir de ese momento un gran crecimiento, de forma muy particular en Francia y Japón, donde la crisis del petróleo de 1973 influyó definitivamente, ya que su dependencia en el petróleo para la generación eléctrica era muy marcada (39 y 73% respectivamente en aquellos años, en 2008 generan un 78 y un 30% respectivamente mediante reactores de fisión).^[cita requerida] En 1979 el accidente de Three Mile Island provocó un aumento muy considerable en las medidas de control y de seguridad en las centrales, sin embargo no se detuvo el aumento de capacidad instalada. Pero en 1986 el accidente de Chernóbil, en un reactor RBMK de diseño ruso que no cumplía los requisitos de seguridad que se exigían en occidente, acabó radicalmente con ese crecimiento.

En octubre de 2007 existían 439 centrales nucleares en todo el mundo que generaron 2,7 millones de MWh en 2006. La potencia instalada en 2007 fue de 370.721 MWe. En marzo de 2008 había 35 centrales en construcción, planes para construir 91 centrales nuevas (99.095 MWe) y otras 228 propuestas (198.995 MWe).^[22] Aunque solo 30 países en el mundo poseen centrales nucleares, aproximadamente el 15% de la energía eléctrica generada en el mundo se produce a partir de energía nuclear.^[23]

La mayoría de los reactores son de los llamados de agua ligera (*LWR* por su sigla en inglés), que utilizan como moderador agua intensamente purificada. En estos reactores el combustible utilizado es uranio enriquecido ligeramente (entre el 3 y el 5%).

En 1965 se construyó la primera central nuclear en España, la Central nuclear José Cabrera. Actualmente se encuentran en funcionamiento ocho reactores nucleares en España: Santa María de Garoña, Almaraz I y II, Ascó I y II, Cofrentes, Vandellós II y Trillo.

Se paralizaron o no entraron en funcionamiento, una vez finalizadas, debido a la moratoria nuclear las centrales de Lemóniz, I y II, Valdecaballeros I y II, Trillo II, Escatrón I y II, Santillán, Regodola y Sayago. Se encuentran desmanteladas o en proceso de desmantelamiento Vandellós I y José Cabrera.

El porcentaje de energía eléctrica producida en España es muy dependiente de la producción hidroeléctrica anual, la cual depende fuertemente de la pluviometría. Así, en el año 2002 un tercio, el 33,9% de la energía eléctrica producida en España lo fue en nucleares con un total de 63.016 GWh.^[24] mientras que en el año 2009, el porcentaje fue del 19%.^[1]

Véanse también: *Central nuclear#Centrales nucleares en España* y *Moratoria_nuclear#España*

Más tarde se planteó añadir el plutonio fisible generado (${}_{94}^{239}\text{Pu}$) como combustible extra en estos reactores de fisión, aumentando de una forma importante la eficiencia del combustible nuclear y reduciendo así uno de los problemas del combustible gastado. Esta posibilidad incluso llevó al uso del plutonio procedente del armamento nuclear desmantelado en las principales potencias mundiales. Así se desarrolló el combustible MOX, en el que se añade un porcentaje (entre un 3 y un 10% en masa) de este plutonio a uranio empobrecido. Este combustible se usa actualmente como un porcentaje del combustible convencional (de uranio enriquecido). También se ha ensayado en algunos reactores un combustible mezcla de torio y plutonio, que genera una menor cantidad de elementos transuránicos.

Otros reactores utilizan agua pesada como moderador. En estos reactores se puede utilizar uranio natural, es decir, sin enriquecer y además se produce una cantidad bastante elevada de tritio por activación neutrónica. Este tritio se prevé que pueda aprovecharse en futuras plantas de fusión.

Otros proyectos de fisión, que no han superado hoy en día la fase de experimentación, se encaminan al diseño de reactores en los que pueda generarse electricidad a partir de otros isótopos, principalmente el ${}_{90}^{232}\text{Th}$ y el ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Véase también: Fisión nuclear

Tipos de reactores

La diferencia básica entre los distintos diseños de reactores nucleares de fisión es el combustible que utilizan. Esto influye en el tipo de moderador y refrigerante usados. De entre todas las posibles combinaciones entre tipo de combustible, moderador y refrigerante, solo algunas son viables técnicamente (unas 100 contando las opciones de neutrones rápidos). Pero solo unas cuantas se han utilizado hasta el momento en reactores de uso comercial para la generación de electricidad (ver tabla).

Tipos de reactores nucleares de fisión comerciales (neutrones térmicos)^[25]

Combustible	Moderador	Refrigerante		
Uranio natural	Grafito	Aire		
		CO ₂		
		H ₂ O (agua ligera)		
		D ₂ O (agua pesada)		
	D ₂ O (agua pesada)	Compuestos orgánicos		
		H ₂ O (agua ligera)		
		D ₂ O (agua pesada)		
		Gas		
		Uranio enriquecido	Grafito	Aire
				CO ₂
H ₂ O (agua ligera)				
D ₂ O (agua pesada)				
Sodio				
D ₂ O (agua pesada)	Compuestos orgánicos			
	H ₂ O (agua ligera)			
	D ₂ O (agua pesada)			
	Gas			
	H ₂ O (agua ligera)		H ₂ O (agua ligera)	

El único isótopo natural que es fisiónable con neutrones térmicos es el $^{235}_{92}\text{U}$, que se encuentra en una proporción de un 0.7% en peso en el uranio natural. El resto es $^{238}_{92}\text{U}$, considerado fértil, ya que, aunque puede fisiónar con neutrones rápidos, por activación con neutrones se convierte en $^{239}_{94}\text{Pu}$, que sí es fisible mediante neutrones térmicos. Los reactores de fisión comerciales, tanto de primera como de segunda o tercera generación, utilizan uranio con grados de enriquecimiento distinto, desde uranio natural hasta uranio ligeramente enriquecido (por debajo del 6%). Además, en aquellos en los que se usa uranio enriquecido, la configuración del núcleo del reactor utiliza diferentes grados de enriquecimiento, con uranio más enriquecido en el centro y menos hacia el exterior. Esta configuración consigue dos fines: por una parte disminuir los neutrones de fuga por reflexión, y por otra parte aumentar la cantidad de $^{239}_{94}\text{Pu}$ consumible. En los reactores comerciales se hacen fisiónar esos átomos fisible con neutrones térmicos hasta el máximo posible (al grado de *quemado* del combustible se le denomina burnup), ya que se obtienen mayores beneficios cuanto más provecho se saca del combustible.

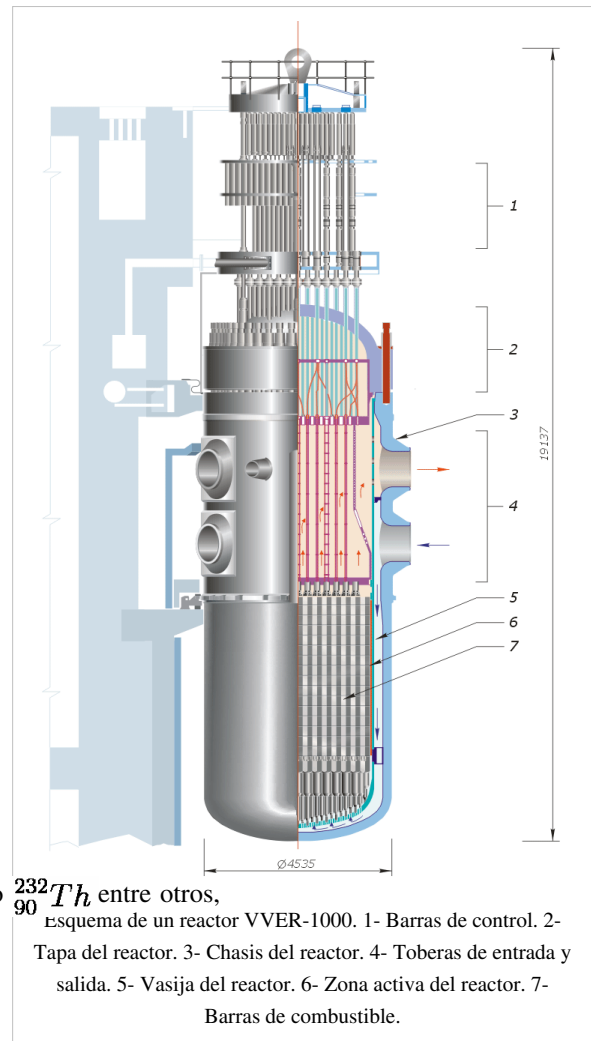
Otro isótopo considerado fértil con neutrones térmicos es el torio (elemento natural, compuesto en su mayoría por el isótopo $^{232}_{90}\text{Th}$), que por activación produce $^{233}_{92}\text{U}$, fisible con neutrones térmicos y rápidos (es regla general que aquellos elementos con número atómico A impar sean fisible, y con A par fértiles).

Esos tres isótopos son los que producen fisiones exoérgicas, es decir, generan más energía que la necesaria para producirlas, con neutrones térmicos. Los demás elementos (con $z < 92$) solo fisiónan con neutrones rápidos. Así el $^{238}_{92}\text{U}$ por ejemplo puede fisiónarse con neutrones de energías superiores a 1,1 MeV.

Aunque hay varias formas de clasificar los distintos reactores nucleares, la más utilizada, y con la que se denominan los distintos tipos de reactores de fisión es por la combinación moderador/refrigerante utilizado. Estas son las denominaciones de los reactores comerciales de neutrones térmicos utilizados en la actualidad (de segunda generación), junto a su número en el mundo (entre paréntesis)^[26] y sus características principales:

- PWR (VVER en ruso). (264). Uranio enriquecido, moderador y refrigerante agua ligera.
- BWR. (94). Uranio enriquecido, moderador y refrigerante agua ligera.
- CANDU. (43). Uranio natural, moderador y refrigerante agua pesada.
- AGR. (18). Usa uranio enriquecido como combustible, moderador grafito, refrigerante CO_2 .
- RBMK. (12). Uranio natural o enriquecido, moderador grafito, refrigerante agua ligera.
- Otros. 4 reactores rusos que usan uranio enriquecido, moderador grafito y refrigerante agua ligera.

Los diseños de reactores que utilizan neutrones rápidos, y por tanto pueden utilizar como combustible $^{238}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ o $^{232}_{90}\text{Th}$ entre otros, no necesitan moderador para funcionar. Por ese motivo es difícil utilizar los mismos materiales que se usan en los térmicos como refrigerantes, ya que en muchas ocasiones también actúan como moderador. Todos los reactores de este tipo hasta el momento han utilizado como refrigerante metales líquidos



(mercurio, plutonio, yoduro potásico, plomo, bismuto, sodio...). Cuando estos reactores además consiguen producir más cantidad de material fisible que el que consumen se les denomina reactores reproductores rápidos. En la actualidad existen 4 FBR, 3 en parada fría y solo uno en operación comercial.^[26]

Los diseños de reactores que aprovechan las lecciones aprendidas en el medio siglo transcurrido (aproximadamente una docena de diseños distintos) se denominan de tercera generación o reactores avanzados. Solo se han puesto en marcha algunos en Japón y se están construyendo algunos otros. En general son evoluciones de los reactores de segunda generación (como el BWR avanzado o ABWR o el PWR avanzado: el EPR o el AP1000), aunque existen algunos diseños completamente nuevos (como el PBMR que utiliza helio como refrigerante y combustible TRISO que contiene el moderador de grafito en su composición).

Los reactores de cuarta generación no saldrán del papel al menos hasta el 2020, y en general son diseños que buscan, además de niveles de seguridad superiores a las plantas de fisión de las generaciones anteriores, que los únicos residuos de alta actividad tengan vidas muy cortas, quemando los actínidos de vida larga. A este grupo pertenecen por ejemplo los reactores asistidos por acelerador (ADS). En general estos reactores se basarán en neutrones rápidos.

Existen algunos otros diseños, basados fundamentalmente en los descritos, para generar energía en lugares remotos, como el reactor flotante ruso KLT-40S o el microrreactor nuclear de 200 kW de Toshiba.^[27]

Véanse también: *PWR, BWR, CANDU, AGR, FBR y Fisión asistida*

Seguridad^[28] [29]

Como cualquier actividad humana, una central nuclear de fisión conlleva riesgos y beneficios. Los riesgos deben preverse y analizarse para poder ser mitigados. A todos aquellos sistemas diseñados para eliminar o al menos minimizar esos riesgos se les llama sistemas de protección y control. En una central nuclear de uso civil se utiliza una aproximación llamada *defensa en profundidad*. Esta aproximación sigue un diseño de múltiples barreras para alcanzar ese propósito. Una primera aproximación a las distintas barreras utilizadas (cada una de ellas múltiple), de fuera adentro podría ser:

1. Autoridad reguladora: es el organismo encargado de velar que el resto de barreras se encuentren en perfecto funcionamiento. No debe estar vinculado a intereses políticos ni empresariales, siendo sus decisiones vinculantes.
2. Normas y procedimientos: todas las actuaciones deben regirse por procedimientos y normas escritas. Además se debe llevar a cabo un control de calidad y deben estar supervisadas por la autoridad reguladora.
3. Primera barrera física (sistemas pasivos): sistemas de protección intrínsecos basados en las leyes de la física que dificultan la aparición de fallos en el sistema del reactor. Por ejemplo el uso de sistemas diseñados con reactividad negativa o el uso de edificios de contención.
4. Segunda barrera física (sistemas activos): Reducción de la frecuencia con la que pueden suceder los fallos. Se basa en la redundancia, separación o diversidad de sistemas de seguridad destinados a un mismo fin. Por ejemplo las válvulas de control que sellan los circuitos.
5. Tercera barrera física: sistemas que minimizan los efectos debidos a sucesos externos a la propia central. Como los amortiguadores que impiden una ruptura en caso de sismo.
6. Barrera técnica: todas las instalaciones se instalan en ubicaciones consideradas muy seguras (baja probabilidad de sismo o vulcanismo) y altamente despobladas.

Además debe estar previsto qué hacer en caso de que todos o varios de esos niveles fallaran por cualquier circunstancia. Todos, los trabajadores u otras personas que vivan en las cercanías, deben poseer la información y formación necesaria. Deben existir planes de emergencia que estén plenamente operativos. Para ello es necesario que sean periódicamente probados mediante simulacros. Cada central nuclear posee dos planes de emergencia: uno interior y uno exterior, comprendiendo el plan de emergencia exterior, entre otras medidas, planes de evacuación de la población cercana por si todo lo demás fallara.

Aunque los niveles de seguridad de los reactores de tercera generación han aumentado considerablemente con respecto a las generaciones anteriores, no es esperable que varíe la estrategia de defensa en profundidad. Por su parte, los diseños de los futuros reactores de cuarta generación se están centrando en que todas las barreras de seguridad sean infalibles, basándose tanto como sea posible en sistemas pasivos y minimizando los activos. Del mismo modo, probablemente la estrategia seguida será la de defensa en profundidad.

Cuando una parte de cualquiera de esos niveles, compuestos a su vez por múltiples sistemas y barreras, falla (por defecto de fabricación, desgaste, o cualquier

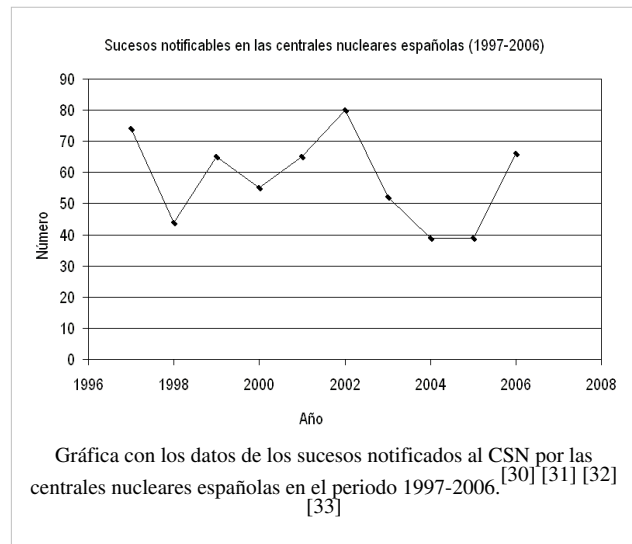
otro motivo), se produce un aviso a los controladores que a su vez se lo comunican a los inspectores residentes en la central nuclear. Si los inspectores consideran que el fallo puede comprometer el nivel de seguridad en cuestión elevan el aviso al organismo regulador (en España el CSN). A estos avisos se les denomina *sucesos notificables*.^[34]
^[35] En algunos casos, cuando el fallo puede hacer que algún parámetro de funcionamiento de la central supere las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF) definidas en el diseño de la central (con unos márgenes de seguridad), se produce un paro automático de la reacción en cadena llamado SCRAM. En otros casos la reparación de esa parte en cuestión (una válvula, un aspersor, una compuerta,...) puede llevarse a cabo sin detener el funcionamiento de la central.

Si cualquiera de las barreras falla aumenta la probabilidad de que suceda un accidente. Si varias barreras fallan en cualquiera de los niveles, puede finalmente producirse la ruptura de ese nivel. Si varios de los niveles fallan puede producirse un accidente, que puede alcanzar diferentes grados de gravedad. Esos grados de gravedad se organizaron en la Escala Internacional de Accidentes Nucleares (INES) por el OIEA y la AEN, iniciándose la escala en el 0 (sin significación para la seguridad) y acabando en el 7 (accidente grave). El incidente (denominados así cuando se encuentran en grado 3 o inferiores) más grave ocurrido en España fue el de Vandellós I en 1989, catalogado a posteriori (no existía ese año la escala en España) como de grado 3 (incidente importante).^[36]

La ruptura de varias de estas barreras (no existía independencia con el gobierno, el diseño del reactor era de reactividad positiva, la planta no poseía edificio de contención, no existían planes de emergencia, etc.) causó el accidente nuclear más grave ocurrido: el accidente de Chernóbil, de nivel 7 en la Escala Internacional de Accidentes Nucleares (INES).

Véanse también: Principios fundamentales de la seguridad, Defensa en profundidad y Edificio de contención

Véanse también: Accidente nuclear, Lista de accidentes nucleares y Lista de accidentes nucleares civiles



A partir de la fusión

Al igual que la fisión, tras su uso exclusivamente militar, se propuso el uso de esta energía en aplicaciones civiles. En particular, los grandes proyectos de investigación se han encaminado hacia el desarrollo de reactores de fusión para la producción de electricidad. El primer diseño de reactor nuclear se patentó en 1946,^[7] aunque hasta 1955 no se definieron las condiciones mínimas que debía alcanzar el combustible (isótopos ligeros, habitualmente de hidrógeno), denominadas *criterios de Lawson*, para conseguir una reacción de fusión continuada. Esas condiciones se alcanzaron por vez primera de forma cuasiestacionaria el año 1968.

La fusión se plantea como una opción más eficiente (en términos de energía producida por masa de combustible utilizada) segura y limpia que la fisión, útil para el largo plazo.^[37] Sin embargo faltan aun años para poder ser utilizada de forma comercial (la fusión no será comercial al menos hasta el año 2050).^[38] La principal dificultad encontrada, entre otras muchas de diseño y materiales, consiste en la forma de confinar la materia en estado de plasma hasta alcanzar las condiciones impuestas por los criterios de Lawson, ya que no hay materiales capaces de soportar las temperaturas impuestas.

Se han diseñado dos alternativas para alcanzar los criterios de Lawson, que son el confinamiento magnético y el confinamiento inercial.

Aunque ya se llevan a cabo reacciones de fusión de forma controlada en los distintos laboratorios, en estos momentos los proyectos se encuentran en el estudio de viabilidad técnica en centrales de producción eléctrica como el ITER o el NIF. El proyecto ITER, en el que participan entre otros Japón y la Unión Europea, pretende construir una central experimental de fusión y comprobar su viabilidad técnica. El proyecto NIF, en una fase más avanzada que ITER, pretende lo mismo en Estados Unidos usando el confinamiento inercial.

Una vez demostrada la viabilidad de conseguir un reactor de fusión que sea capaz de funcionar de forma continuada durante largos períodos, se construirán prototipos encaminados a la demostración de su viabilidad económica.^[39]

Véase también: Fusión nuclear

Tipos de reactores

Existen dos grandes grupos, separados por el método empleado para alcanzar las condiciones de tiempo, densidad y temperatura necesarias para que pueda alcanzarse la fusión controlada de forma continua:

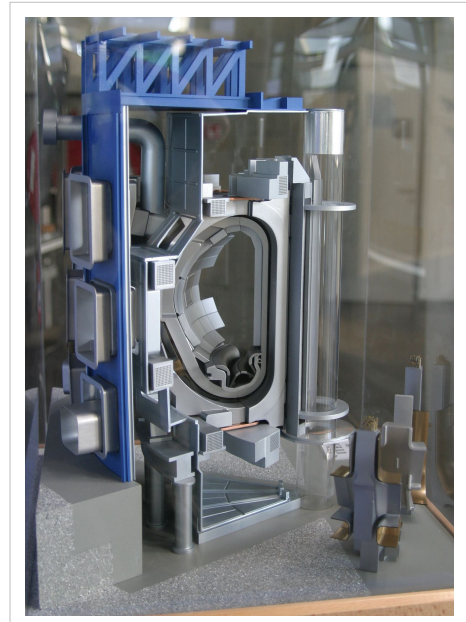
1. Fusión mediante confinamiento magnético.
2. Fusión mediante confinamiento inercial.

En el primer caso, en un recipiente donde se ha practicado un vacío elevado, se eleva la temperatura de una mezcla de deuterio-tritio mediante campos electromagnéticos hasta convertirla en plasma.

También mediante campos electromagnéticos se confina el plasma en una región lo más pequeña y alejada de las paredes del recipiente que sea posible, aumentando de forma continua la densidad y la temperatura.

A este tipo de fusión corresponden los diseños del Tokamak, como el futuro ITER, o del Stellarator, como el TJ-II español.

En el segundo caso se hace incidir un haz de fotones o de partículas cargadas (electrones o protones) muy energético e intenso sobre un blanco compuesto por el combustible (deuterio-tritio actualmente). Ese haz puede estar enfocado de forma directa sobre el blanco, o bien de forma indirecta sobre un dispositivo denominado holraum construido con



Maqueta de una sección de ITER.

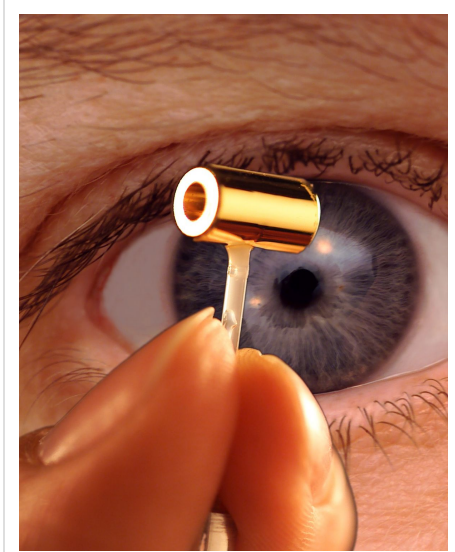
un material de alto Z que genera a su vez un intensísimo campo de rayos X que está enfocado sobre el blanco.

Hasta la década de los 70 no se desarrollaron láseres con las potencias necesarias para conseguir iniciar la reacción.

En la actualidad se investiga en varios centros, pero a nivel nacional. Esto se debe a que el mecanismo empleado produce microexplosiones termonucleares, de forma que tanto el software empleado en cálculos y simulaciones termohidráulicas, como los resultados obtenidos, pueden emplearse directamente en el armamento termonuclear. Por este motivo las instalaciones construidas hasta el momento, además de buscar la aplicación civil mediante generación de electricidad, poseen una importante componente militar ya que permiten, tras la prohibición de ensayos nucleares en superficie, realizar pruebas a escala diminuta (para los parámetros del armamento nuclear).

Aunque existen múltiples diseños tanto con el uso de láseres como de aceleradores de partículas, los proyectos más importantes hasta el momento en el mundo son el NIF de Estados Unidos y el LMJ francés, ambos diseños empleando láseres.

Véanse también: confinamiento magnético y confinamiento inercial



Holraum del NIF.

Seguridad

Aunque la misma filosofía empleada en la fisión puede emplearse en los reactores de fusión, se ha planteado esta como una opción no contaminante e intrínsecamente segura. Desde el punto de vista de la seguridad, ya que los reactores diseñados necesitan un aporte exterior de energía y de combustible, si existiera un accidente que produjese el fallo de la máquina la reacción se detendría, con lo que se hace imposible una reacción en cadena descontrolada.

El residuo principal de la reacción de fusión deuterio-tritio sería el Helio, que es un gas noble y por tanto no interacciona con nada, incluido el organismo humano. Sin embargo las reacciones nucleares de fusión desprenden neutrones altamente energéticos. Esto implica la producción de materiales radiactivos por activación neutrónica. Además, en un ciclo deuterio-tritio, una parte del propio combustible es también radiactivo (el tritio). Para minimizar los efectos, por tanto:

- se debe reducir tanto como se pueda la cantidad de material radiactivo utilizado así como el generado en la propia instalación;
- se debe anular en lo posible el riesgo derivado de la manipulación de los materiales radiactivos generados, ya sea en forma de combustible nuevo o reciclado o como residuos radiactivos;
- se deben definir cuáles son las mejores formas de gestionar esos vertidos.

Para ello se está investigando en el uso de materiales de baja activación, utilizando aleaciones que no son comunes en otras aplicaciones. Este aspecto podría disminuir la cantidad de residuos radiactivos generados, pero además en caso de accidente donde parte de los materiales se fundieran por las altas temperaturas, el inventario radiactivo emitido también sería menor. Además, la estrategia de diseño se centra en conseguir que todos los radioisótopos generados sean de semiperiodo corto (menor de 10 años). Si no se consiguiera, las estrategias a seguir serían idénticas a las estudiadas en el caso de los reactores de fisión.

Hasta los años 1990 no se había planteado realmente este problema, por lo que los materiales válidos para la fusión se pensaba que eran los aceros austeníticos (SS316L y SS316-modTi) y ferríticos/martensíticos (HT-9 y DIN 1.1494/MANET). Las investigaciones se habían centrado en la gestión de residuos, dejando de lado el estudio de los posibles accidentes. A partir de los 90 se plantea que debían contemplarse varios problemas en la optimización de los materiales de baja activación, subrayándose principalmente el aspecto de la seguridad frente a accidentes además del clásico de la gestión de los residuos. A partir de los aceros convencionales propuestos para fusión se propusieron versiones de baja activación, resultado de la sustitución de elementos que daban lugar a una radiactividad alta por

otros metalúrgicamente equivalentes y de baja actividad inducida.

Las soluciones que se adopten en la fusión inercial o en la magnética en principio no tendrán que ser iguales. Así se han desarrollado aleaciones de vanadio, titanio y cromo que presentan mejores comportamientos en la fusión inercial que en la magnética. Se sabe que los materiales cerámicos tienen mejor comportamiento que los aceros en ambos tipos de fusión.

En un principio, al estar todavía en fase de investigación, el problema no está completamente resuelto en este aspecto, y de hecho hasta que no exista una planta de fusión totalmente operativa será imposible conocer absolutamente los problemas existentes.

Generación de calor y electricidad a partir de otras reacciones nucleares

Un método ampliamente utilizado en aquellas aplicaciones en las que se requiere un aporte eléctrico de baja corriente, con una larga duración, es el uso de Unidades de calor mediante radioisótopos (RHU por sus siglas en inglés) acoplados a una serie de termopares que proporcionan una corriente eléctrica, los llamados generadores termoelectrónicos de radioisótopos.

En este caso se aprovecha la radiactividad emitida por los núcleos de algunos isótopos. Los isótopos considerados más interesantes para este tipo de aplicación son aquellos que emiten partículas alfa (como por ejemplo el ^{241}Am o el ^{210}Po), ya que se reaprovechan más eficientemente las radiaciones emitidas, y es más sencillo su manejo. Sin embargo también se han utilizado emisores beta, como el ^{90}Sr .

Estos generadores suelen poseer duraciones de varias décadas, y son extremadamente útiles en aplicaciones en las que otras soluciones no sirven. Por ejemplo, en zonas donde es difícil el mantenimiento o sustitución de las baterías y además no existe suficiente luz solar o viento. Se han utilizado en faros cercanos al polo norte en la antigua Unión Soviética y se utilizan frecuentemente en sondas espaciales. Una de sus aplicaciones más curiosas puede ser su uso en marcapasos.

En algunas sondas espaciales que deben permanecer a muy baja temperatura se utiliza simplemente su capacidad de generar calor, obviando la posibilidad de generación eléctrica.

El 15 de octubre de 1997 se lanzó la misión Cassini-Huygens con destino a Saturno y Titán, en la que se ensambló uno de estos dispositivos.^[40]

Véase también: Cassini-Huygens

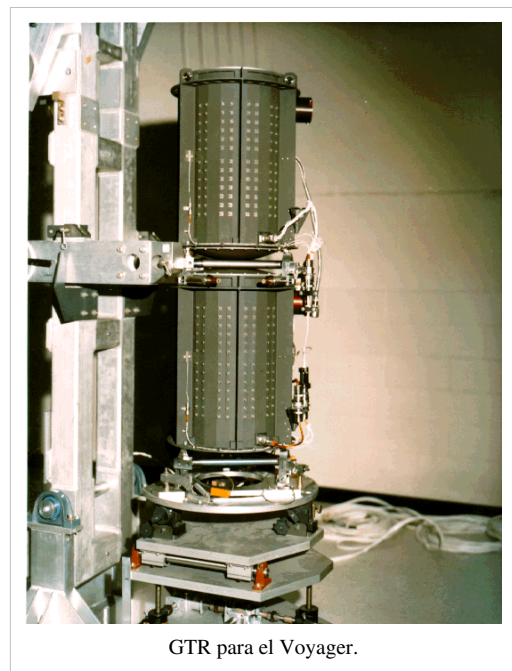
Seguridad

En estos dispositivos la seguridad se basa en dos sistemas principalmente:

- Por un lado asegurar su integridad a partir de su vigilancia continua,
- Por otro lado, conseguir que el material radiactivo empleado sea altamente inaccesible, mediante protecciones, sellos o incluso utilizando composiciones cerámicas que no reaccionan fácilmente con otros elementos.

En el caso de los GTR situados en zonas de alta inaccesibilidad, como los utilizados en faros instalados cerca de los polos, se suponía que la propia inaccesibilidad de las zonas aseguraba su integridad. Esto sin embargo no ha impedido que sucedieran varios accidentes.

En el caso de los utilizados en satélites espaciales, la seguridad de los materiales radiactivos se asegura al mantener una vigilancia continua en las instalaciones, tanto en la construcción como en el montaje de los satélites. Una vez



GTR para el Voyager.

lanzados al espacio, evidentemente se hace imposible su mal uso. Sin embargo, en algunas ocasiones se han usado GTR en satélites en órbita alrededor de la Tierra. Cuando esa órbita se hace inestable es posible que el satélite caiga de nuevo, fundiéndose en su mayor parte en la reentrada. Este, junto a un posible accidente en el lanzamiento son los principales problemas de seguridad en este caso. En total se han producido 6 accidentes conocidos de este tipo (el último en 1996 en una sonda rusa). Para evitar la dispersión del material radiactivo que contienen se fabrican en materiales cerámicos (insolubles y resistentes al calor), rodeado de una capa de iridio, otra de bloques de grafito de alta resistencia y un gel que le da resistencia ante una posible reentrada en la atmósfera.

Para los GTR utilizados como marcapasos el principal problema se encuentra en la pérdida de información acerca de los pacientes en los que se han utilizado, imposibilitando así su debido seguimiento. Por este motivo, existe la posibilidad de que el paciente, tras su fallecimiento, fuera incinerado, incinerando con ello el propio dispositivo y su material radiactivo.

Las fuentes radiactivas de los GTR sobre los que se ha perdido el control (principalmente tras la caída de la URSS) son el principal motivo de preocupación por su posible uso en atentados terroristas (como parte de una bomba sucia), y por este motivo se realizan grandes esfuerzos a nivel internacional por recuperarlas y ponerlas bajo control de nuevo.

Tratamiento de residuos nucleares

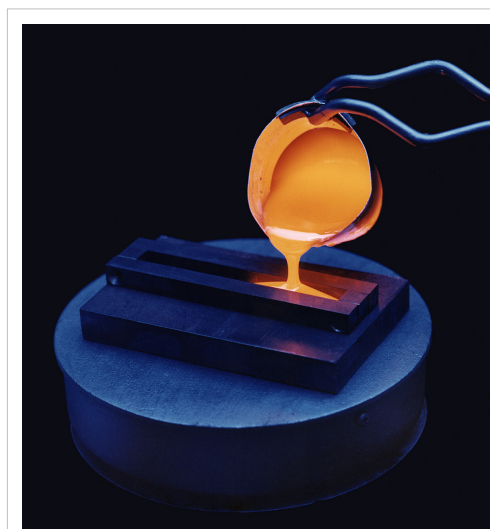
Véanse también: Residuo nuclear, Reprocesamiento nuclear y Transmutación

En general, cualquier aplicación industrial genera residuos. Todas las formas de generación de energía nuclear también los generan. Tanto los reactores nucleares de fisión o fusión (cuando entran en funcionamiento) como los GTR generan residuos convencionales (basura, proveniente por ejemplo de los restos de comida de los trabajadores) que es trasladada a vertederos o instalaciones de reciclaje, residuos tóxicos convencionales (pilas, líquido refrigerante de los transformadores, etc.) y residuos radiactivos. El tratamiento de todos ellos, con excepción hecha de los residuos radiactivos, es idéntico al que se da a los residuos del mismo tipo generado en otros lugares (instalaciones industriales, ciudades,...).

Es diferente el tratamiento que se emplea en los residuos radiactivos. Para ellos se desarrolló una regulación específica, gestionándose de formas diferentes en función del tipo de radiactividad que emiten y del semiperiodo que poseen. Esta regulación engloba todos los residuos radiactivos, ya procedan de instalaciones de generación de electricidad, de instalaciones industriales o de centros médicos.

Se han desarrollado diferentes estrategias para tratar los distintos residuos que proceden de las instalaciones o dispositivos generadores de energía nuclear:

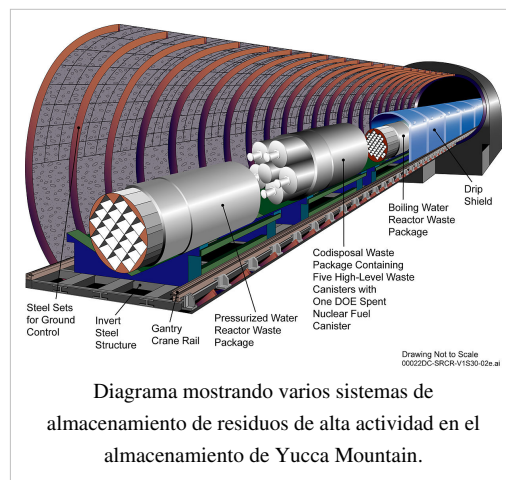
- **Baja y media actividad.**^[41] En este caso se trata de residuos con vida corta, poca radiactividad y emisores de radiaciones beta o gamma (pudiendo contener hasta un máximo de 4000 Bq g^{-1} de emisores alfa de semiperiodo largo). Suelen ser materiales utilizados en las operaciones normales de las centrales, como guantes, trapos, plásticos, etc. En general se prensan y secan (si es necesario) para reducir su volumen, se hormigonan (fijan) y se embidonan para ser almacenados durante un periodo de 300 o de 500 años, según los países, en almacenamientos controlados. En España este almacenamiento se encuentra en la provincia de Córdoba (El Cabril).
- **Alta actividad.**^[41] Estos residuos tienen semiperiodo largo, alta actividad y contienen emisores de radiaciones alfa (si son de semiperiodo largo solo si superan concentraciones de actividad de 4000 Bq g^{-1}). Se generan en



Vitrificación de los residuos nucleares tras su reprocesado.

mucho menor volumen pero son altamente nocivos inmediatamente después de ser generados. Generalmente, aunque no son los únicos, se trata de las propias barras de combustible de los reactores de fisión ya utilizadas. Para ellos se han desarrollado diversas estrategias:

1. Almacenamiento temporal: en las piscinas de las propias centrales (a veces llamados *ATT*), durante la vida de la central (habitualmente 40 años), o en almacenamientos construidos a propósito. En España aún se encuentra en proyecto el ATC).
2. Reprocesamiento: en este proceso se lleva a cabo una separación físico-química de los diferentes elementos, separando por una parte aquellos isótopos aprovechables en otras aplicaciones, civiles o militares (plutonio, uranio, cobalto y cesio entre otros). Es la opción más similar al reciclado. Sin embargo en el proceso no todos los elementos reciclados son totalmente reaprovechables, como por ejemplo el neptunio o el americio. Para estos, en un volumen mucho menor que el inicial, es necesario aun el uso de otras opciones como el almacenamiento geológico profundo.
3. Almacenamiento Geológico Profundo (AGP): este proceso consiste en estabilizar las barras de combustible gastadas en contenedores resistentes a tratamientos muy severos que posteriormente se introducen en localizaciones similares a las minas, ya existentes (como en el caso de minas profundas), o construidas para tal fin. Suelen estar en matrices geológicas de las que se sabe que han sido estables durante millones de años. Las más comunes son calizas, graníticas o salinas. Los técnicos estiman que estos AGP deberían poder preservar íntegros los residuos durante los miles de años en que sigan siendo tóxicos sin afectar a las personas de la superficie. Su principal defecto es que sería muy difícil o imposible recuperar estos residuos para su uso útil en el caso de que técnicas futuras puedan aprovecharlos eficientemente.
4. Transmutación en centrales nucleares de nueva generación (Sistemas Asistidos por Aceleradores o en reactores rápidos): estos sistemas usan torio como combustible adicional y degradan los desechos nucleares en un nuevo ciclo de fisión asistida, pudiendo ser una alternativa ante la dependencia del petróleo, aunque deberán vencer el rechazo de la población. El primer proyecto será construido alrededor del 2014 (Myrrha). Esta técnica se estima aceptable para aquellos radioisótopos de semiperiodo largo para los que no se ha hallado ninguna aplicación todavía. Esos isótopos más problemáticos son los transuránicos como el curio, el neptunio o el americio. Sin embargo para emplear esta técnica se precisan métodos adicionales, como el reprocesado previo.^{[42] [43]}



Para gestionar los residuos radiactivos suele existir en cada país un organismo creado exclusivamente para ello. En España se creó la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, que gestiona los residuos radiactivos de todo tipo generados tanto en las centrales nucleares como en el resto de instalaciones nucleares o radiactivas.

Regulación nuclear

La regulación nuclear puede separarse en cuatro grandes grupos:

1. Funciones de los reguladores nacionales,
2. Residuos,
3. Seguridad y
4. Protección radiológica.

Las bases científicas de toda la regulación internacional existente se fundan en estudios propios y recopilaciones llevadas a cabo por la CIPR,^[44] UNSCEAR^[45] o el NAS/BEIR americano.^[46] Además de estos, existen una serie de agencias de investigación y desarrollo en seguridad, como pueden ser la AEN^[47] o el EPRI.^[48] A partir de todas

ellas, existen dos organismos internacionales que desarrollan las bases para la legislación: el OIEA (a nivel internacional)^[49] y EURATOM (en Europa).^[50]



Junta de Gobernadores del OIEA.

También existen algunos organismos nacionales, que emiten documentación dedicada a cada uno de los campos, que sirven de guía a otros países. Así ocurre por ejemplo con la NCRP, la NRC o la EPA americanas, la HPA inglesa (antiguamente NRPB) o el CEA francés.

Además de estas regulaciones específicas, existen otras leyes y acuerdos que tienen en mayor o menor medida relación con la energía nuclear. Así por ejemplo las leyes de calidad del agua o la convención OSPAR. Aunque en el Protocolo de Kyoto, que trata sobre las industrias que emiten gases de efecto invernadero, no se menciona la energía nuclear, sí aparece en otros documentos referentes al calentamiento global antropogénico. Así, en los acuerdos de Bonn de 2001,^[51] se establecieron los mecanismos de compraventa de emisiones de gases de efecto invernadero y los mecanismos de intercambio de tecnologías, excluyendo ambos explícitamente a la energía nuclear. De este modo, no se pueden reducir las cuotas de emisión de los países altamente industrializados mediante la venta de tecnología nuclear a países menos desarrollados, ni se pueden vender las cuotas de emisiones a países que funden sus bajas emisiones en la energía nuclear. El IPCC, sin embargo, sí recomienda en su cuarto informe el uso de la energía nuclear como una de las únicas formas (junto a las energías renovables y la eficiencia energética) de reducir la emisión de gases de efecto invernadero.^[52]

Véase también: Regulación nuclear en España

Controversia sobre la energía nuclear

Ventajas


La energía nuclear, genera un tercio de la energía eléctrica que se produce en la Unión Europea, evitando así, la emisión de 700 millones de toneladas de dióxido de carbono por año a la atmósfera.^[cita requerida] Por otra parte, también se evitan otras emisiones de elementos contaminantes que se generan en el uso de combustibles fósiles. Además, se reducen el consumo de las reservas de combustibles fósiles, generando con muy poca cantidad de combustible muchísima mayor energía, evitando así gastos en transportes, residuos, etcétera.

Inconvenientes

- Existe un alto riesgo de contaminación en caso de accidente o sabotaje.
- Se producen residuos radiactivos que son difíciles de almacenar y son activos durante mucho tiempo.
- Tiene un alto y prolongado coste de las instalaciones y mantenimiento de las centrales nucleares.

- Puede usarse con fines no pacíficos.

Véase también

-  Portal:Energía. Contenido relacionado con **Energía**.
 - Accidente de Chernóbil
 - Central nuclear
 - Cobaltoterapia
 - Confinamiento magnético
 - Confinamiento inercial
 - Controversia sobre la energía nuclear
 - Edificio de contención
 - Energía de fusión
 - Energía nuclear en España
 - Energía renovable
 - Isótopos
 - Medicina nuclear
 - Política sobre Energía Nuclear
 - Procesos nucleares

Referencias



- [1] En inglés estos significados están claramente diferenciados por los términos "*nuclear energy*" y "*power energy*", respectivamente.
- [2] Tyler Miller, G. (2002). *Introducción a la ciencia ambiental*. «Quizá los tres mecanismos menos eficaces en su consumo de energía que tienen amplio uso en el mundo son [...] y las plantas de energía nuclear [...] (que desaprovechan el 86% de la energía de su combustible nuclear y probablemente el 92% cuando se incluye la energía necesaria para manejar los residuos radiactivos y desmantelar las centrales nucleares fuera de uso.)»
- »
- [3] Bulbulian, ana (1987). «El descubrimiento de la radiactividad (http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/42/htm/sec_5.html)». En Fondo de Cultura Económica. *La radiactividad*. Phroneris, Biblioteca Digital (1ª edición). México. ISBN 968-16-2651-6.
- [4] Los comienzos de la era atómica: Carta de Einstein a Roosevelt (http://www.mphpa.org/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=172)
- [5] Web del proyecto Myrrha (<http://www.sckcen.be/myrrha/home.php>)
- [6] Condiciones de Lawson para construir un reactor de fusión útil (<http://www.jet.efda.org/pages/publications/yop/dec05-aere-gpr1807.pdf>)
- [7] Resumen de la patente GB817681 (<http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=GB817681&F=0>)
- [8] Energía nuclear en el espacio. Breve historia sobre los RTG (<http://www.ne.doe.gov/pdfFiles/NPSpace.PDF>)
- [9] Marcapasos nucleares (http://home.comcast.net/~dprutchi/nuclear_pacemakers.pdf)
- [10] Settle, Frank (2005), Nuclear Chemistry. Discovery of the Neutron (1932) (<http://www.chemcases.com/nuclear/nc-01.htm>) (en inglés), General Chemistry Case Studies, en *chemcases.com*. [08-04-2008]
- [11] Definición de arma según el Diccionario de la RAE (<http://buscon.rae.es/draeI/Srvlt/ObtenerHtml?origen=RAE&IDLEMA=81917&NEDIC=Si>)
- [12] Estudio sobre un vehículo nuclear pulsado. De General Atomic (en inglés) (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19650058729_1965058729.pdf)
- [13] Proyecto Dédalo hacia la estrella Barnard (en inglés) (<http://www.bisbos.com/rocketscience/spacecraft/daedalus/daedalus.html>)
- [14] Proyecto Longshot: Una sonda a Alfa Centauri (en inglés) (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19890007533_1989007533.pdf)
- [15] Patente de un diseño de cohete de radioisótopos (<http://www.freepatentsonline.com/3981805.html>)
- [16] Artículo corto de Ford sobre el modelo Ford Nucleon (http://media.ford.com/article_display.cfm?article_id=3359)
- [17] Departamento de Energía de Estados Unidos. Iniciativa de hidrógeno nuclear (en inglés) (<http://www.ne.doe.gov/NHI/neNHI.html>)
- [18] Ciencia y desarrollo. El hidrógeno y la industria nuclear (<http://www.conacyt.mx/comunicacion/revista/201/Articulos/elhidrogenoylaindustriannuclear/elhidrogenoylaindnucl02.htm>)
- [19] Foro Internacional sobre Generación IV. (en inglés) (<http://www.gen-4.org/PDFs/GenIVRoadmap.pdf>)
- [20] European Fusion Development Agreement (EFDA). (en inglés) (http://www.efda.org/fusion_energy/safety_and_the_environment.htm)
- [21] Greenhouse Emissions of Nuclear Power (<http://nuclearinfo.net/Nuclearpower/WebHomeGreenhouseEmissionsOfNuclearPower>) nuclearinfo.net (en inglés)
- [22] WNA (20-03-2008), World Nuclear Power Reactors 2006-08 and Uranium Requirements (<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm>) (en inglés), World Nuclear Association. [08-04-2008] Se actualiza cada dos meses.
- [23] IAEA (2007). *ENERGY, ELECTRICITY AND NUCLEAR POWER: DEVELOPMENTS AND PROJECTIONS — 25 YEARS PAST AND FUTURE*. IAEA. ISBN 978-92-0-107407-2. (en inglés) (<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PubDetails.asp?pubId=7791>)
- [24] informe REE del 2003 (http://www.ree.es/cap07/pdf/infosis/Inf_Sis_Elec_REE_2002_ElSectorElectrico.pdf)
- [25] Federico Goded Echeverría y Vicente Serradell García (1975). *Teoría de reactores y elementos de ingeniería nuclear. Tomo I*. Publicaciones científicas de la JEN. ISBN 84-500-6999-8.

- [26] Número de reactores de cada tipo en el mundo (en inglés) (<http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>)
- [27] Micro reactor de Toshiba (en inglés) (<http://www.nextenergynews.com/news1/next-energy-news-toshiba-micro-nuclear-12.17b.html>)
- [28] Tema de Seguridad del concurso-oposición para el acceso al Consejo de Seguridad Nuclear (primer ejercicio) (<http://www.csn.es/descarga/ParteC2004.zip>)
- [29] Tema de Seguridad del concurso-oposición para el acceso al Consejo de Seguridad Nuclear (tercer ejercicio) (<http://www.csn.es/descarga/parteA.zip>)
- [30] Proyecto final de carrera de Raquel Callarisa. De la fig. 5.4 (pag. 40) (<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2892/1/50401-1.pdf>)
- [31] Sucesos notificables en 2000, 2001 y 2003 (http://nodo50.net/tortuga/article.php3?id_article=622)
- [32] Consumer Eroski, Sucesos notificables en 2002 (<http://www.consumer.es/web/es/salud/2003/11/26/91683.php>), acceso 1 de diciembre de 2007.
- [33] El Mundo, Sucesos notificables en 2004 y 2005 (<http://www.elmundo.es/elmundo/2006/07/07/ciencia/1152264358.html>), acceso 1 de diciembre de 2007.
- [34] Resolución cuarta de la comisión de economía y hacienda Del congreso de los diputados de fecha 17 de diciembre de 2003, por la que se insta al CSN para que remita un informe sobre los criterios utilizados para la clasificación de sucesos notificables e información al público y su implicación en la experiencia operativa interior y exterior. (http://www.csn.es/descarga/resol_ec_ha_4.pdf)
- [35] R. Callarisa. Proyecto Fin de Carrera. Métodos de análisis de sucesos notificables en centrales nucleares para su valoración como sucesos iniciadores de accidentes y su clasificación en la escala de seguridad INES. Aplicación en las centrales nucleares catalanas. (2005). (<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2892/1/50401-1.pdf>)
- [36] Web del CSN con información sobre la escala INES y las implicaciones de cada uno de los grados definidos (http://www.csn.es/plantillas/frame_nivelult.jsp?id_nodo=681&&keyword=&auditoria=F)
- [37] Energy from fusion. EURATOM (EUR 19315). (en inglés) (http://bacterio.uc3m.es/investigacion/fusion/intro/fusion_leaflet_euratom.pdf)
- [38] Cuarto informe del IPCC (grupo de trabajo III)(en inglés) (http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/FAR4docs/final_pdfs_ar4/Chapter04.pdf)
- [39] ITER: futuro de la energía con la fusión atómica. Entrevista a uno de los directores de ITER (<http://usinfo.state.gov/journals/itgic/1006/ijgs/holtkamp.htm>)
- [40] Algunos videos del ensamblaje del RTG que incorpora la sonda Cassini-Huygens (<http://saturn.jpl.nasa.gov/multimedia/videos/video-details.cfm?videoID=14>)
- [41] Guía de Seguridad 111 del OIEA: Clasificación de los residuos radiactivos. (en inglés) (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub950e_web.pdf)
- [42] *Partitioning and Transmutation: Making Wastes Nonradioactive*. Breve descripción de la transmutación. Oak Ridge Laboratory. (en inglés) (<http://www.ornl.gov/info/ornlreview/rev26-2/text/radside1.html>)
- [43] Página web de la AEN donde puede encontrarse información adicional sobre la transmutación (en inglés) (<http://www.nea.fr/html/trw/index.html>)
- [44] Annals of the ICRP. Recomendaciones de la ICRP (en inglés). (http://ec.europa.eu/energy/nuclear/index_en.html)
- [45] Publicaciones de UNSEAR (en inglés) (<http://www.unsear.org/unsear/en/publications.html>)
- [46] Resumen del BEIR VII (en inglés) (http://dels.nas.edu/dels/rpt_briefs/beir_vii_final.pdf)
- [47] Banco de datos nucleares de la AEN (en inglés) (<http://www.nea.fr/html/databank/welcome.html>)
- [48] Web del Electric Power Research Institute (en inglés). (http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&cached=true&parentname=CommunityPage&parentid=1&in_hi_userid=39735&control=SetCommunity&CommunityID=308&PageID=561)
- [49] Publicaciones científicas y técnicas del OIEA (en inglés). (<http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/publications.asp>)
- [50] Colección de documentos de la Unión Europea en materia nuclear (en inglés) (http://ec.europa.eu/energy/nuclear/index_en.html)
- [51] Mecanismos de flexibilidad establecidos en los acuerdos de Bonn (http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/flexibilidad/mecanismos/index_.htm)
- [52] 4º informe del IPCC (Grupo III). (en inglés) (http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/AR4-chapters.html)

Bibliografía

- Jaime Semprún (2007). *La Nuclearización del mundo*. Pepitas de Calabaza, Logroño. ISBN 978-84-935704-5-3.
- Paul A. Tipler (1991). *Física. Tomo II*. Editorial Reverte. ISBN 84-291-4357-2.
- José García Santesmases (1978). *Física General*. Paraninfo. ISBN 84-283-0973-6.
- Federico Goded Echeverría y Vicente Serradell García (1975). *Teoría de reactores y elementos de ingeniería nuclear. Tomo I*. Publicaciones científicas de la JEN. ISBN 84-500-6999-8.
- Kenneth S. Krane (1988). *Introductory nuclear physics*. John Wiley & Sons, Inc.. ISBN 0-471-80553-X.

Enlaces externos

-  Wikiquote alberga frases célebres de o sobre **Energía nuclear**. Wikiquote
-  Wikimedia Commons alberga contenido multimedia sobre **Energía nuclear**. Commons

Organismos reguladores

- Consejo de Seguridad Nuclear de España (<http://www.csn.es>)
- Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (<http://www.cnea.gov.ar>)
- Comisión Chilena de Energía Nuclear (<http://www.cchen.cl>)

Proyectos internacionales

- Proyecto Iter (<http://www-fusion.ciemat.es/fusion/iter/ITER.html>)
- Proyecto europeo MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) (<http://myrrha.sckcen.be/>)

Organizaciones ecologistas

- Informe del partido de los verdes europeos del estado de la industria nuclear mundial (http://www.greens-efa.org/cms/topics/dokbin/206/206749.the_world_nuclear_industry_status_report@es.pdf)
- WISE en español. Base de datos con información útil para las campañas antinucleares de los grupos de presión (<http://www10.antenna.nl/wise/esp/index.html>)
- Grup de Científics y Tècnics per una Energia No Nuclear (en catalán) (<http://energiasostenible.org/>)
- GreenPeace: sección nuclear (<http://www.greenpeace.org/espana/campaigns/energ-a-nuclear>)
- Greenpeace Argentina. Mayak: Media vida marcada por los daños de la energía nuclear (<http://www.greenpeace.org.ar/mayak>)
- Ecologistas en Acción (<http://www.ecologistasenaccion.org>)
- Ecologistas a favor de la Energía Nuclear (en español) (<http://www.ecolo.org/base/basesp.htm>)

Otros

- Foro Nuclear Español (<http://www.foronuclear.org>)
- Jóvenes Nucleares (<http://www.jovenesnucleares.org/>)
- Web general sobre energía nuclear (<http://www.nuclear.tk>)
- Sociedad Nuclear Europea (en inglés) (<http://www.euronuclear.org/>)
- Yo soy nuclear (<http://www.yosoynuclear.org/>)
- Energía nuclear... ¿sí o no? (http://www.elmundo.es/especiales/2006/04/ciencia/energia_nuclear/)
- Energía nuclear: el poder del átomo (<http://nuclear.5dim.es/>)
- Juan José Gómez Cadenas, «Epicentro. ¿Es posible un debate nuclear sin retórica?» (http://www.revistadelibros.com/articulo_completo.php?art=4629), *Revista de Libros*, 160, abril de 2010.

Reactor nuclear

Un **reactor nuclear** es un dispositivo en donde se produce una reacción nuclear controlada. Se puede utilizar para la obtención de energía en las denominadas centrales nucleares, la producción de materiales fisionables, como el plutonio, para ser usados en armamento nuclear, la propulsión de buques o de satélites artificiales o la investigación. Una central nuclear puede tener varios reactores. Actualmente solo producen energía de forma comercial los reactores nucleares de fisión, aunque existen reactores nucleares de fusión experimentales.

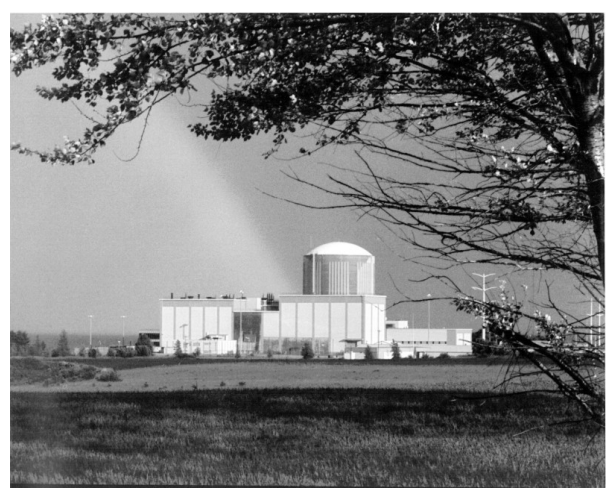
También podría decirse que es una instalación física donde se produce, mantiene y controla una reacción nuclear en cadena. Por lo tanto, en un reactor nuclear se

utiliza un combustible adecuado que permita asegurar la normal producción de energía generada por las sucesivas fisiones. Algunos reactores pueden disipar el calor obtenido de las fisiones, otros sin embargo utilizan el calor para producir energía eléctrica.

La potencia de un reactor de fisión puede variar desde unos pocos kW térmicos a unos 4500 MW térmicos (1500 MW "eléctricos"). Deben ser instalados en zonas cercanas al agua, como cualquier central térmica, para refrigerar el circuito, y deben ser emplazados en zonas sísmicamente estables para evitar accidentes. Poseen grandes medidas de seguridad. No emiten gases que dañen la atmósfera pero producen residuos radiactivos que duran decenas de miles de años, y que deben ser almacenados para su posterior uso en reactores avanzados y así reducir su tiempo de vida a unos cuantos cientos de años.

Aplicaciones

- Generación nuclear:
 - Producción de calor para la generación de energía eléctrica
 - Producción de calor para uso doméstico e industrial
 - Producción de hidrógeno mediante electrólisis de alta temperatura
 - Desalación
- Propulsión nuclear:
 - Marítima
 - Cohetes de propulsión térmica nuclear (propuesta).
 - Cohetes de propulsión nuclear pulsada (propuesta).
- Transmutación de elementos:
 - Producción de plutonio, utilizado para la fabricación de combustible de otros reactores o de armamento nuclear
 - Creación de diversos isótopos radiactivos, como el americio utilizado en los detectores de humo, o el cobalto-60 y otros que se utilizan en los tratamientos médicos
- Aplicaciones de investigación, incluyendo:
 - Su uso como fuentes de neutrones y de positrones (p. ej. para su uso de análisis mediante activación neutrónica o para el datado por el método de potasio-argón).
 - Desarrollo de tecnología nuclear.



Planta nuclear en Kewaunee, Wisconsin.

Reactor nuclear de fisión

Véase también: *Fisión nuclear*

Un reactor nuclear de fisión consta de las siguientes partes esenciales:

1. **Combustible.-**Isótopo fisionable (divisible) o fértil (convertible en fisionable por activación neutrónica): Uranio-235, Uranio-238, plutonio-239, Torio-232, o mezclas de estos (MOX, Mezcla de óxidos de uranio y plutonio). El combustible habitual en las centrales refrigeradas por agua ligera es el dióxido de uranio enriquecido, en el que alrededor del 3% de los núcleos de uranio son de U-235 y el resto de U-238. La proporción de U-235 en el uranio natural es sólo de 0.72%, por lo que es necesario someterlo a un proceso de enriquecimiento en este nucleido.
2. **Moderador (nuclear).-** Agua, agua pesada, grafito, sodio metálico: Cumplen con la función de frenar la velocidad de los neutrones producidos por la fisión, para que tengan la oportunidad de interactuar con otros átomos fisionables y mantener la reacción. Como regla general, a menor velocidad del neutrón, mayor probabilidad de fisionar con otros núcleos del combustible en los reactores que usan uranio 235 como combustible.
3. **Refrigerante.-** Agua, agua pesada, anhídrido carbónico, helio, sodio metálico: Conduce el calor generado hasta un intercambiador de calor, o bien directamente a la turbina generadora de energía eléctrica o propulsión.
4. **Reflector.-** Agua, agua pesada, grafito, uranio: reduce el escape de neutrones y aumenta la eficiencia del reactor.
5. **Blindaje.-** Hormigón, plomo, acero, agua: Evita la fuga de radiación gamma y neutrones rápidos.
6. **Material de control.-** Cadmio o boro: hace que la reacción en cadena se pare. Son muy buenos absorbentes de neutrones. Generalmente se usan en forma de barras (de acero borado por ejemplo) o bien disueltos en el refrigerante.
7. **Elementos de Seguridad.-** Todas las centrales nucleares de fisión, constan en el 2007 de múltiples sistemas, activos (responden a señales eléctricas), o pasivos (actúan de forma natural, por gravedad, por ejemplo). La contención de hormigón que rodea a los reactores es la principal de ellas. Evitan que se produzcan accidentes, o que, en caso de producirse, haya una liberación de radiactividad al exterior del reactor.

Tipos de reactores nucleares de fisión

Existen varios tipos básicos en el 2007:^[1]

LWR - Light Water Reactors (Reactores de agua ligera): utilizan como refrigerante y moderador el agua. Como combustible uranio enriquecido. Los más utilizados son los PWR (*Pressure Water Reactor* o reactores de agua a presión) y los BWR (*Boiling Water Reactor* o reactores de agua en ebullición): 264 PWR y 94 BWR en funcionamiento en el 2007.

CANDU - Canada Deuterium Uranium (Canadá deuterio uranio): Utilizan como moderador y refrigerante agua pesada (compuesta por dos átomos de deuterio y uno de oxígeno). Como combustible utilizan uranio natural: 43 en funcionamiento en el 2007.

FBR - Fast Breeder Reactors (reactores rápidos realimentados): utilizan neutrones rápidos en lugar de térmicos para la consecución de la fisión. Como combustible utiliza plutonio y como refrigerante sodio líquido. Este reactor no necesita moderador: 4 operativos en el 2007. Solo uno en operación.

AGR - Advanced Gas-cooled Reactor (reactor refrigerado por gas avanzado): usa uranio como combustible. Como refrigerante utiliza CO₂ y como moderador grafito: 18 en funcionamiento en el 2007.

RBMK - Reactor Bolshoy Moshchnosty Kanalny (reactor de canales de alta potencia): su principal función es la producción de plutonio, y como subproducto genera energía eléctrica. Utiliza grafito como moderador y agua como refrigerante. Uranio enriquecido como combustible. Puede recargarse en marcha. Tiene un coeficiente de reactividad positivo. El reactor de Chernóbil era de este tipo. Existían 12 en funcionamiento en el 2007.

ADS - Accelerator Driven System (sistema asistido por acelerador): utiliza una masa subcrítica de torio, en la que se produce la fisión solo por la introducción, mediante aceleradores de partículas, de neutrones en el reactor. Se

encuentran en fase de experimentación, y se prevé que una de sus funciones fundamentales sería la eliminación de los residuos nucleares producidos en otros reactores de fisión.

Ventajas de los reactores nucleares de fisión

Una de las ventajas de los reactores nucleares actuales es que casi no emiten contaminantes al aire (aunque periódicamente purgan pequeñas cantidades de gases radiactivos), y los residuos producidos son muchísimo menores en volumen y más controlados que los residuos generados por las plantas alimentadas por combustibles fósiles. En esas centrales térmicas convencionales que utilizan combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas), se emiten gases de efecto invernadero (CO_2 principalmente), gases que producen lluvia ácida (SO_2 principalmente), carbonilla, metales pesados, miles de toneladas anualmente de cenizas, e incluso material radiactivo natural concentrado (NORM). En una central nuclear los residuos sólidos generados son del orden de un millón de veces menores en volumen que los contaminantes de las centrales térmicas.

El uranio enriquecido utilizado en las centrales nucleares no sirve para construir un arma nuclear ni para usar uranio procedente de ellas. Para ello se diseñan los reactores en ciclos de alto enriquecimiento o bien se usan diseños como reactores tipo RBMK usados para la generación de plutonio.

Últimamente se investigan centrales de fisión asistida, donde parte de los residuos más peligrosos serían destruidos mediante el bombardeo con partículas procedentes de un acelerador (protones seguramente) que por espalación producirían neutrones que a su vez provocarían la transmutación de esos isótopos más peligrosos. Esta sería una especie de central de neutralización de residuos radiactivos automantenida. El rendimiento de estas centrales sería en principio menor, dado que parte de la energía generada se usaría para la transmutación de los residuos. Se estima que la construcción del primer reactor de transmutación (Myrrha) comenzará en el año 2014.

Desventajas de los reactores nucleares de fisión

La percepción de peligro en la población proviene de varios factores: 1) accidente en una central atómica, 2) ataque terrorista, 3) peligrosidad de los residuos y su alto poder contaminante del medio ambiente, 4) basureros nucleares, 5) posible desviación de los residuos para la producción de armas de destrucción masiva.

Los reactores nucleares generan residuos radiactivos. Algunos de ellos con un semiperiodo elevado, como el americio, el neptunio o el curio y de una alta toxicidad. Los detractores de la energía nuclear hacen hincapié en el peligro de esos residuos que duran cientos e incluso miles de años.

Algunas centrales también sirven para generar material adicional de fisión (plutonio) que puede usarse para la creación de armamento nuclear. Dicho interés en la creación de dichas sustancias impone un diseño específico del reactor en detrimento de la ecología del mismo.

La probabilidad de que un accidente similar al sucedido en Chernobyl se repita en las centrales occidentales es indeterminable.

Los accidentes nucleares más graves han sido: Mayak (Rusia) en 1957, Windscale (Gran Bretaña) en 1957, Three Mile Island (EE. UU.) en 1979, Chernóbil (Ucrania) en 1986, Tokaimura (Japón) en 1999 y Fukushima (Japón) 2011. Y la lista es extensa en el caso de accidentes serios como filtraciones, y/o pérdidas de material radioactivo.

A estos accidentes, se le suma la pérdida económica que generan los basureros nucleares y el temor de una disposición inadecuada de los residuos nucleares. El cual está vinculado a un factor económico. Cuando se calcula el costo del Kw hora generado en una planta atómica, no se incluyen los costos de los basureros nucleares. De incluirse este costo, el Kw hora es el más caro de todos los sistemas de producción de energía. Por esta razón, hay pocos basureros nucleares que cumplan los requisitos mínimos de seguridad. Y la disposición de los residuos ha sido, y sigue siendo, un tema de controversia.

Reactor nuclear de fusión

Véase también: *Fusión nuclear*

Instalación destinada a la producción de energía mediante la fusión nuclear. Tras más de 60 años de investigación en este campo, se ha logrado mantener una reacción controlada, si bien aún no es energéticamente rentable.

La mayor dificultad se halla en soportar la enorme presión y temperatura que requiere una fusión nuclear (que sólo es posible encontrar de forma natural en el núcleo de una estrella). Además este proceso requiere una enorme inyección de energía inicial (aunque luego se podría automantener ya que la energía desprendida es mucho mayor)

Actualmente existen dos líneas de investigación, el confinamiento inercial y el confinamiento magnético.

El **confinamiento inercial** consiste en contener la fusión mediante el empuje de partículas o de rayos láser proyectados contra una partícula de combustible, que provocan su ignición instantánea.

Los dos proyectos más importantes a nivel mundial son el NIF (National Ignition Facility) en EE.UU. y el LMJ (Laser Mega Joule) en Francia.

El **confinamiento magnético** consiste en contener el material a fusionar en un campo magnético mientras se le hace alcanzar la temperatura y presión necesarias. El hidrógeno a estas temperaturas alcanza el estado de plasma.

Los primeros modelos magnéticos, americanos, conocidos como Stellarator generaban el campo directamente en un reactor toroidal, con el problema de que el plasma se filtraba entre las líneas del campo.

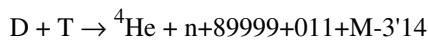
Los ingenieros rusos mejoraron este modelo dando paso al Tokamak en el que un arrollamiento de bobina primario induce el campo sobre el plasma, aprovechando que es conductor, y utilizándolo de hecho como un arrollamiento secundario. Además la resistencia eléctrica del plasma lo calentaba.

El mayor reactor de este tipo, el JET (toro europeo conjunto) ha conseguido condiciones de fusión nuclear con un factor $Q > 0,7$. Esto significa que el ratio entre la energía generada por fusión y la requerida para sostener la reacción es de 0,7. Para que la reacción se auto sostenga deben alcanzarse parámetros superiores a $Q > 1$ y más aún para su viabilidad económica. El primer objetivo debe ser alcanzado con el proyecto ITER y el segundo con DEMO.

Se ha comprometido la creación de un reactor aun mayor, el ITER uniendo el esfuerzo internacional para lograr la fusión. Aun en el caso de lograrlo seguiría siendo un reactor experimental y habría que construir otro prototipo para probar la generación de energía, el llamado proyecto DEMO.

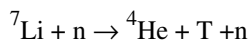
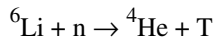
Posibles combustibles para reactores de fusión nuclear

La reacción óptima para producir energía por fusión es la del deuterio y tritio debido a su elevada sección eficaz. Es también, por ello, la más usada en las pruebas experimentales. La reacción es la siguiente:

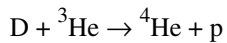


Obtener deuterio no es difícil ya que es un elemento estable y abundante que se formó en grandes cantidades en la sopa primordial de partículas (véase Big Bang). En el agua una parte por 5000 es deuterio. Esto significa que hay 30 gramos de material en cada metro cúbico de agua. En un reactor automantenido la reacción deuterio-tritio generaría energía y neutrones. Los neutrones son la parte negativa de la reacción y hay que controlarlos ya que las reacciones de captación de neutrones en las paredes del reactor o en cualquier átomo del reactivo pueden inducir radiactividad. De hecho, los neutrones, con tiempo suficiente pueden llegar a debilitar la estructura del propio contenedor con el consecuente riesgo de que se produzcan peligrosas fisuras. Para ello están los moderadores y blindajes de neutrones tales como el agua pesada, el berilio, el sodio o el carbono como moderadores muy usados en las centrales de fisión, o el boro y el cadmio, usados como productos que paran completamente los neutrones absorbiéndolos. Si se quiere fabricar un reactor realmente *limpio* habrá que buscar otras fórmulas. Se ha planteado una doble solución al problema de los neutrones y al de la abundancia del tritio. El tritio no se encuentra en la naturaleza ya que es inestable así que hay que fabricarlo. Para obtenerlo se puede recurrir a las centrales de fisión, donde se puede generar por la activación del hidrógeno contenido en el agua, o al bombardeo del litio, material abundante en la corteza

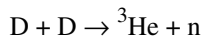
terrestre, con neutrones.



Hay dos isótopos estables del litio el litio-6 y el litio-7 siendo éste último mucho más abundante. Por desgracia, la reacción que absorbe neutrones es la que se da con el litio-6, el menos abundante. Todo esto tampoco evita que muchos neutrones acaben impactando con las paredes del propio reactor con la subsiguiente fabricación de átomos radiactivos. A pesar de ello una de las propuestas para el ITER es la de recubrir las paredes con litio-6 el cual pararía una buena parte de los neutrones para producir más tritio. Debido a todos estos problemas se están investigando otras reacciones de sección eficaz alta pero más *limpias*. Una de la más prometedoras es la del deuterio más helio-3.



El problema en esta reacción reside en la menor sección eficaz con respecto a la de deuterio-tritio y en la propia obtención del helio-3 que es el isótopo más raro de dicho elemento. Los protones no entrañan tanto peligro como los neutrones ya que estos no serán fácilmente captados por los átomos debido a la barrera coulombiana que deben atravesar cosa que con las partículas de carga neutra como los neutrones no ocurre. Además un protón puede ser manipulado mediante campos electromagnéticos. Una solución para obtener helio-3 artificialmente sería la de incorporar, en el propio reactor, la reacción deuterio-deuterio.



El problema es que, de nuevo, obtenemos un neutrón residual, lo que nos devuelve de nuevo al problema de los neutrones. Quizá la clave fuera la obtención de helio-3 natural, pero éste es extremadamente raro en la Tierra. Hay que tener en cuenta que el poco helio-3 natural que se produce por radiactividad tiende a escapar de nuestra densa atmósfera. Lo curioso es que dicho isótopo es abundante en la Luna. Se encuentra esparcido por su superficie y proviene del viento solar que durante miles de millones de años ha bañado la desnuda superficie lunar con sus partículas ionizadas. Este helio lunar podría ser, en un futuro, la clave para los reactores de fusión.

Mientras tanto se está investigando en materiales que aunque se activen, solo den lugar a isótopos de vida media corta, con lo que dejando reposar un periodo corto a esos materiales, podrían considerarse como residuos convencionales (no radiactivos). El problema principal, en cualquier caso, seguiría estando en la dificultad de mantener en condiciones al armazón del núcleo sin que este se deteriorara y hubiese que cambiarlo cada poco tiempo.


Véase también

- Anexo:Reactores nucleares
- Procesos nucleares
- Energía nuclear
- Fisión nuclear
- Fusión nuclear
- Combustible nuclear
- Moderador nuclear
- Residuo nuclear
- Reprocesamiento nuclear
- Transmutación
- Propulsión nuclear
- Reactores nucleares naturales
- Edificio de contención
- EPR (European Pressurised Water Reactor)
- Radiactividad

Referencias

[1] Número de reactores de cada tipo en el mundo (en inglés) (<http://www.world-nuclear.org/info/inf32.html>)

Enlaces externos

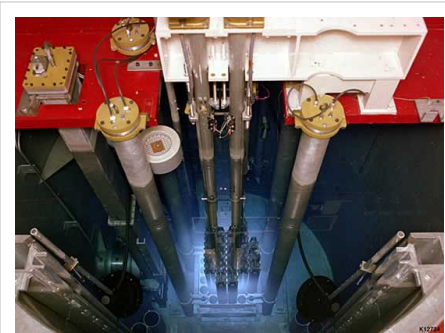
-  Wikimedia Commons alberga contenido multimedia sobre **Reactor nuclear**. Commons
- Los peligros de los reactores nucleares (<http://www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/los-peligros-de-los-reactores.pdf>), un informe de Helmut Hirsch, Oda Becker, Mycle Schneider y Antony Froggatt para Greenpeace.
- La producción de electricidad de origen nuclear en España. CSIC (<http://www.ieg.csic.es/age/boletin/33/3304.pdf>)
- Información sobre reactores nucleares. Foro nuclear (http://www.foronuclear.org/energia_nuclear_mundo.jsp)
- ¿Qué es un reactor nuclear?. Físicanet (http://www.fisicanet.com.ar/energias/nuclear/en04_energia_nuclear.php)
- Ingeniería Nuclear (<http://www.ib.edu.ar/>)
- Reactor Nuclear CAREM - moderna central eléctrica de diseño argentino (http://www.ciencia-tecnologia.com.ar/desarrollos_av/reactor_carem.htm)

Radiación de Cherenkov

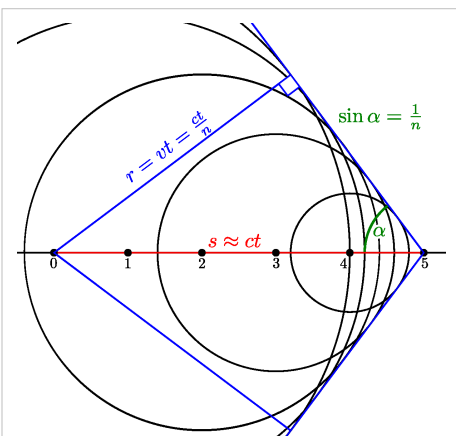
La **radiación de Cherenkov** (también escrito **Cerenkov** o **Čerenkov**) es una radiación de tipo electromagnético producida por el paso de partículas en un medio a velocidades superiores a las de la luz en dicho medio. La velocidad de la luz depende del medio, y alcanza su valor máximo en el vacío. El valor de la velocidad de la luz en el vacío no puede superarse pero sí en un medio en el que ésta es forzosamente inferior. La radiación recibe su nombre del físico Pavel Alekseyevich Cherenkov quien fue el primero en caracterizarla rigurosamente y explicar su producción. Cherenkov recibió el Premio Nobel de Física en 1958 por sus descubrimientos relacionados con esta reacción.

La radiación Cherenkov es un tipo de onda de choque que produce el brillo azulado característico de los reactores nucleares. Éste es un fenómeno similar al de la generación de una onda de choque cuando se supera la velocidad del sonido. En ese caso los frentes de onda esféricos se superponen y forman uno solo con forma cónica. Debido a que la luz también es una onda, en este caso electromagnética, puede producir los mismos efectos si su velocidad es superada. Y esto, como ya se ha dicho, solo puede ocurrir cuando las partículas en un medio distinto del vacío, viajan a velocidades superiores a la de los fotones en dicho medio.

La radiación Cherenkov sólo se produce si la partícula que atraviesa el medio está cargada eléctricamente, como por ejemplo, un protón. Para que se produzca radiación Cherenkov el medio debe ser un dieléctrico.



Radiación de Cherenkov en el núcleo de un reactor TRIGA.



Frente de ondas de la radiación de Cherenkov.

Es decir; debe estar formado por átomos o moléculas capaces de verse afectados por un campo eléctrico. Por tanto, un protón viajando a través de un medio hecho de neutrones, por ejemplo, no emitiría radiación Cherenkov.

Los rayos cósmicos, compuestos principalmente por partículas cargadas, al incidir (interaccionar) sobre los átomos y moléculas de la atmósfera terrestre (el medio), producen otras partículas, las cuales producen más partículas, y éstas producen más, creándose una verdadera cascada de partículas (muchas de ellas cargadas eléctricamente). Cada una de estas partículas polariza asimétricamente las moléculas de nitrógeno y oxígeno (componentes principales de la atmósfera terrestre) con las que se encuentra a su paso, las cuales, al despolarizarse espontáneamente, emiten radiación Cherenkov (detectada con telescopios Cherenkov). Es decir; son las moléculas de la atmósfera (el dieléctrico) las que emiten la radiación, no la partícula incidente.

La polarización es asimétrica porque las moléculas que hay delante de la partícula no se han polarizado cuando las de detrás ya lo han hecho. Las de delante no se han polarizado porque la partícula viaja más rápido que su propio campo eléctrico. Cuando la polarización es simétrica (cuando la partícula viaja a menor velocidad que la de la luz en el medio) no se produce radiación Cherenkov.

El efecto Cherenkov es de gran utilidad en los detectores de partículas donde la susodicha radiación es usada como trazador. Particularmente en los detectores de neutrinos en agua pesada como el Kamiokande. También en el tipo de telescopio conocido como telescopio Cherenkov como el telescopio MAGIC, que detecta la luz Cherenkov producida en la atmósfera terrestre generada por la llegada de rayos gamma de muy alta energía (procedentes del espacio).

Véase también

- Luz
- Onda electromagnética
- Fotón
- Cascada Atmosférica Extensa
- Velocidad de la luz en un medio material

Fisión nuclear

En física nuclear, la **fisión** es una reacción nuclear, lo que significa que tiene lugar en el núcleo atómico. La fisión ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños, además de algunos subproductos como neutrones libres, fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa (núcleos de helio) y beta (electrones y positrones de alta energía).

Mecanismo

La fisión de núcleos pesados es un proceso exotérmico lo que supone que se liberan cantidades sustanciales de energía. El proceso genera mucha más energía que la liberada en las reacciones químicas convencionales, en las que están implicadas las cortezas electrónicas; la energía se emite, tanto en forma de radiación gamma como de energía cinética de los fragmentos de la fisión, que calentarán la materia que se encuentre alrededor del espacio donde se produzca la fisión.

La fisión se puede inducir por varios métodos, incluyendo el bombardeo del núcleo de un átomo fisionable con una partícula de la energía correcta; la otra partícula es generalmente un neutrón libre. Este neutrón libre es absorbido por el núcleo, haciéndolo inestable (como una

pirámide de naranjas en el supermercado llega a ser inestable si alguien lanza otra naranja en ella a la velocidad correcta). El núcleo inestable entonces se partirá en dos o más pedazos: los productos de la fisión que incluyen dos núcleos más pequeños, hasta siete neutrones libres (con una media de dos y medio por reacción), y algunos fotones.

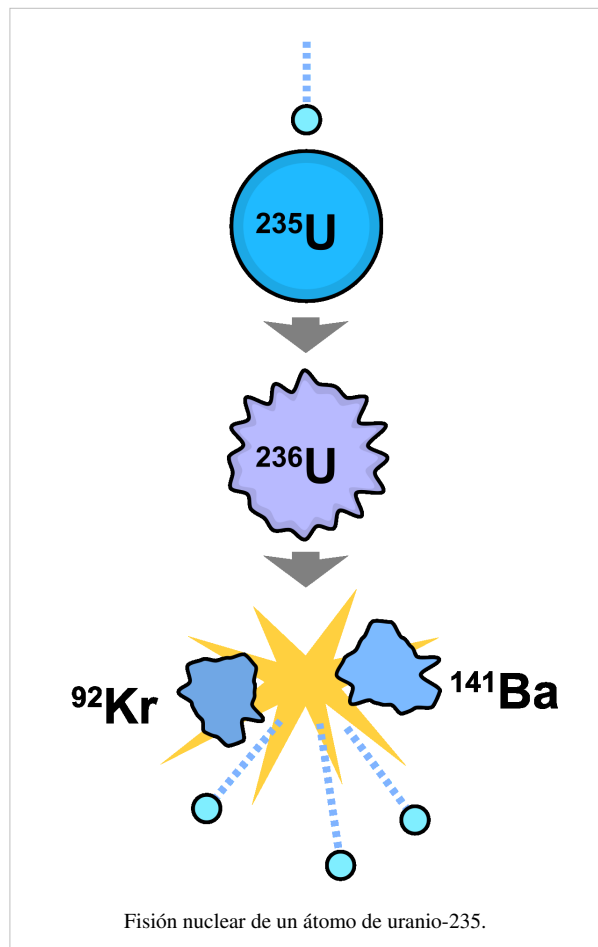
Los núcleos atómicos lanzados como productos de la fisión pueden ser varios elementos químicos. Los elementos que se producen son resultado del azar, pero estadísticamente el resultado más probable es encontrar núcleos con la mitad de protones y neutrones del átomo fisionado original.

Los productos de la fisión son generalmente altamente radiactivos, no son isótopos estables; estos isótopos entonces decaen, mediante cadenas de desintegración.

Fisión fría y rotura de pares de nucleones

La mayor parte de las investigaciones sobre fisión nuclear se basan en la distribución de masa y energía cinética de los fragmentos de fisión. Sin embargo, esta distribución es perturbada por la emisión de neutrones por parte de los fragmentos antes de llegar a los detectores.

Aunque con muy baja probabilidad, en los experimentos se han detectado eventos de fisión fría, es decir fragmentos con tan baja energía de excitación que no emiten neutrones. Sin embargo, aún en esos casos, se observa la rotura de pares de nucleones, la que se manifiesta como igual probabilidad de obtener fragmentos con número par o impar de nucleones. Los resultados de estos experimentos permiten comprender mejor la dinámica de la fisión nuclear hasta el punto de escisión, es decir, antes de que se desvanezca la fuerza nuclear entre los fragmentos.



Induciendo la fisión

La fisión nuclear de los átomos fue descubierta en 1938 por los investigadores alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann a partir del trabajo desarrollado por el propio Hahn junto a Lise Meitner durante años anteriores. Por este descubrimiento recibió en 1944 el Premio Nobel de química, pero el trabajo de Meitner quedó sin reconocimiento. El estudio de la fisión nuclear se considera parte de los campos de la química y la física.

- Aunque la fisión es prácticamente la desintegración de materia radiactiva, comenzada a menudo de la manera más fácil posible (inducido), que es la absorción de un neutrón libre, puede también ser inducida lanzando otras cosas en un núcleo fisionable. Estas otras cosas pueden incluir protones, otros núcleos, o aún los fotones de gran energía en cantidades muy altas (porciones de rayos gamma).
- Muy rara vez, un núcleo fisionable experimentará la fisión nuclear espontánea sin un neutrón entrante.
- Cuanto más pesado es un elemento más fácil es inducir su fisión. La fisión en cualquier elemento más pesado que el hierro produce energía, y la fisión en cualquier elemento más liviano que el hierro requiere energía. Lo contrario también es verdad en las reacciones de fusión nuclear (la fusión de los elementos más livianos que el hierro produce energía y la fusión de los elementos más pesados que el hierro requiere energía).
- Los elementos más frecuentemente usados para producir la fisión nuclear son el uranio y el plutonio. El uranio es el elemento natural más pesado; el plutonio experimenta desintegraciones espontáneas y tiene un período de vida limitado. Así pues, aunque otros elementos pueden ser utilizados, estos tienen la mejor combinación de abundancia y facilidad de fisión.

Reacción en cadena

Una reacción en cadena ocurre como sigue: un acontecimiento de fisión empieza lanzando 2 ó 3 neutrones en promedio como subproductos. Estos neutrones se escapan en direcciones al azar y golpean otros núcleos, incitando a estos núcleos a experimentar fisión. Puesto que cada acontecimiento de fisión lanza 2 o más neutrones, y estos neutrones inducen otras fisiones, el proceso se acelera rápidamente y causa la reacción en cadena. El número de neutrones que escapan de una cantidad de uranio depende de su área superficial. Solamente los materiales fisibles son capaces de sostener una reacción en cadena sin una fuente de neutrones externa.

Masa crítica

La masa crítica es la mínima cantidad de material requerida para que el material experimente una reacción nuclear en cadena. La masa crítica de un elemento fisionable depende de su densidad y de su forma física (barra larga, cubo, esfera, etc.). Puesto que los neutrones de la fisión se emiten en direcciones al azar, para maximizar las ocasiones de una reacción en cadena, los neutrones deberán viajar tan lejos como sea posible y de esa forma maximizar las posibilidades de que cada neutrón choque con otro núcleo. Así, una esfera es la mejor forma y la peor es probablemente una hoja aplanada, puesto que la mayoría de los neutrones volarían de la superficie de la hoja y no chocarían con otros núcleos.

También es importante la densidad del material. Si el material es gaseoso, es poco probable que los neutrones choquen con otro núcleo porque hay demasiado espacio vacío entre los átomos y un neutrón volaría probablemente entre ellos sin golpear nada. Si el material se pone bajo alta presión, los átomos estarán mucho más cercanos y la probabilidad de una reacción en cadena es mucho más alta. La alta compresión puede ser alcanzada poniendo el material en el centro de una implosión, o lanzando un pedazo de ella contra otro pedazo de ella muy fuertemente (con una carga explosiva, por ejemplo). Una masa crítica del material que ha comenzado una reacción en cadena se dice que se convierte en supercrítica.

Moderadores

Únicamente con juntar mucho uranio en un solo lugar no es suficiente como para comenzar una reacción en cadena. Los neutrones son emitidos por un núcleo en fisión a una velocidad muy elevada. Esto significa que los neutrones escaparán del núcleo antes de que tengan oportunidad de golpear cualquier otro núcleo (debido a un efecto relativista).

Un neutrón de movimiento lento se llama [neutrón neutrones era hacerlos pasar a través de un material de peso atómico bajo, tal como un material hidrogenoso. El proceso de retraso o de moderación es simplemente una secuencia de colisiones elásticas entre las partículas de alta velocidad y las partículas prácticamente en reposo. Cuanto más parecidas sean las masas del neutrón y de la partícula golpeada, mayor es la pérdida de energía cinética por el neutrón. Por lo tanto los elementos ligeros son los más eficaces como moderadores de neutrones.

A unos cuantos físicos en los años 30 se les ocurrió la posibilidad de mezclar el uranio con un moderador: si fuesen mezclados correctamente, los neutrones de alta velocidad de la fisión podrían ser retrasados al rebotar en un moderador, con la velocidad correcta, para inducir la fisión en otros átomos de uranio. Las características de un buen moderador son: peso atómico bajo y baja o nula tendencia a absorber los neutrones. Los moderadores posibles son entonces el hidrógeno, helio, litio, berilio, boro y carbono. El litio y el boro absorben los neutrones fácilmente, así que se excluyen. El helio es difícil de utilizar porque es un gas y no forma ningún compuesto. La opción de moderadores estaría entonces entre el hidrógeno, deuterio, el berilio y el carbono. Fueron Enrico Fermi y Leó Szilárd quienes propusieron primero el uso de grafito (una forma de carbono) como moderador para una reacción en cadena. El deuterio es el mejor tecnológicamente (introducido en el agua pesada), sin embargo el grafito es mucho más económico.

Efectos de los isótopos

El uranio natural se compone de tres isótopos: ^{234}U (0,006%), ^{235}U (0,7%), y ^{238}U (99,3%). La velocidad requerida para que se produzca un acontecimiento de fisión y no un acontecimiento de captura es diferente para cada isótopo.

El uranio-238 tiende a capturar neutrones de velocidad intermedia, creando ^{239}U , que decae sin fisión a plutonio-239, que sí es fisible. Debido a su capacidad de producir material fisible, a este tipo de materiales se les suele llamar fértiles.

Los neutrones de alta velocidad (52.000 km/s), como los producidos en una reacción de fusión tritio-deuterio, pueden fisionar el uranio-238. Sin embargo los producidos por la fisión del uranio-235, de hasta 28.000 km/s, tienden a rebotar inelásticamente con él, lo cual los desacelera. En un reactor nuclear, el ^{238}U tiende, pues, tanto a desacelerar los neutrones de alta velocidad provenientes de la fisión del uranio-235 como a capturarlos (con la consiguiente transmutación a plutonio-239) cuando su velocidad se modera.

El uranio-235 fisiona con una gama mucho más amplia de velocidades de neutrones que el ^{238}U . Puesto que el uranio-238 afecta a muchos neutrones sin inducir la fisión, tenerlo en la mezcla es contraproducente para promover la fisión. De hecho, la probabilidad de la fisión del ^{235}U con neutrones de velocidad alta puede ser lo suficientemente elevada como para hacer que el uso de un moderador sea innecesario una vez que se haya suprimido el ^{238}U .


Sin embargo, el ^{235}U está presente en el uranio natural en cantidades muy reducidas (una parte por cada 140). La diferencia relativamente pequeña en masa entre los dos isótopos hace, además, que su separación sea difícil. La posibilidad de separar ^{235}U fue descubierta con bastante rapidez en el proyecto Manhattan, lo que tuvo gran importancia para su éxito.

Véase también

- Física nuclear
- Fusión nuclear

Enlaces externos

Wikilibros

-  Wikilibros alberga un libro o manual sobre **Fisión nuclear**.
- Energía nuclear: el poder del átomo ^[1]
- El átomo y sus reacciones ^[2]

Referencias

- [1] <http://www.energia.4d2.net/>
- [2] http://simplementeeluniverso.vndv.com/index.php?urliframe=vp002-001a.php%3Ffn_mode%3Dcomments%26fn_id%3D8


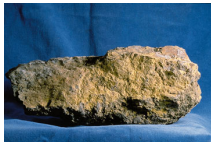
Uranio

Uranio
 Protactinio ← **Uranio** → NeptunioNdUUqbTabla completa • Tabla extendida



This area contains a large number of HTML tags, including <noinclude>, </noinclude>, <no>, </no>, and <div>, which appear to be artifacts from a web page rendering process. The tags are arranged in a grid-like pattern across the page.

Información general

Nombre, símbolo, número	Uranio, U, 92
Serie química	Actínidos
Grupo, período, bloque	3, 7, f
Densidad	19.050 kg/m ³
Apariencia	  <p>Metal blanco plateado</p>



Propiedades atómicas

Masa atómica	238.02891 u
Radio medio	175 pm
Radio atómico (calc)	156 pm (Radio de Bohr)
Radio covalente	196±7 pm
Radio de van der Waals	186 pm
Configuración electrónica	[Rn] 5f ³ 6d ¹ 7s ²
Electrones por nivel de energía	2, 8, 18, 32, 21, 9, 2 (Imagen)
Estado(s) de oxidación	5 (base débil)
Estructura cristalina	ortorrómbica

Propiedades físicas

Estado ordinario	Sólido
Punto de fusión	1405 K
Punto de ebullición	4404 K
Entalpía de vaporización	477 kJ/mol
Entalpía de fusión	15,48 kJ/mol
Velocidad del sonido	3155 m/s a 293.15 K (20 °C)

Varios

Electronegatividad (Pauling)	1,38
Calor específico	120 J/(K·kg)

Conductividad eléctrica	$3,8 \times 10^6$ S/m
Conductividad térmica	27,6 W/(K·m)
1.ª Energía de ionización	597,6 kJ/mol
2.ª Energía de ionización	1420 kJ/mol

Isótopos más estables

iso	AN	Periodo	MD	Ed	PD
				MeV	
²³² U	Sintético	68,9 a	α & FE	5,414	²²⁸ Th
²³³ U	Sintético	159200 a	α & FE	4,909	²²⁹ Th
²³⁴ U	0,0054%	245500 a	α & FE	4,859	²³⁰ Th
²³⁵ U	0,7204%	$7,038 \times 10^8$ a	α & FE	4,679	²³¹ Th
²³⁶ U	Sintético	$2,342 \times 10^7$ a	α & FE	4,572	²³² Th
²³⁸ U	99,2742%	$4,51 \times 10^9$ a	α & FE	4,270	²³⁴ Th

Nota: unidades según el SI y en CNPT, salvo indicación contraria.

El **uranio** es un elemento químico metálico de color plateado-grisáceo de la serie de los actínidos, su símbolo químico es **U** y su número atómico es 92. Por ello posee 92 protones y 92 electrones, con una valencia de 6. Su núcleo puede contener entre 141 y 146 neutrones, sus isótopos más abundantes son el ²³⁸U que posee 146 neutrones y el ²³⁵U con 143 neutrones. El uranio tiene el mayor peso atómico de entre todos los elementos que se encuentran en la naturaleza. El uranio es aproximadamente un 70% más denso que el plomo, aunque menos denso que el oro o el wolframio. Es levemente radioactivo. Fue descubierto en 1789 por M. H. Klaproth que lo llamó así en el honor del planeta Urano que acababa de ser descubierto en 1781.

En la naturaleza se presenta en muy bajas concentraciones (unas pocas partes por millón o ppm) en rocas, tierras, agua y los seres vivos. Para su uso el uranio debe ser extraído y concentrado a partir de minerales que lo contienen, como por ejemplo la uraninita (ver minería del uranio). Las rocas son tratadas químicamente para separar el uranio, convirtiéndolo en compuestos químicos de uranio. El residuo se denomina estéril. Esos estériles contienen las mismas sustancias radiactivas que poseía el mineral original y que no fueron separadas, como el radio, el torio o el potasio.

El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: uranio-238 (²³⁸U), uranio-235 (²³⁵U) y uranio-234 (²³⁴U). De cada gramo de uranio natural el 99,284 % de la masa es uranio-238, el 0,711% uranio-235,^[1] y 0,0085% uranio-234. La relación uranio-238/uranio-235 es constante en la corteza terrestre, salvo ciertas excepciones.

El uranio decae muy lentamente emitiendo una partícula alfa. El periodo de semidesintegración del uranio-238 es aproximadamente 4.470 millones de años y el del uranio-235 es 704 millones de años,^[2] lo que los convierte en útiles para estimar la edad de la Tierra (véase fechado mediante uranio-torio, fechado mediante uranio-plomo y fechado mediante uranio-uranio). Muchos usos contemporáneos del uranio hacen uso de estas propiedades nucleares únicas. El uranio-235 se distingue por ser el único elemento que se encuentra en la naturaleza que es un isótopo físil. El uranio-238 es fisionable por neutrones rápidos, y también es un material fértil (que puede transmutarse en un

reactor nuclear en plutonio-239 que es físil). Es posible producir el isótopo físil artificial, uranio-233, a partir de torio natural, lo que desempeña un rol importante en la tecnología nuclear. Mientras que el uranio-238 posee una pequeña probabilidad de fisión espontánea o al ser bombardeado por neutrones rápidos, el uranio-235 posee una mayor probabilidad de fisionarse al ser bombardeado por neutrones térmicos, por lo que es la reacción principalmente responsable por la generación de calor en un reactor nuclear, y es la principal fuente de material físil para las armas nucleares. Ambos usos son posibles por la capacidad del uranio de sostener una reacción nuclear en cadena. El uranio empobrecido (uranio-238) es utilizado en penetradores de energía cinética y protecciones para vehículos blindados.^[3]

El ^{235}U se utiliza como combustible en centrales nucleares y en algunos diseños de armamento nuclear. Para producir combustible, el uranio natural es separado en dos porciones. La porción combustible tiene más ^{235}U que lo normal, denominándose uranio enriquecido, mientras que la porción sobrante, con menos ^{235}U que lo normal, se llama uranio empobrecido. El uranio natural, enriquecido o empobrecido es químicamente idéntico. El uranio empobrecido es el menos radiactivo y el enriquecido el más radiactivo.

En el año 2009, la sonda japonesa SELENE descubrió por primera vez indicios de uranio en la Luna.

Origen

Junto con todos los elementos con pesos atómicos superiores al del hierro, el uranio se origina de forma natural durante las explosiones de las supernovas. El proceso físico determinante en el colapso de una supernova es la gravedad. Los valores tan elevados de gravedad que se dan en las supernovas es que genera las capturas neutrónicas que dan lugar a los átomos más pesados, entre ellos el uranio y el protactinio.

Reservas de uranio

La OCDE y el OIEA publican periódicamente un informe llamado: Uranium: Resources, Production and Demand, conocido como "Red Book", donde se hace una estimación de las reservas mundiales de uranio por países. Los grandes productores son Canadá, Australia, Kazajistán, Rusia, Níger, Namibia, Venezuela Y Brasil.^[cita requerida] De acuerdo con este informe los recursos mundiales de uranio son más que suficientes para satisfacer las necesidades previstas. Se estima que la cantidad total de existencias de uranio convencional, que puede ser explotado por menos de USD 130 por kg, es de unos 4,7 millones de toneladas que permitirían abastecer la demanda uranio para generación nuclear de electricidad durante 85 años. Sin embargo, los recursos mundiales de uranio en total se consideran mucho más alto. Basado en la evidencia geológica y el conocimiento de los fosfatos de uranio en el estudio considera más de 35 millones de toneladas disponibles para su explotación. En el largo plazo, los continuos avances en la tecnología nuclear permitirá una utilización mucho mejor de los recursos de uranio. Los diseños de reactores que se están desarrollando podrían extraer más de 30 veces la energía del uranio que los reactores de hoy.

En 2025, la capacidad mundial de la energía nuclear se espera que crezca a entre 450 GWe (+22%) y 530 GWe (+44%) de la capacidad de generación actual de cerca de 370 GWe.^[4] Esto aumentará las necesidades de uranio anuales de entre 80 000 toneladas y 100 000 toneladas.

En Venezuela, se ha descubierto grandes reservas de este mineral,^[cita requerida] según los cables diplomáticos lanzadas por Wikileaks; ha sido por la polémica de este mineral en el país sudamericano, según varios portales de periódicos venezolanos en formato digital: Noticias 24, Radio Nacional de Venezuela, Noticiero Digital, YVKE Radio Mundial, El Nacional, y hasta canales como Globovisión, Venezolana de Television, Telesur, Venevisión, la prensa escrita como: El Nacional, Panorama, Tal Cual, Ve a y muchos otros e incluso alternativos; si confirmaron grandes y gigantescos yacimientos de uranio.

Cabe destacar los grandes yacimientos en Venezuela, se encuentran:

- En el Macizo Guayanés, en el Estado Bolívar
- En Perijá, en el Estado Zulia

- En el Estado Tachira, en las regiones: Llanos de Zambrano, Llano Largo, Pregonero, y otras.
- En el Estado Mérida, en la región de: al sur de Bailadores con limítrofe del estado Tachira.
- En la región del Caño El Tigre, en el Estado Amazonas,
- En el Sinaruco,
- En los Llanos centrales, entre ellos se encuentran: el Hato Piñero el entonces dueño anterior era el difunto Luis Brito y otros campos agrícolas han sido expropiados por el gobierno diseminados en los estados: Apure, Barinas, Guárico, Cojedes Anzoátegui, Monagas, Miranda y Sucre.

Uso

El principal uso del uranio en la actualidad es como combustible para los reactores nucleares que producen el 17% de la electricidad obtenida en el mundo. Para ello el uranio es enriquecido aumentando la proporción del isótopo U^{235} desde el 0,71% que presenta en la naturaleza hasta valores en el rango 3-5%. El uranio empobrecido es usado en la producción de municiones perforantes y blindajes de alta resistencia.

Otros usos incluyen:

- Por su alta densidad, se utiliza el uranio en la construcción de estabilizadores para aviones, satélites artificiales y veleros.
- Se ha utilizado uranio como agregado para la creación de cristales de tonos fluorescentes verdes o amarillos.
- El largo periodo de semidesintegración del isótopo ^{238}U se utiliza para estimar la edad de la Tierra.
- El ^{238}U se convierte en plutonio en los reactores reproductores. El plutonio puede ser usado en reactores o en armas nucleares.
- Algunos accesorios luminosos utilizan uranio, del mismo modo que lo hacen algunos químicos fotográficos (nitrateo de uranio).
- Su alto peso atómico hace que el ^{238}U pueda ser utilizado como un eficaz blindaje contra las radiaciones de alta penetración.
- El uranio en estado metálico es usado para los blancos de rayos X, para hacer rayos X de alta energía.
- El alto peso atómico del uranio-238, lo hace eficaz para la protección contra la radiación.
- Fertilizantes de fosfato a menudo contienen altos contenidos de uranio natural, debido a que el mineral del cual son hechos es típicamente alto en uranio.^[5]

La exposición humana

Una persona puede estar expuesta al uranio (o a sus descendientes radiactivos como el radón) por la inhalación de polvo en el aire o por la ingestión de agua y alimentos contaminados. La cantidad de uranio en el aire es muy pequeña, sin embargo, las personas que trabajan en las fábricas de procesamiento de fosfatos o fertilizantes, viven cerca de instalaciones donde se hicieron pruebas de armas nucleares, viven o trabajan cerca de un campo de batalla moderno donde se ha utilizado uranio empobrecido, o que viven o trabajan cerca de la exposición de una central térmica de carbón, las instalaciones de las minas de mineral de uranio, o instalaciones de enriquecimiento de uranio para combustible, pueden haber aumentado su exposición al uranio.^[6] Casas o estructuras que están sobre los depósitos de uranio (naturales o depósitos artificiales de escoria) pueden tener un aumento de la incidencia de la exposición al gas radón.

La mayoría de uranio ingerido se excreta naturalmente. Sólo el 0,5% es absorbido cuando se ingieren formas insolubles de uranio, como el óxido, mientras que la absorción de los más solubles uranio de iones puede ser de hasta un 5%.^[7] Sin embargo, los compuestos solubles de uranio tienden a pasar rápidamente a través de todo el cuerpo mientras que los compuestos de uranio insolubles, en especial cuando se inhala polvo en los pulmones, representan un riesgo de exposición más grave. Después de entrar en el torrente sanguíneo, el uranio absorbido tiende a la bioacumulación y la estancia durante muchos años en los tejidos óseos debido a la afinidad de uranio para los fosfatos.^[7] El uranio no se absorbe a través de la piel, y las partículas alfa liberadas por el uranio no puede

penetrar la piel.

Genotóxicos mutágenos procedentes de la exposición al uranio puede ser tratado con terapia de quelación^[8] o por otros medios poco después de la exposición.^[9] El uranio asimilado se convierte en iones de uranilo, que se acumulan en los huesos, el hígado, los riñones y los tejidos reproductivos. El uranio puede ser descontaminado de las superficies de acero^[10] y acuíferos.^[11]

Efectos

El funcionamiento normal del riñón, cerebro, hígado, corazón, y otros sistemas pueden verse afectados por la exposición al uranio, porque, además de ser débilmente radiactivo, el uranio es un metal altamente tóxico incluso en pequeñas cantidades.^{[7] [12] [13]} El uranio también es tóxico para la reproducción.^{[14] [15]} Los efectos radiológicos son generalmente locales ya que la radiación alfa, la principal forma de descomposición del U-238, tiene un alcance muy corto y no penetra en la piel. Los compuestos de uranio, en general, son mal absorbidos por el revestimiento de los pulmones y puede seguir siendo un peligro radiológico por tiempo indefinido. ^[cita requerida]. Los iones de uranilo UO_2^+ , como los del trióxido de uranio o de nitrato de uranilo y de uranio, han demostrado causar defectos de nacimiento y daño al sistema inmunitario en animales de laboratorio.^[16] Mientras que el CDC ha publicado un estudio que dice que no ha sido probado ningún cáncer en seres humanos consecuencia de la exposición a los desastres naturales.^[17] La exposición al uranio y sus productos de desintegración, especialmente en radón, son ampliamente conocidos así como las amenazas para la salud.^[18] La exposición al estroncio-90, yodo-131, y otros productos de fisión no está relacionado con la exposición al uranio, pero puede resultar de los procedimientos médicos o la exposición al combustible nuclear gastado o consecuencias del uso de armas nucleares.^[19]

Aunque la exposición a la inhalación accidental a una alta concentración de hexafluoruro de uranio ha causado la muerte de personas, esas muertes se asociaron con la generación de ácido fluorhídrico altamente tóxicos y fluoruro de uranilo y no al propio uranio.^[20] El uranio metálico finamente dividido presenta un peligro de incendio porque partículas pequeñas pueden inflamarse espontáneamente en el aire a temperatura ambiente.^[21]

Recopilación de examen de 2004 sobre la toxicidad del uranio ^[12]			
Sistema corporal	Estudios en humanos	Estudios en animales	<i>In vitro</i>
Renal	Los niveles elevados de excreción de proteínas, catalasa urinaria y la diuresis	El daño a los túbulos contorneados proximales, las células necróticas emitidos desde el epitelio tubular, los cambios glomerulares	No hay estudios
Cerebro / CNS	Una disminución del rendimiento en las pruebas neurocognitivas	Toxicidad aguda colinérgica; dosis-dependiente de la acumulación en la corteza, el cerebro medio y vermis, cambios electrofisiológicos en el hipocampo	No hay estudios
ADN	tipos de cáncer ^{[22] [23] [24] [25] [26] [27]}	con micronúcleos, inhibición de la cinética del ciclo celular y la proliferación, la inducción de cromátidas hermanas, fenotipo oncogénico	
Ósea o muscular	No hay estudios	La inhibición de la formación de hueso periodontal, y la cicatrización de la herida alveolar	No hay estudios
Reproductiva	Mineros del uranio, las niñas más primogénito	Vacuolización moderada a severa atrofia tubular focal, de células de Leydig	No hay estudios
Pulmones / respiratorio	No hay efectos de salud adversos	Grave congestión nasal y hemorragia, lesiones pulmonares y fibrosis, edema y la inflamación, el cáncer de pulmón	No hay estudios
Gastrointestinales	Vómito, diarrea, albuminuria,	N / A	N / A



Hígado	No hay efectos observados en la dosis de exposición	Hígados grasos, necrosis focal	No hay estudios
Piel	No hay datos disponibles evaluación de la exposición	Células inflamadas vacuolado epidérmica, los daños a los folículos pilosos y glándulas sebáceas	No hay estudios
Los tejidos que rodean incrustados fragmentos de uranio empobrecido	Concentraciones en orina elevados de uranio	Concentraciones en orina elevadas de uranio, las perturbaciones en la bioquímica y las pruebas neuropsicológicas	No hay estudios
Sistema Inmune	La fatiga crónica, erupciones cutáneas, infecciones de oídos y ojos, el pelo y pérdida de peso, tos. Puede deberse a la exposición química combinada en lugar de solo DU	No hay estudios	No hay estudios
Ojos	No hay estudios	La conjuntivitis, irritación de la inflamación, edema, ulceración de los sacos conjuntivales	No hay estudios
Sangre	No hay estudios	Disminución en el recuento de glóbulos rojos y la concentración de hemoglobina	No hay estudios
Cardiovascular	Miocarditis derivadas de la ingestión de uranio, que concluyó 6 meses después de la ingestión	No hay efectos	No hay estudios

Referencias

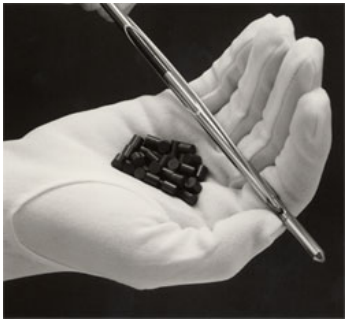
- [1] « Health Concerns about Military Use of Depleted Uranium (http://www.afri.usuhs.mil/www/outreach/pdf/mcclain_NATO_2005.pdf)» (PDF).
- [2] « WWW Table of Radioactive Isotopes (<http://ie.lbl.gov/toi/nucSearch.asp>)».
- [3] Emsley, *Nature's Building Blocks* (2001), page 479
- [4] Uranium resources: plenty to sustain growth of nuclear power (<http://www.nea.fr/html/general/press/2006/2006-02.html>)
- [5] « Enusa Industrias Avanzadas (http://www.enusa.es/pub/enusa/uranio_usos.html)».
- [6] « Radiation Information for Uranium (<http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/uranium.html>)». U.S. Environmental Protection Agency. Consultado el 31-07-2009.
- [7] Emsley, 2001, p. 477.
- [8] Sawicki, M; Lecercelé, D; Grillon, G; Le Gall, B; Sérandour, AL; Poncy, JL; Bailly, T; Burgada, R *et al.* (2008). «Bisphosphonate sequestering agents. Synthesis and preliminary evaluation for in vitro and in vivo uranium(VI) chelation.». *European journal of medicinal chemistry* **43** (12): pp. 2768–77. doi: 10.1016/j.ejmech.2008.01.018 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejmech.2008.01.018>). PMID 18313802 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18313802>).
- [9] Spagnul, A; Bouvier-Capely, C; Phan, G; Rebière, F; Fattal, E (2009). «Calixarene-entrapped nanoemulsion for uranium extraction from contaminated solutions.». *Journal of pharmaceutical sciences*: pp. n/a. doi: 10.1002/jps.21932 (<http://dx.doi.org/10.1002/jps.21932>). PMID 19780139 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19780139>).
- [10] Francis, AJ; Dodge, CJ; McDonald, JA; Halada, GP (2005). «Decontamination of uranium-contaminated steel surfaces by hydroxycarboxylic acid with uranium recovery.». *Environmental science & technology* **39** (13): pp. 5015–21. PMID 16053105 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16053105>).
- [11] Wu, WM; Carley, J; Gentry, T; Ginder-Vogel, MA; Fienen, M; Mehlhorn, T; Yan, H; Carroll, S *et al.* (2006). «Pilot-scale in situ bioremediation of uranium in a highly contaminated aquifer. 2. Reduction of u(VI) and geochemical control of u(VI) bioavailability.». *Environmental science & technology* **40** (12): pp. 3986–95. PMID 16830572 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16830572>).
- [12] E. S. Craft, A. W. Abu-Qare, M. M. Flaherty, M. C. Garofolo, H. L. Rincavage, M. B. Abou-Donia (2004). « Depleted and natural uranium: chemistry and toxicological effects (http://www.informaworld.com/smpp/section?content=a714111273&fulltext=713240929#uteb_12817_tab07)». *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews* **7** (4): pp. 297–317. doi: 10.1080/10937400490452714 (<http://dx.doi.org/10.1080/10937400490452714>). .
- [13] « Toxicological Profile for Uranium (<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp150-c2.pdf>)» (PDF). Atlanta, GA: Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) (1999).
- [14] Hindin, et al. (2005) "Teratogenicity of depleted uranium aerosols: A review from an epidemiological perspective," (<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1242351>) *Environ Health*, vol. 4, pp. 17
- [15] Arfsten, D.P.; K.R. Still; G.D. Ritchie (2001). «A review of the effects of uranium and depleted uranium exposure on reproduction and fetal development». *Toxicology and Industrial Health* **17** (5–10): pp. 180–91. doi: 10.1191/0748233701th111oa (<http://dx.doi.org/10.1191/0748233701th111oa>). PMID 12539863 (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12539863>).
- [16] Domingo, J. (2001) "Reproductive and developmental toxicity of natural and depleted uranium: a review," *Reproductive Toxicology*, vol. 15, pp. 603–609, doi: 10.1016/S0890-6238(01)00181-2 PMID 2711400

- [17] « Public Health Statement for Uranium (<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/phs150.html>)». CDC. Consultado el 15-02-2007.
- [18] Emsley, 2001, p. 480
- [19] Chart of the Nuclides, US Atomic Energy Commission 1968
- [20] Richard C. Dart (2004). *Medical Toxicology* (<http://books.google.com/books?id=qDf3AO8nILoC&pg=PA1468>). Lippincott Williams & Wilkins. p. 1468. ISBN 0781728452. .
- [21] C. R. Hammond (2000). *The Elements, in Handbook of Chemistry and Physics 81st edition* (http://www-d0.fnal.gov/hardware/cal/lvps_info/engineering/elements.pdf). CRC press. ISBN 0849304814. .
- [22] The History of Uranium Mining and the Navajo People (<http://www.ajph.org/cgi/content/full/92/9/1410>)
- [23] Lung Cancer in a Nonsmoking Underground Uranium Miner (<http://www.ehponline.org/members/2001/109p305-309mulloy/mulloy-full.html>)
- [24] Uranium mining and lung cancer in Navajo men (<http://content.nejm.org/cgi/content/abstract/310/23/1481>)
- [25] Navajo Uranium Workers and the Effects of Occupational Illnesses: A Case Study (<http://sfaa.metapress.com/app/home/contribution.asp?referrer=parent&backto=issue,8,11;journal,65,231;linkingpublicationresults,1:113218,1>)
- [26] Uranium Mining and Lung Cancer Among Navajo Men in New Mexico and Arizona, 1969 to 1993 (<http://www.joem.org/pt/re/joem/abstract.00043764-200003000-00008.htm>)
- [27] Lung cancer among Navajo uranium miners. (<http://www.chestjournal.org/content/81/4/449.abstract>)

Enlaces externos

-  Wikimedia Commons alberga contenido multimedia sobre **Uranio**. Commons
-  Wikcionario tiene definiciones para **uranio**. Wikcionario
- ATSDR en Español - ToxFAQs™: Uranio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts150.html)
- ATSDR en Español - Resumen de Salud Pública: Uranio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs150.html) Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (dominio público)
- El uranio, un elemento poco conocido. Nuclear España Jul 2005 ([http://web.usal.es/~guillermo/publications/Articulos/NEJul2005\(UranioElementoDesconocido\).pdf](http://web.usal.es/~guillermo/publications/Articulos/NEJul2005(UranioElementoDesconocido).pdf))

Uranio-235

Uranio-235	
	
Tabla completa	
General	
Nombre, símbolo	Uranio-235, ²³⁵ U
Neutrones	143
Protones	92
Nuclide Data	
Abundancia natural	0.72%
semivida	7.038·10 ⁸ años
Producto de desintegración	Torio-231

Masa del isótopo	235.0439299(20) u
Espín	7/2-
Exceso de energía	40914.062 ± 1.970 keV
Energía de enlace	1783870.285 ± 1.996 keV
Modo de degradación	Energía de degradación
Fisión espontánea (SF)	n/a MeV
Degradación alfa	4.679 MeV

El **uranio-235** (^{235}U) es un isótopo del uranio que se diferencia del uranio-238, el más común isótopo del elemento, en su capacidad para provocar una reacción en cadena de fisión que se expande rápidamente, es decir, que es fisible. De hecho, el ^{235}U es el único isótopo fisible que se encuentra en la naturaleza. El uranio-235 tiene una semivida de 700 millones de años.

Fue descubierto en 1935 por Arthur Jeffrey Dempster. Un núcleo de uranio que absorba un neutrón se divide en dos núcleos más ligeros; a esto se le llama fisión nuclear. Ello libera dos o tres neutrones que prosiguen la reacción. En los reactores nucleares, la reacción es ralentizada por la adición de barras de control, que están fabricadas con elementos químicos tales como el boro, cadmio y hafnio los cuales pueden absorber un gran número de neutrones. En las bombas nucleares, la reacción no se controla y la gran cantidad de energía que se libera crea una explosión nuclear.

La fisión de un átomo de ^{235}U genera $200 \text{ MeV} = 3,2 \times 10^{-11} \text{ J}$, es decir, $18 \text{ TJ/mol} = 77 \text{ TJ/kg}$.

Sólo alrededor del 0,72% de todo el uranio natural es uranio-235, el resto es básicamente uranio-238. Esta concentración es insuficiente para mantener por sí misma una reacción en una masa de uranio puro o de un reactor de agua ligera. El enriquecimiento de uranio, que significa precisamente la separación del uranio-238, debe realizarse para conseguir concentraciones de uranio-235 utilizables en los reactores del tipo CANDU, en otros reactores de agua pesada, y algunos reactores regulados por grafito. Para una explosión se requiere una pureza de aproximadamente el 90%.

Referencias

- Tabla de Nucléidos ^[1]

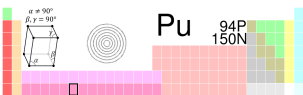
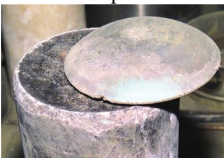
Enlaces externos

- ATSDR en Español - ToxFAQs™: Uranio ^[2] Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (dominio público)
- ATSDR en Español - Resumen de Salud Pública: Uranio ^[3] Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (dominio público)
- [4]
- Enriquecimiento de uranio

Referencias

- [1] <http://atom.kaeri.re.kr/>
 [2] http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts150.html
 [3] http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs150.html
 [4] <http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/uranium.html>

Plutonio

Neptunio - Plutonio - Americio	
Sm Pu	 <p>Tabla completa</p>
General	
Nombre, símbolo, número	Plutonio, Pu, 94
Serie química	Actínidos
Grupo, periodo, bloque	n/a, 7, f
Densidad	19,816 kg/m ³ ó 19,81 g/cm ³
Apariencia	Blanco plateado 
Propiedades atómicas	
Masa atómica	244 u
Radio atómico	175 pm
Radio de Van der Waals	?
Configuración electrónica	[Rn] 5f ⁶ 7s ²
Estados de oxidación (óxido)	6, 5, 4, 3 (óxido anfotérico)
Estructura cristalina	Monoclínica
Propiedades físicas	
Estado de la materia	Sólido
Punto de fusión	912,5 K
Punto de ebullición	3.501 K
Entalpía de vaporización	333,5 kJ/mol
Entalpía de fusión	2,82 kJ/mol
Presión de vapor	10,00 Pa a 2.926 K
Velocidad del sonido	2.260 m/s a 293,15 K
Información diversa	
Electronegatividad	1,28(Pauling)

Calor específico	35,5 J/(kg·K)
Resistencia eléctrica	0,685 m ⁻¹ ·Ω ⁻¹
Conductividad térmica	6,74 W/(m·K)
1 ^{er} potencial de ionización	584,7 kJ/mol
<p>Valores en el SI y en condiciones normales (0 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario. †Calculado a partir de distintas longitudes de enlace covalente, metálico o iónico.</p>	

Plutonio, de símbolo **Pu**, es un elemento metálico radiactivo que se utiliza en reactores y armas nucleares. Su número atómico es 94. Es uno de los elementos transuránicos del grupo de los actínidos del sistema periódico. Su nombre deriva del dios romano de los infiernos, Plutón.

Los isótopos del plutonio fueron preparados y estudiados por vez primera por el químico estadounidense Glenn T. Seaborg y sus colegas de la Universidad de California en Berkeley, en 1940. Se han encontrado cantidades menores del elemento en las minas de uranio, pero en la actualidad se preparan cantidades relativamente grandes de plutonio en los reactores nucleares.


Químicamente, el plutonio es reactivo, y sus propiedades se asemejan a las de los lantánidos. El metal plateado, que se vuelve ligeramente amarillo con la oxidación causada por la exposición al aire, existe en seis formas cristalinas y tiene cuatro estados de oxidación diferentes. El metal desprende calor debido a su radiactividad.

Se conocen 15 isótopos diferentes del plutonio, con números másicos entre 232 y 246; el plutonio 244 es el más estable. El isótopo de número másico 239 tiene un periodo de semidesintegración de 24.360 años y se produce bombardeando uranio 238 con neutrones lentos; esto forma uranio 239 (con un periodo de semidesintegración de unos 23,45 minutos), que por emisión de una partícula beta forma neptunio 239, que a su vez emite una partícula beta formando plutonio 239. El plutonio es el elemento transuránico más importante económicamente porque el plutonio 239 admite fácilmente la fisión y puede ser utilizado y producido en grandes cantidades en los reactores nucleares. Es un veneno extremadamente peligroso debido a su alta radiactividad.

Véase también

- Energía nuclear
- Efectos biológicos de la radiación
- Energías renovables
- Abandono de la energía nuclear

Enlaces externos

-  Wikimedia Commons alberga contenido multimedia sobre **Plutonio**. Commons
- ATSDR en Español - ToxFAQs™: Plutonio (Pu) ^[1] Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (dominio público)
- ATSDR en Español - Resumen de Salud Pública: Plutonio (Pu) ^[2] Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (dominio público)

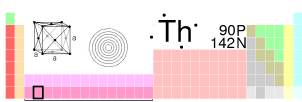
Referencias

[1] http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts143.html

[2] http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs143.html

Torio



Actinio - Torio - Protactinio	
Ce Th	 <p>Tabla completa</p>
General	
Nombre, símbolo, número	Torio, Th, 90
Serie química	Actínidos
periodo, bloque	7, f
Densidad, dureza Mohs	11724 kg/m ³ , 3,0
Apariencia	Blanco plateado
Propiedades atómicas	
Masa atómica	232,0381 u
Radio medio [†]	180 pm
Radio atómico calculado	Sin datos
Radio covalente	Sin datos
Radio de Van der Waals	Sin datos
Configuración electrónica	[Rn]6d ² 7s ²
Estados de oxidación (óxido)	4 base débil
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras
Propiedades físicas	
Estado de la materia	Sólido (..)
Punto de fusión	2028 K

Punto de ebullición	5061 K				
Entalpía de vaporización	514,4 kJ/mol				
Entalpía de fusión	16,1 kJ/mol				
Presión de vapor	Sin datos				
Velocidad del sonido	2490 m/s a 293,15 K				
Información diversa					
Electronegatividad	1,3 (Pauling)				
Calor específico	120 J/(kg·K)				
Conductividad eléctrica	$6,53 \times 10^6 \text{ m}^{-1} \cdot \Omega^{-1}$				
Conductividad térmica	54 W/(m·K)				
1 ^{er} potencial de ionización	587 kJ/mol				
2 ^o potencial de ionización	1110 kJ/mol				
3 ^{er} potencial de ionización	1930 kJ/mol				
4 ^o potencial de ionización	2780 kJ/mol				
Isótopos más estables					
iso.	AN	Periodo de semidesintegración	MD	ED MeV	PD
²²⁸ Th	Sintético	1,9116 años	α	5,520	²²⁴ Ra
²²⁹ Th	Sintético	7340 años	α	5,168	²²⁵ Ra
²³⁰ Th	Sintético	75380 años	α	4,770	²²⁶ Ra
²³² Th	100	$1,405 \times 10^{10}$ años	α	4,083	²²⁸ Ra
²³⁴ Th	Traza	24,1 días	β^-		²³⁴ Pa
Valores en el SI y en condiciones normales (0 °C y 1 atm), salvo que se indique lo contrario. †Calculado a partir de distintas longitudes de enlace covalente, metálico o iónico.					

El **torio** es un elemento químico, de símbolo **Th** y número atómico 90. Es un elemento de la serie de los actínidos que se encuentra en estado natural en los minerales monazita, torita y torianita. En estado puro es un metal blando de color blanco-plata que se oxida lentamente. Si se tritura finamente y se calienta, arde emitiendo luz blanca.^[1]

El torio pertenece a la familia de las sustancias radiactivas, lo que significa que su núcleo es inestable y tras cierto tiempo se transforma en otro elemento. Por ello tiene potencial para ser utilizado en el futuro como combustible nuclear pero esa aplicación todavía está en fase de desarrollo.

Historia

El torio se llamó así en honor a Thor, el dios nórdico del relámpago y la tormenta. Fue aislado por primera vez en 1828 por Jöns Jakob Berzelius. En la última década del siglo XIX los investigadores Pierre Curie y Marie Curie descubrieron que el torio emitía radiactividad.^[2]

Aplicaciones del torio

Aparte de su incipiente uso como combustible nuclear el torio metálico o alguno de sus óxidos se utilizan en las siguientes aplicaciones:^[3]

- Se incorpora al tungsteno metálico para fabricar filamentos de lámparas eléctricas
- Para aplicaciones en material cerámico de alta temperatura
- Para la fabricación de lámparas electrónicas
- Como agente de aleación en estructuras metálicas
- Como componente básico de la tecnología del magnesio
- Como catalizador en química orgánica
- Para fabricar electrodos especiales de soldadura (TIG-Tungsten Inert Gas o WIG), aleando al Tungsteno (Wolframio) favoreciendo una mayor emisividad de electrones por parte del electrodo, lo que facilita el encendido y permite que el electrodo de Wolframio trabaje a una menor temperatura con el mismo rendimiento sobre la pieza a trabajar (existe el problema de que la temperatura del trabajo del electrodo de wolframio puro era aproximadamente la temperatura de fusión del wolframio de 3400°C, lo que acababa dañando el perfil del electrodo al fundirse). Un problema del uso de electrodos dopados con Torio es la leve radiactividad que acaba produciendo cáncer a largo plazo en los soldadores ^[cita requerida] (por esto es recomendable usar electrodos con otros dopantes como Cerio, Lantánido o Circonio).
- Se utiliza en la industria electrónica como detector de oxígeno.^[cita requerida]

Fisión del torio

Cuando un átomo de torio 232 se desintegra emite una partícula alfa, formada por dos protones y dos neutrones. La emisión de la partícula alfa reduce el número atómico del torio 232 en dos unidades, y el número másico en cuatro, transformándolo en el isótopo 228 de otro elemento, el radio 228. Posteriores desintegraciones forman la serie del torio. Este proceso continúa hasta que se forma finalmente un elemento no radiactivo, y por tanto estable, que es el plomo.

El periodo de semidesintegración del torio 232 es muy elevado por lo que libera radiactividad durante miles de millones de años.

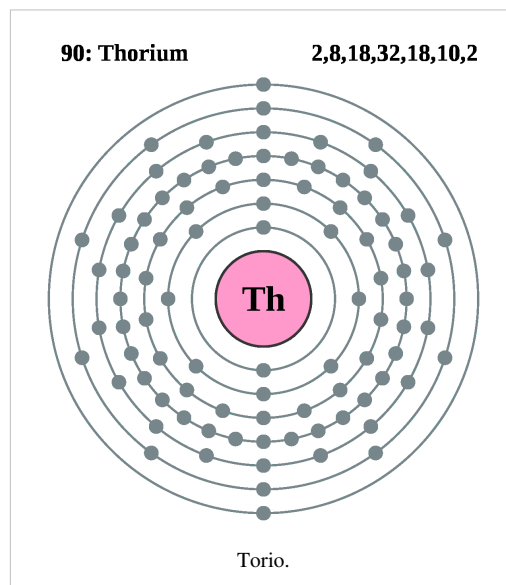
Para poder aprovechar la radiactividad del torio como fuente de energía, habría que transformar el torio 232 en uranio 233. Esta conversión puede llevarse a cabo en reactores especiales (reactores rápidos y reactores subcríticos).^[cita requerida]

Véase también

- Reactor nuclear
- Fisión nuclear
- Plutonio
- Radiactividad
- Uranio
- Radioisótopos

Referencias y bibliografía

- [1] Educaplus.org. « Elementos químicos: Torio (http://www.juntadeandalucia.es/averroes/~jpccec/tablap/4propiedades/4_90.html)». Consultado el 24-03-2011.
- [2] Historia del torio (<http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/1historia/th.html>)
- [3] Aplicaciones del torio (<http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Th.htm>)



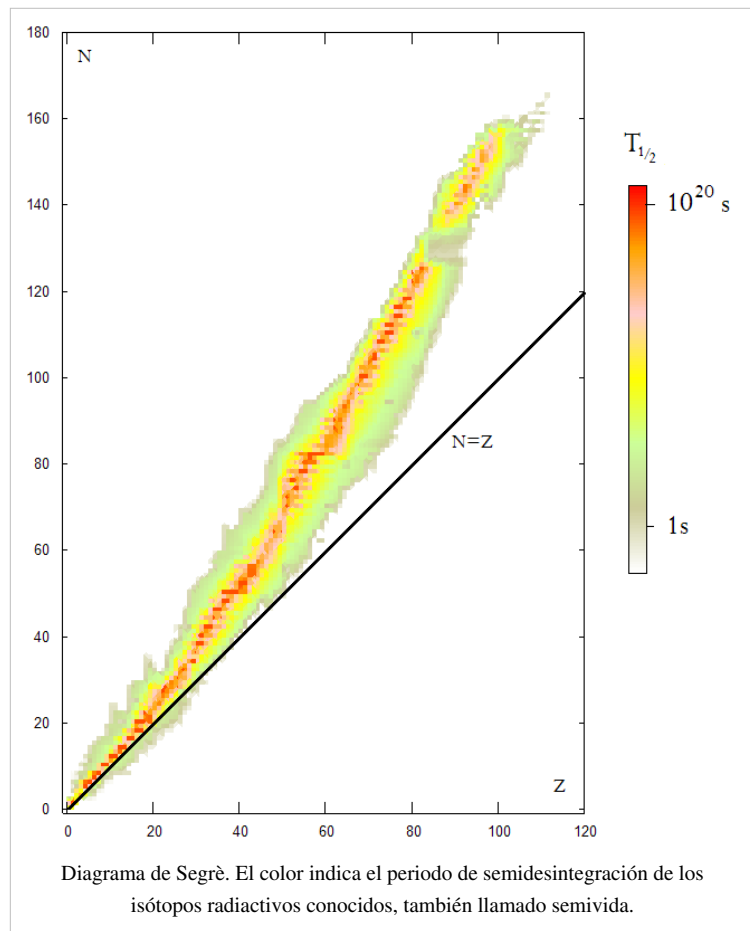
Enlaces externos

- ATSDR en Español - ToxFAQs™: Torio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts147.html)
Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (dominio público)
- ATSDR en Español - Resumen de Salud Pública: Torio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs147.html)
Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (dominio público)
- EnvironmentalChemistry.com - Thorium (<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Th.html>)
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España (<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/301a400/nspn0337.pdf>): Ficha internacional de seguridad química del torio.
- Los Alamos National Laboratory - Thorium (<http://periodic.lanl.gov/elements/90.html>)
- The Uranium Information Centre (<http://www.uic.com.au/>)
- Torio, Nueva Fuente de Energía (<http://www.thorium.tv>)
- WebElements.com - Thorium (<http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Th/index.html>)

Radiactividad

La **radiactividad** o **radioactividad** ioniza el medio que atraviesa. Una excepción lo constituye el neutrón, que no posee carga, pero ioniza la materia en forma indirecta. En las desintegraciones radiactivas se tienen varios tipos de radiación: alfa, beta, gamma y neutrones.

La radiactividad puede considerarse un fenómeno físico natural por el cual algunos cuerpos o elementos químicos, llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas fotográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Debido a esa capacidad, se les suele denominar radiaciones ionizantes (en contraste con las no ionizantes). Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas, en forma de rayos X o rayos gamma, o bien corpusculares, como pueden ser núcleos de helio, electrones o positrones, protones u otras. En resumen, es un fenómeno que ocurre en los núcleos de ciertos elementos, que son capaces de transformarse en núcleos de átomos de otros elementos.



La radiactividad es una propiedad de los isótopos que son "inestables", es decir, que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que, para alcanzar su estado fundamental, deben perder energía. Lo hacen en emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética. Esto se produce variando la energía de sus electrones (emitiendo rayos X) o de sus nucleones (rayo gamma) o variando el isótopo (al emitir desde el núcleo electrones, positrones, neutrones, protones o partículas más pesadas), y en varios pasos sucesivos, con lo que un isótopo pesado puede terminar convirtiéndose en uno mucho más ligero, como el uranio que, con el transcurrir de los siglos, acaba convirtiéndose en plomo.

La radiactividad se aprovecha para la obtención de energía nuclear, se usa en medicina (radioterapia y radiodiagnóstico) y en aplicaciones industriales (medidas de espesores y densidades, entre otras).

La radiactividad puede ser:

- Natural: manifestada por los isótopos que se encuentran en la naturaleza.
- Artificial o inducida: manifestada por los radioisótopos producidos en transformaciones artificiales.

Radiactividad natural

Véanse también: *Radiactividad natural, Rayos cósmicos y Redradna*

En 1896 Henri Becquerel descubrió que ciertas sales de uranio emiten radiaciones espontáneamente, al observar que velaban las placas fotográficas envueltas en papel negro. Hizo ensayos con el mineral en caliente, en frío, pulverizado, disuelto en ácidos y la intensidad de la misteriosa radiación era siempre la misma. Por tanto, esta nueva propiedad de la materia, que recibió el nombre de radiactividad, no dependía de la forma física o química en la que se encontraban los átomos del cuerpo radiactivo, sino que era una propiedad que radicaba en el interior mismo del átomo.

El estudio del nuevo fenómeno y su desarrollo posterior se debe casi exclusivamente al matrimonio de Marie y Pierre Curie, quienes encontraron otras sustancias radiactivas: el torio, el polonio y el radio. La intensidad de la radiación emitida era proporcional a la cantidad de uranio presente, por lo que Marie Curie dedujo que la radiactividad es una propiedad atómica. El fenómeno de la radiactividad se origina exclusivamente en el núcleo de los átomos radiactivos. Se cree que se origina debido a la interacción neutrón-protón. Al estudiar la radiación emitida por el radio, se comprobó que era compleja, pues al aplicarle un campo magnético parte de ella se desviaba de su trayectoria y otra parte no.

Pronto se vio que todas estas reacciones provienen del núcleo atómico que describió Ernest Rutherford en 1911, quien también demostró que las radiaciones emitidas por las sales de uranio pueden ionizar el aire y producir la descarga de cuerpos cargados eléctricamente.

Con el uso del neutrino, partícula descrita en 1930 por Wolfgang Pauli pero no medida sino hasta 1956 por Clyde Cowan y sus colaboradores, consiguió describirse la radiación beta.

En 1932 James Chadwick descubrió la existencia del neutrón que Pauli había predicho en 1930, e inmediatamente después Enrico Fermi descubrió que ciertas radiaciones emitidas en fenómenos no muy comunes de desintegración son en realidad neutrones.

Radiactividad artificial

La radiactividad artificial, también llamada *radiactividad inducida*, se produce cuando se bombardean ciertos núcleos estables con partículas apropiadas. Si la energía de estas partículas tiene un valor adecuado, penetran el núcleo bombardeado y forman un nuevo núcleo que, en caso de ser inestable, se desintegra después radiactivamente. Fue descubierta por los esposos Jean Frédéric Joliot-Curie e Irène Joliot-Curie, bombardeando núcleos de boro y de aluminio con partículas alfa. Observaron que las sustancias bombardeadas emitían radiaciones después de retirar el cuerpo radiactivo emisor de las partículas de bombardeo.

En 1934 Fermi se encontraba en un experimento bombardeando núcleos de uranio con los neutrones recién descubiertos. En 1938, en Alemania, Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassmann verificaron los experimentos de Fermi. En 1939 demostraron que una parte de los productos que aparecían al llevar a cabo estos experimentos era bario. Muy pronto confirmaron que era resultado de la división de los núcleos de uranio: la primera observación experimental de la fisión. En Francia, Jean Frédéric Joliot-Curie descubrió que, además del bario, se emiten neutrones secundarios en esa reacción, lo que hace factible la reacción en cadena.

También en 1932, Mark Oliphant teorizó sobre la fusión de núcleos ligeros (de hidrógeno), y poco después Hans Bethe describió el funcionamiento de las estrellas con base en este mecanismo.

El estudio de la radiactividad permitió un mayor conocimiento de la estructura del núcleo atómico y de las partículas subatómicas. Se abrió la posibilidad de convertir unos elementos en otros. Incluso se hizo realidad el ancestral sueño de los alquimistas de crear oro a partir de otros elementos... aunque en términos prácticos no resulte rentable.

Clases y componentes de la radiación

Se comprobó que la radiación puede ser de tres clases diferentes, conocidas como *partículas*, *desintegraciones* y *radiación*:

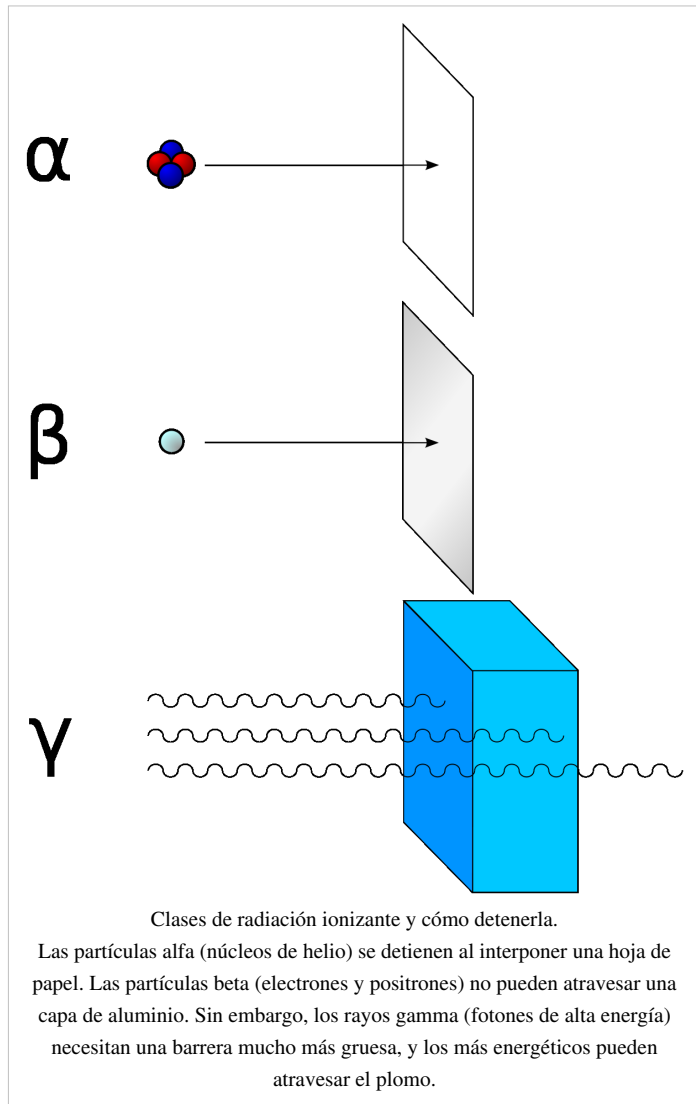
1. **Partícula alfa:** Son flujos de partículas cargadas positivamente compuestas por dos neutrones y dos protones (núcleos de helio). Son desviadas por campos eléctricos y magnéticos. Son poco penetrantes, aunque muy ionizantes. Son muy energéticas. Fueron descubiertas por Rutherford, quien hizo pasar partículas alfa a través de un fino cristal y las atrapó en un tubo de descarga. Este tipo de radiación la emiten núcleos de elementos pesados situados al final de la tabla periódica ($A > 100$). Estos núcleos tienen muchos protones y la repulsión eléctrica es muy fuerte, por lo que tienden a obtener N aproximadamente igual a Z , y para ello se emite una partícula alfa. En el proceso se desprende mucha energía, que se convierte en la energía cinética de la partícula alfa, por lo que estas partículas salen con velocidades muy altas.

2. **Desintegración beta:** Son flujos de electrones (beta negativas) o positrones (beta positivas) resultantes de la desintegración de los neutrones o protones del núcleo cuando éste se encuentra en un estado excitado. Es desviada por campos magnéticos. Es más penetrante, aunque su poder de ionización no es tan elevado como el de las partículas alfa. Por lo tanto, cuando un átomo expulsa una partícula beta, su número atómico aumenta o disminuye una unidad (debido al protón ganado o perdido). Existen tres tipos de radiación beta: la *radiación beta-*, que consiste en la emisión espontánea de electrones por parte de los núcleos; la *radiación beta+*, en la que un protón del núcleo se desintegra y da lugar a un neutrón, a un positrón o partícula Beta+ y un neutrino, y por último la captura electrónica que se da en núcleos con exceso de protones, en la cual el núcleo captura un electrón de la corteza electrónica, que se unirá a un protón del núcleo para dar un neutrón.

3. **Radiación gamma:** Se trata de ondas electromagnéticas. Es el tipo más penetrante de radiación. Al ser ondas electromagnéticas de longitud de onda corta, tienen mayor penetración y se necesitan capas muy gruesas de plomo u hormigón para detenerlas. En este tipo de radiación el núcleo no pierde su identidad, sino que se desprende de la energía que le sobra para pasar a otro estado de energía más baja emitiendo los rayos gamma, o sea fotones muy energéticos. Este tipo de emisión acompaña a las radiaciones alfa y beta. Por ser tan penetrante y tan energética, éste es el tipo más peligroso de radiación.

Las leyes de desintegración radiactiva, descritas por Frederick Soddy y Kasimir Fajans, son:

- Cuando un átomo radiactivo emite una partícula alfa, la masa del átomo (A) resultante disminuye en 4 unidades y el número atómico (Z) en 2.



- Cuando un átomo radiactivo emite una partícula beta, el número atómico (Z) aumenta o disminuye en una unidad y la masa atómica (A) se mantiene constante.
- Cuando un núcleo excitado emite radiación gamma, no varía ni su masa ni su número atómico: sólo pierde una cantidad de energía $h\nu$ (donde "h" es la constante de Planck y "v" es la frecuencia de la radiación emitida).

Las dos primeras leyes indican que, cuando un átomo emite una radiación alfa o beta, se transforma en otro átomo de un elemento diferente. Este nuevo elemento puede ser radiactivo y transformarse en otro, y así sucesivamente, con lo que se generan las llamadas series radiactivas.

Causa de la radiactividad

En general son radiactivas las sustancias que no presentan un balance correcto entre protones o neutrones, tal como muestra el gráfico al inicio del artículo. Cuando el número de neutrones es excesivo o demasiado pequeño respecto al número de protones, se hace más difícil que la fuerza nuclear fuerte debida al efecto del intercambio de piones pueda mantenerlos unidos. Eventualmente, el desequilibrio se corrige mediante la liberación del exceso de neutrones o protones, en forma de partículas α que son realmente núcleos de helio, y partículas β , que pueden ser electrones o positrones. Estas emisiones llevan a dos tipos de radiactividad, ya mencionados:

- Radiación α , que aligera los núcleos atómicos en 4 unidades másicas, y cambia el número atómico en dos unidades.
- Radiación β , que no cambia la masa del núcleo, ya que implica la conversión de un protón en un neutrón o viceversa, y cambia el número atómico en una sola unidad (positiva o negativa, según si la partícula emitida es un electrón o un positrón).

La radiación, por su parte, se debe a que el núcleo pasa de un estado excitado de mayor energía a otro de menor energía, que puede seguir siendo inestable y dar lugar a la emisión de más radiación de tipo α , β o γ . La radiación γ es, por tanto, un tipo de radiación electromagnética muy penetrante, ya que tiene una alta energía por fotón emitido.

Símbolo

El 15 de marzo de 1994, la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA) dio a conocer un nuevo símbolo de advertencia de radiactividad con validez internacional. La imagen fue probada en 11 países.

Contador Geiger

Un contador Geiger es un instrumento que permite medir la radiactividad de un objeto o lugar. Cuando una partícula radiactiva se introduce en un contador Geiger, produce un breve impulso de corriente eléctrica. La radiactividad de una muestra se calcula por el número de estos impulsos. Está formado, normalmente, por un tubo con un fino hilo metálico a lo largo de su centro. El espacio entre ellos está aislado y relleno de un gas, y con el hilo a unos 1000 voltios relativos con el tubo. Un ión o electrón penetra en el tubo (o se desprende un electrón de la pared por los rayos X o gamma) desprende electrones de los átomos del gas y que, debido al voltaje positivo del hilo central, son atraídos hacia el hilo. Al hacer esto ganan energía, colisionan con los átomos y liberan más electrones, hasta que el



proceso se convierte en un alud que produce un pulso de corriente detectable. Relleno de un gas adecuado, el flujo de electricidad se para por sí mismo o incluso el circuito eléctrico puede ayudar a pararlo. Al instrumento se le llama un "contador" debido a que cada partícula que pasa por él produce un pulso idéntico, permitiendo contar las partículas (normalmente de forma electrónica) pero sin decirnos nada sobre su identidad o su energía (excepto que deberán tener energía suficiente para penetrar las paredes del contador). Los contadores de Van Allen estaban hechos de un metal fino con conexiones aisladas en sus extremos.



Periodo de semidesintegración radiactiva

La desintegración radiactiva se comporta en función de la ley de decaimiento exponencial:

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

donde:

- $N(t)$ es el número de radionúclidos existentes en un instante de tiempo t .
- N_0 es el número de radionúclidos existentes en el instante inicial $t = 0$.
- λ , llamada constante de desintegración radiactiva, es la probabilidad de desintegración por unidad de tiempo. A partir de la definición de actividad (ver Velocidad de desintegración), es evidente que la constante de desintegración es el cociente entre el número de desintegraciones por segundo y el número de átomos radiactivos ($\lambda = A/N$).

Se llama tiempo de vida o tiempo de vida media de un radioisótopo el tiempo promedio de vida de un átomo radiactivo antes de desintegrarse. Es igual a la inversa de la constante de desintegración radiactiva ($\tau = 1/\lambda$).

Al tiempo que transcurre hasta que la cantidad de núcleos radiactivos de un isótopo radiactivo se reduzca a la mitad de la cantidad inicial se le conoce como periodo de semidesintegración, período, semiperiodo, semivida o vida media (no confundir con el ya mencionado *tiempo de vida*) ($T_{1/2} = \ln(2)/\lambda$). Al final de cada período, la radiactividad se reduce a la mitad de la radiactividad inicial. Cada radioisótopo tiene un semiperiodo característico, en general diferente del de otros isótopos.

Ejemplos:

Isótopo	Periodo	Emisión
Uranio-238	4510 millones de años	Alfa
Carbono-14	5730 años	Beta
Cobalto-60	5,271 años	Gamma
Radón-222	3,82 días	Alfa

Velocidad de desintegración

La velocidad de desintegración o actividad radiactiva se mide en Bq, en el SI. Un becquerel vale 1 desintegración por segundo. También existen otras unidades: el *rutherford*, que equivale a 10^6 desintegraciones por segundo, o el curio, Ci, que equivale idénticamente a $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo (unidad basada en la actividad de 1 g de ^{226}Ra que es cercana a esa cantidad).

La velocidad de desintegración es la tasa de variación del número de núcleos radiactivos por unidad de tiempo:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

Dada la ley de desintegración radiactiva que sigue $N(t)$ (ver Periodo de demidesintegración), es evidente que:

$$A(t) = -(-\lambda N_0) e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t},$$

donde:

- $A(t)$ es la actividad radiactiva en el instante t .
- A_0 es la actividad radiactiva inicial (cuando $t = 0$).
- e es la base de los logaritmos neperianos.
- t es el tiempo transcurrido.
- λ es la constante de desintegración radiactiva propia de cada radioisótopo.

La actividad también puede expresarse en términos del número de núcleos a partir de su propia definición. En efecto:

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

Ley de la radiosensibilidad

La ley de la radiosensibilidad (también conocida como ley de Bergonié y Tribondeau, postulada en 1906) dice que los tejidos y órganos más sensibles a las radiaciones son los menos diferenciados y los que exhiben alta actividad reproductiva.

Como ejemplo, tenemos:

1. Tejidos altamente radiosensibles: epitelio intestinal, órganos reproductivos (ovarios, testículos), médula ósea, glándula tiroides.
2. Tejidos medianamente radiosensibles: tejido conectivo.
3. Tejidos poco radiosensibles: neuronas, hueso.

Consecuencias para la salud de la exposición a las radiaciones ionizantes

Los efectos de la radiactividad sobre la salud son complejos. Dependen de la dosis absorbida por el organismo. Como no todas las radiaciones tienen la misma nocividad, se multiplica cada radiación absorbida por un coeficiente de ponderación para tener en cuenta las diferencias. Esto se llama dosis equivalente, que se mide en sieverts (Sv), ya que el becquerel, para medir la peligrosidad de un elemento, erróneamente considera idénticos los tres tipos de radiaciones (alfa, beta y gamma). Una radiación alfa o beta es relativamente poco peligrosa fuera del cuerpo. En cambio, es extremadamente peligrosa cuando se inhala. Por otro lado, las radiaciones gamma son siempre dañinas, puesto que se les neutraliza con dificultad.

Véase también: Radiación ionizante

Riesgos para la salud

El riesgo para la salud no sólo depende de la intensidad de la radiación y de la duración de la exposición, sino también del tipo de tejido afectado y de su capacidad de absorción. Por ejemplo, los órganos reproductores son 20 veces más sensibles que la piel.

Véase también: *Contaminación radiactiva*

Dosis aceptable de irradiación

Hasta cierto punto, las radiaciones naturales (emitidas por el medio ambiente) son inofensivas. El promedio de tasa de dosis equivalente medida a nivel del mar es de 0,00012 mSv/h (0,012 mrem/h).

La dosis efectiva (suma de las dosis recibida desde el exterior del cuerpo y desde su interior) que se considera que empieza a producir efectos en el organismo de forma detectable es de 100 mSv (10 rem) en un periodo de 1 año.^[1]

Los métodos de reducción de la dosis son: 1) reducción del tiempo de exposición, 2) aumento del blindaje y 3) aumento de la distancia a la fuente radiante.

A modo de ejemplo, se muestran las tasas de dosis en la actualidad utilizadas en una central nuclear para establecer los límites de permanencia en cada zona, el personal que puede acceder a ellas y su señalización:

Zona	Dosis
Zona gris o azul	de 0,0025 a 0,0075 mSv/h
Zona verde	de 0,0075 a 0,025 mSv/h
Zona amarilla	de 0,025 a 1 mSv/h
Zona naranja	de 1 a 100 mSv/h
Zona roja	> 100 mSv/h

Dosis efectiva permitida

La dosis efectiva es la suma ponderada de dosis equivalentes en los tejidos y órganos del cuerpo procedentes de irradiaciones internas y externas. En la Unión Europea, la Directiva 96/29/EURATOM limita la dosis efectiva para trabajadores expuestos a 100 mSv durante un período de cinco años consecutivos, con una dosis efectiva máxima de 50 mSv en cualquier año, y existen otros límites concretos de dosis equivalentes en determinadas zonas del cuerpo, como el cristalino, la piel o las extremidades, además de límites concretos para mujeres embarazadas o lactantes. Para la población general, el límite de dosis efectiva es de 1 mSv por año, aunque en circunstancias especiales puede permitirse un valor de dosis efectiva más elevado en un único año, siempre que no se sobrepasen 5 mSv en cinco años consecutivos.^[2]

En el caso de intervenciones (emergencias radiológicas), sin embargo, estos límites no son aplicables. En su lugar se recomienda que, cuando puedan planificarse las acciones, se utilicen niveles de referencia. En estos casos, las actuaciones comienzan cuando la dosis al público puede superar los 10 mSv en dos días (permanencia en edificios). En cuanto a los trabajadores, se intentará que la dosis que reciban sea siempre inferior al límite anual, salvo en medidas urgentes (rescate de personas, situaciones que evitarían una dosis elevada a un gran número de personas, impedir situaciones catastróficas). En estos casos se intentará que no se supere el doble del límite de dosis en un solo año (100 mSv), excepto cuando se trate de salvar vidas, donde se pondrá empeño en mantener las dosis por debajo de 10 veces ese límite (500 mSv). Los trabajadores que participen en acciones que puedan alcanzar este nivel de 500 mSv deberán ser informados oportunamente y deberán ser voluntarios.^[3]

La dosis efectiva es una dosis acumulada. La exposición continua a las radiaciones ionizantes se considera a lo largo de un año, y tiene en cuenta factores de ponderación que dependen del órgano irradiado y del tipo de radiación de que se trate.

La dosis efectiva permitida para alguien que trabaje con radiaciones ionizantes (por ejemplo, en una central nuclear o en un centro médico) es de 100 mSv en un periodo de 5 años, y no se podrán superar en ningún caso los 50 mSv en un mismo año. Para las personas que no trabajan con radiaciones ionizantes, este límite se fija en 1 mSv al año. Estos valores se establecen por encima del fondo natural (que en promedio es de 2,4 mSv al año en el mundo).

Las diferencias en los límites establecidos entre trabajadores y otras personas se deben a que los trabajadores reciben un beneficio directo por la existencia de la industria en la que trabajan, y por tanto, asumen un mayor riesgo que las personas que no reciben un beneficio directo.

Por ese motivo, para los estudiantes se fijan límites algo superiores a los de las personas que no trabajan con radiaciones ionizantes, pero algo inferiores a los de las personas que trabajan con radiaciones ionizantes. Para ellos se fija un límite de 6 mSv en un año.

Además, esos límites se establecen en función de ciertas hipótesis, como es la del comportamiento lineal sin umbral de los efectos de las radiaciones ionizantes sobre la salud (el modelo LNT). A partir de este modelo, basado en medidas experimentales (de grandes grupos de personas expuestas a las radiaciones, como los supervivientes de Hiroshima y Nagasaki) de aparición de cáncer, se establecen límites de riesgo considerado aceptable, consensuados con organismos internacionales tales como la Organización Internacional del Trabajo (OIT), y a partir de esos límites se calcula la dosis efectiva resultante.

Véase también: Modelo lineal sin umbral

Ejemplos de isótopos radiactivos naturales

- Uranio ^{235}U y ^{238}U
- Torio ^{234}Th y ^{232}Th
- Radio ^{226}Ra y ^{228}Ra
- Carbono ^{14}C
- Tritio ^3H
- Radón ^{222}Rn
- Potasio ^{40}K
- Polonio ^{210}Po

Ejemplos de isótopos radiactivos artificiales

- Plutonio ^{239}Pu y ^{241}Pu
- Curio ^{242}Cm y ^{244}Cm
- Americio ^{241}Am
- Cesio ^{134}Cs , ^{135}Cs y ^{137}Cs
- Yodo ^{129}I , ^{131}I y ^{133}I
- Antimonio ^{125}Sb
- Rutenio ^{106}Ru
- Estroncio ^{90}Sr
- Criptón ^{85}Kr y ^{89}Kr
- Selenio ^{75}Se
- Cobalto ^{60}Co


Véase también

- Rayos X
- Teoría atómica

Referencias

- [1] Resumen del informe del BEIR (en inglés) ([http://www.sepr.es/html/recursos/publicaciones/BEIR VII Summary.pdf](http://www.sepr.es/html/recursos/publicaciones/BEIR_VII_Summary.pdf))
- [2] Directiva 96/29/Euratom del Consejo de 13 de mayo de 1996 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes (<http://europa.eu/eur-lex/lex/Notice.do?val=312346:cs&lang=es&list=312346:cs,&pos=1&page=1&nbl=1&pgs=10&hwords=&checktext=checkbox&visu=#texte>), DO L159 de 29-6-1996.
- [3] Normas Internacionales de Seguridad. SS N° 115. (en inglés). (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/SS-115-Web/Pub996_web-1a.pdf)

Enlaces externos

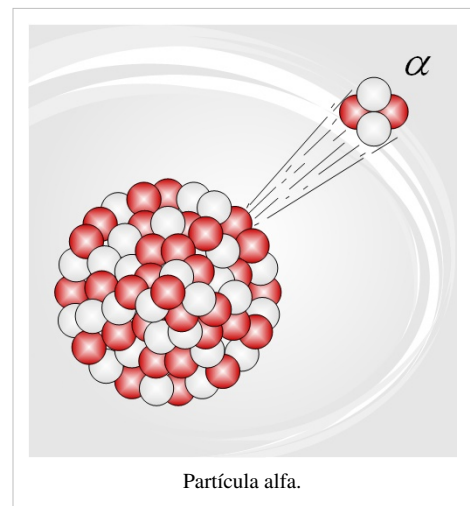
-  Wikimedia Commons alberga contenido multimedia sobre **Radiactividad**. Commons
- ATSDR en Español - ToxFAQs™: americio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts156.html): Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. (dominio público)
- ATSDR en Español - ToxFAQs™: cesio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts157.html): Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. (dominio público)
- ATSDR en Español - ToxFAQs™: plutonio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts143.html): Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. (dominio público)
- ATSDR en Español - ToxFAQs™: uranio (http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts150.html): Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE.UU. (dominio público)

Partícula alfa


Las **partículas** o **rayos alfa** (α) son núcleos completamente ionizados, es decir, sin su envoltura de electrones correspondiente, de helio-4 (${}^4\text{He}$). Estos núcleos están formados por dos protones y dos neutrones. Al carecer de electrones, su carga eléctrica es positiva ($+2q_e$), mientras que su masa es de 4 uma.

Se generan habitualmente en reacciones nucleares o desintegración radiactiva de otros núclidos que se transmutan en elementos más ligeros mediante la emisión de dichas partículas. Su capacidad de penetración es pequeña; en la atmósfera pierden rápidamente su energía cinética, porque interactúan fuertemente con otras moléculas debido a su gran masa y carga eléctrica, generando una cantidad considerable de iones por centímetro de longitud recorrida. En general no pueden atravesar espesores de varias hojas de papel.



Tiene una carga de $3,2 \cdot 10^{-19}$ coulombs y una masa de $6,68 \cdot 10^{-27}$ kg.



Véase también

- Desintegración alfa
- Poder de frenado
- Partícula beta
- Rayos gamma
- Radiación
-  Portal:Física. Contenido relacionado con **Física**.

Enlaces externos

-  Wikimedia Commons alberga contenido multimedia sobre **Partícula alfa**. Commons
-  Wikcionario tiene definiciones para **rayos alfa**. Wikcionario

Rayos gamma

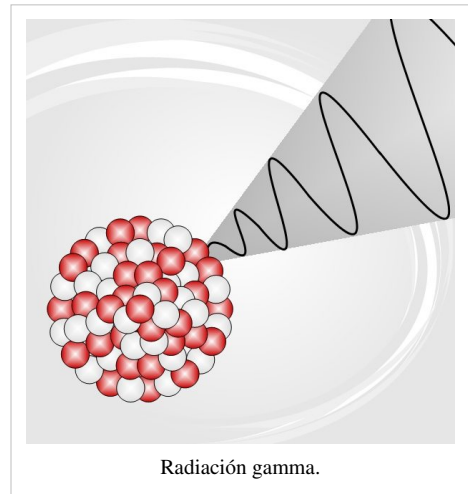
La **radiación gamma** o **rayos gamma** (γ) es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto formada por fotones, producida generalmente por elementos radiactivos o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Este tipo de radiación de tal magnitud también es producida en fenómenos astrofísicos de gran violencia

Debido a las altas energías que poseen, los rayos gamma constituyen un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta. Dada su alta energía pueden causar grave daño al núcleo de las células, por lo que son usados para esterilizar equipos médicos y alimentos.

La energía de esta naturaleza se mide en megaelectronvoltios (MeV). Un MeV corresponde a fotones gamma de longitudes de onda inferiores a 10^{-11} m o frecuencias superiores a 10^{19} Hz.

Los rayos gamma se producen en la desexcitación de un nucleón de un nivel o estado excitado a otro de menor energía y en la desintegración de isótopos radiactivos. Los **rayos gamma** se diferencian de los rayos X en su origen, debido a que estos últimos se producen a nivel extranuclear, por fenómenos de frenado electrónico. Generalmente asociada con la energía nuclear y los reactores nucleares, la radiactividad se encuentra en nuestro entorno natural, desde los rayos cósmicos, que nos bombardean desde el sol y las galaxias de fuera de nuestro Sistema Solar, hasta algunos isótopos radiactivos que forman parte de nuestro entorno natural.

En general, los rayos gamma producidos en el espacio no llegan a la superficie de la Tierra, pues son absorbidos en la alta atmósfera. Para observar el universo en estas frecuencias, es necesario utilizar globos de gran altitud u observatorios espaciales. En ambos casos se utiliza el efecto Compton para detectar los rayos gamma. Estos rayos gamma se producen en fenómenos astrofísicos de alta energía como explosiones de supernovas o núcleos de galaxias activas. En astrofísica se denominan GRB (Gamma Ray Bursts) a fuentes de rayos gamma que duran unos segundos o unas pocas horas siendo sucedidos por un brillo decreciente de la fuente en rayos X durante algunos días. Ocurren en posiciones aleatorias del cielo y su origen permanece todavía bajo discusión científica. En todo caso parecen constituir los fenómenos más energéticos del Universo.



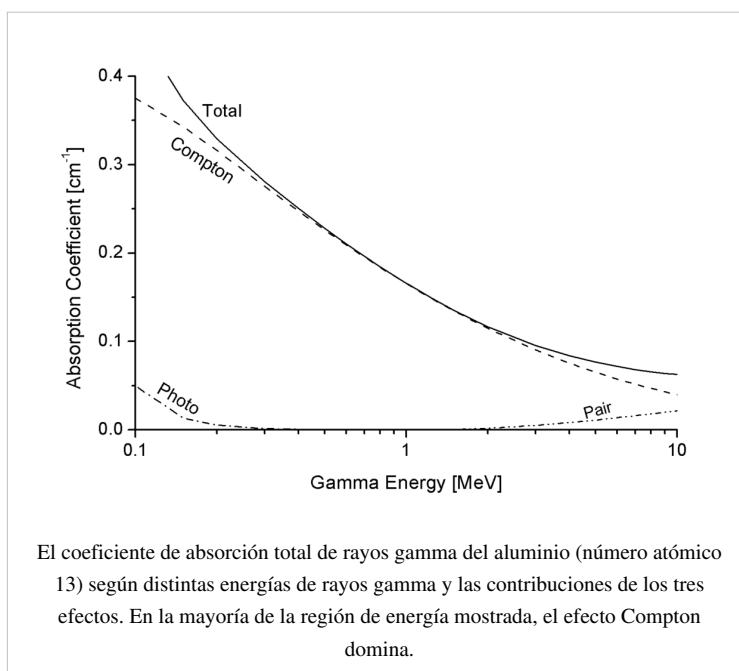
La excepción son los rayos gamma de energía por encima de unos miles de MeV (o sea, gigaelectronvoltios o GeV), que, al incidir en la atmósfera, producen miles de partículas (cascada atmosférica extensa) que, como viajan a velocidades cercanas a las de la luz en el aire, generan radiación de Cherenkov. Esta radiación es detectada en la superficie de la Tierra mediante un tipo de telescopio llamado telescopio Cherenkov.

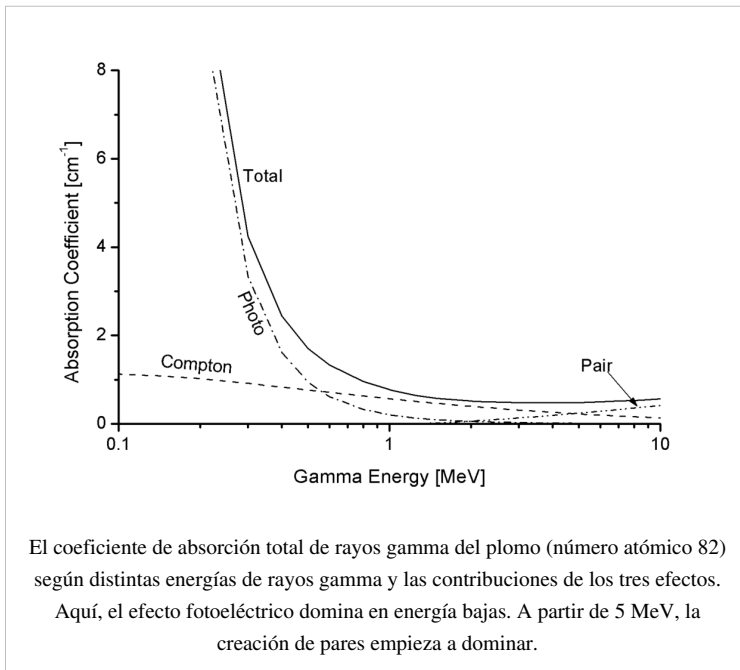
Protección

Para protegerse de los rayos gamma se requiere gran cantidad de masa. Los materiales de alto número atómico y alta densidad protegen mejor contra los rayos gamma. A mayor energía de los mismos el espesor de la protección debe ser mayor. Los materiales para protegerse de los rayos gamma son caracterizados con el espesor necesario para reducir la intensidad de los rayos gamma a la mitad (*capa de valor medio* o *HVL* por sus siglas en inglés). Por ejemplo, los rayos gamma que requieren 1 cm (0.4 pulgadas) de plomo para reducir su intensidad en un 50% también verán reducida su intensidad a la mitad por 6 cm (2½ pulgadas) de hormigón o 9 cm (3½ pulgadas) de tierra compacta.

Interacción con la materia

Cuando un rayo gamma pasa a través de la materia, la probabilidad de absorción en una capa fina es proporcional al grosor de dicha capa, lo que lleva a un decrecimiento exponencial de la intensidad.





$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Aquí, $\mu = n \times \sigma$ es el coeficiente de absorción, medido en cm^{-1} , n el número de átomos por cm^3 en el material, σ el espectro de absorción en cm^2 y d la delgadez del material en cm.

Pasando a través de la materia, la radiación gamma principalmente ioniza de tres formas: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la creación de pares.

- **Efecto Fotoeléctrico:** Se describe cuando un fotón gamma interactúa con un electrón atómico y le transfiere su energía, expulsando a dicho electrón del átomo. La energía cinética del fotoelectrón resultante es igual a la energía del fotón gamma incidente menos la energía de enlace del electrón. El efecto fotoeléctrico es el mecanismo de transferencia de energía dominante para rayos x y fotones de rayos gamma con energías por debajo de 0.5 MeV (millones de electronvoltios), pero es menos importante a energías más elevadas.
- **Efecto Compton:** Se refiere a la interacción donde un fotón gamma incidente hace ganar suficiente energía a un electrón atómico como para provocar su expulsión. Con la energía restante del fotón original se emite un nuevo fotón gamma de baja energía con una dirección de emisión diferente a la del fotón gamma incidente. La probabilidad del Efecto Compton decrece según la energía del fotón se incrementa. El Efecto Compton se considera que es el principal mecanismo de absorción de rayos gamma en el rango de energía intermedio entre 100 keV a 10 MeV (Megaelectronvoltio), un rango de energía que incluye la mayor parte de la radiación gamma presente en una explosión nuclear. El efecto Compton es relativamente independiente del número atómico del material absorbente.
- **Creación de pares:** Debido a la interacción de la fuerza de Coulomb, en la vecindad del núcleo, la energía del fotón incidente se convierte espontáneamente en la masa de un par electrón-positrón. Un positrón es la antipartícula equivalente a un electrón; tiene la misma masa y una carga de igual magnitud pero de signo opuesto que la carga de un electrón. La energía excedente del equivalente a la masa en reposo de las dos partículas (1,02 MeV) aparece como energía cinética del par y del núcleo. El positrón tiene una vida muy corta (sobre 10^{-8} segundos). Al final de su periodo, se combina con un electrón libre. Toda la masa de estas dos partículas se convierte entonces en dos fotones gamma de 0,51 MeV de energía cada uno.

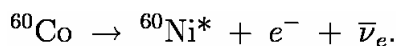
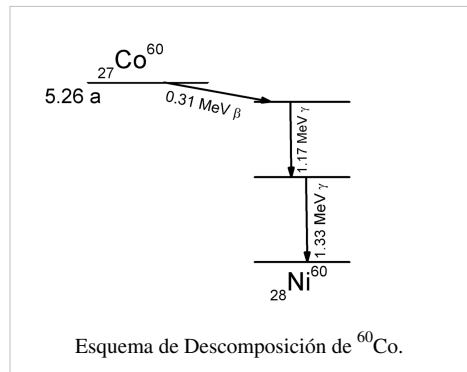
Los electrones secundarios (o positrones) producidos en cualquier de estos tres procesos, frecuentemente tienen energía suficiente para producir muchas ionizaciones hasta el final del proceso.

La absorción exponencial descrita arriba se mantiene, estrictamente hablando, solo para un rayo estrecho de rayos gamma. Si un rayo más ancho de rayos gamma pasa a través de un fino bloque de hormigón, la dispersión en los lados reduce la absorción.

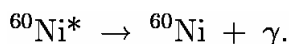
A menudo, los rayos gamma se presentan entre otras formas de radiación, como la alfa o la beta. Cuando un núcleo emite una partícula α o β , a veces el Producto de desintegración queda excitado pudiendo saltar a un nivel de energía inferior emitiendo un rayo gamma, de igual manera que un electrón atómico puede saltar a un nivel de energía inferior emitiendo luz visible o radiación ultravioleta.

Las posibles formas de radiación electromagnética son los rayos gamma, los rayos X, la luz visible y los rayos UV (UVA y UVB, siendo éstos últimos más energéticos). La única diferencia entre ellos es la frecuencia y por lo tanto, la energía de los fotones, siendo los rayos gamma los más energéticos. A continuación se muestra un ejemplo de producción de rayos gamma.

Primero ^{60}Co se descompone en ^{60}Ni excitado:



Entonces el ^{60}Ni cae a su estado fundamental emitiendo dos rayos gamma seguidos uno del otro.



Los rayos gamma son de 1,17 MeV y 1,33 MeV respectivamente.

Otro ejemplo es la descomposición alfa de ^{241}Am para producir ^{237}Np . Esta descomposición alfa esta acompañada por una emisión gamma. En algunos casos, esta emisión gamma es bastante simple (por ejemplo, $^{60}\text{Co}/^{60}\text{Ni}$), mientras que en otros casos como con ($^{241}\text{Am}/^{237}\text{Np}$ y $^{192}\text{Ir}/^{192}\text{Pt}$), la emisión gamma es compleja, revelando que una serie de distintos niveles de energía nuclear pueden existir. El hecho de que un el espectro alfa puede tener una serie de diferentes picos con diferentes energías, refuerza la idea de que muchos niveles de energía nuclear son posibles.

Debido a que una descomposición beta esta acompañada de la emisión de un neutrino que a su vez, resta energía, el espectro beta no posee líneas definidas, sino que es un pico ancho. Por lo tanto, de una única descomposición beta no es posible determinar los diferentes niveles energéticos encontrados en el núcleo.

En óptica espectrónica, es bien conocido que una entidad que emite luz, también puede absorber luz de la misma longitud de onda (energía del fotón). Por ejemplo, un llama de sodio puede emitir luz amarilla y además, puede absorber luz amarilla de una lámpara de vapor de sodio. En el caso de los rayos gamma, se puede observar en la espectroscopia Mössbauer, donde se puede obtener una corrección para la energía perdida por el retroceso del núcleo y las condiciones exactas para la absorción de los rayos gamma a través de la resonancia.

Esto es similar a efecto Frank Condon visto en óptica espectroscópica.

Utilización

La potencia de los rayos gamma los hace útiles en la esterilización de equipamiento médico. Se suelen utilizar para matar bacterias e insectos en productos alimentarios tales como carne, setas, huevos y verduras, con el fin de mantener su frescura.

Debido a la capacidad de penetrar en los tejidos, los rayos gamma o los rayos X tienen un amplio espectro de usos médicos, como la realización de tomografías y radioterapias. Sin embargo, como forma de radiación ionizante, tienen la habilidad de provocar cambios moleculares, pudiendo tener efectos cancerígenos si el ADN es afectado.

A pesar de las propiedades cancerígenas, los rayos gamma también se utilizan para el tratamiento de ciertos tipos de cáncer. En el procedimiento llamado cirugía *gamma-knife*, múltiples rayos concentrados de rayos gamma son dirigidos hacia células cancerosas. Los rayos son emitidos desde distintos ángulos para focalizar la radiación en el tumor a la vez que se minimiza el daño a los tejidos de alrededor.

Los rayos gamma también se utilizan en la medicina nuclear para realizar diagnósticos. Se utilizan muchos radioisótopos que emiten rayos gamma. Uno de ellos es el tecnecio-99m. Cuando se le administra a un paciente, una cámara gamma puede utilizar la radiación gamma emitida para obtener una imagen de la distribución del radioisótopo. Esta técnica se emplea en la diagnosis de un amplio espectro de enfermedades, por ejemplo, en la detección del cáncer de huesos.

Los detectores de rayos gamma se emplean a menudo en Pakistán como parte del **Container Security Initiative** (Iniciativa de Seguridad en Contenedores de Carga, por sus siglas en inglés). Estas máquinas tiene por objetivo escanear los contenedores de mercancía que llegan vía marítima antes de que entren a los puertos de E.E.U.U para prevenir el ingreso de artículos peligrosos, o carga no deseada; o la detección temprana de bombas o narcóticos en estos contenedores, con un valor aproximado de 5 millones de dólares, pueden escanear alrededor de 30 contenedores por hora.

Referencias

- <http://www.eluniversal.com.mx/graficos/animados/videos/videoya.html>

Véase también

- Telescopio MAGIC
- Desintegración radiactiva
- Fotón
- Radiación electromagnética
- Núcleo atómico
- Medicina nuclear
- Gammacámara
- Protección radiológica
- Percepción de cronos
- Hulk
- Gamma Ray

Enlaces externos

- Wikcionario tiene definiciones para **rayos gamma**. Wikcionario
- Rayos gamma ^[1] reportaje documental del programa tesis.
- Astronomía de altas energías: rayos X, rayos gamma y rayos cósmicos ^[2]

Predecesor: Rayos X	Rayos gamma Lon. de onda: 10^{-11} m \rightarrow 0 Frecuencia: 3×10^{19} Hz \rightarrow ∞	Sucesor: Radiación cósmica
-------------------------------	--	--------------------------------------

Referencias

[1] <http://www.cedecom.es/cedecom-ext/noticia.asp?id=801>

[2] <http://www.ugr.es/~ute/Rayos-x-y-gamma.pdf>

Periodo de semidesintegración

Evolución de una muestra

Periodos transcurridos	Núcleos sin desintegrar
0	100%
1	50%
2	25%
3	12,5%
4	6,25%
5	3,125%
6	1,5625%
7	0,78125%
N	$\frac{100}{2^N}$ %

El **periodo de semidesintegración**, también llamado **vida mitad**, **semivida**, **hemivida** o simplemente **periodo**, es el lapso necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos de una muestra inicial de una sustancia radiactiva. Se toma como referencia la mitad de ellos debido al carácter aleatorio de la desintegración nuclear. El periodo de semidesintegración no debe confundirse con la vida media.

Cálculo de $t_{1/2}$

Notación:

- $t_{1/2}$ es el periodo de semidesintegración.
- $N(t)$ es el número de núcleos de la muestra en el instante tiempo t .
- N_0 es el número inicial (cuando $t = 0$) de núcleos de la muestra.
- λ es la constante de desintegración.

El instante en el que el número de núcleos se ha reducido a la mitad es $t_{1/2}$. O sea:

$$N(t_{1/2}) = N_0 \cdot \frac{1}{2}$$

Sustituyendo en la fórmula de decaimiento exponencial:

$$N_0 \cdot \frac{1}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{1}{2}$$

$$-\lambda t_{1/2} = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2$$

Por tanto, la relación entre el período de una sustancia ($t_{1/2}$) y su constante de desintegración (λ) es:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

De lo que resulta que la vida mitad es aproximadamente el 69,31% de la vida media.

Si queremos calcular el tiempo que tarda una sustancia en ser el 20% de la inicial haremos:

C_0 = Concentración inicial.

$C_t = 0.2 \cdot C_0$

K = Constante de semidesintegración

$t_{1/2}$ = Tiempo de semidesintegración

$t_{1/2} = \ln(C_0/C_t)/k$

La velocidad de desintegración de un contaminante será menor cuanto menos cantidad de contaminante quede (suponemos que el contaminante sigue una cinética de primer orden).

Periodos de semidesintegración de algunas sustancias

Uranio 235	$7,038 \cdot 10^8$ años	Uranio 238	$4,468 \cdot 10^9$ años	Potasio 40	$1,28 \cdot 10^9$ años
Rubidio 87	$4,88 \cdot 10^{10}$ años	Calcio 41	$1,03 \cdot 10^5$ años	Carbono 14	5760 años
Radio 226	1602 años	Cesio 137	30,07 años	Bismuto 207	31,55 años
Estroncio 90	28,90 años	Cobalto 60	5,271 años	Cadmio 109	462,6 días
Yodo 131	8,02 días	Radón 222	3,82 días	Oxígeno 15	122 segundos

Véase también

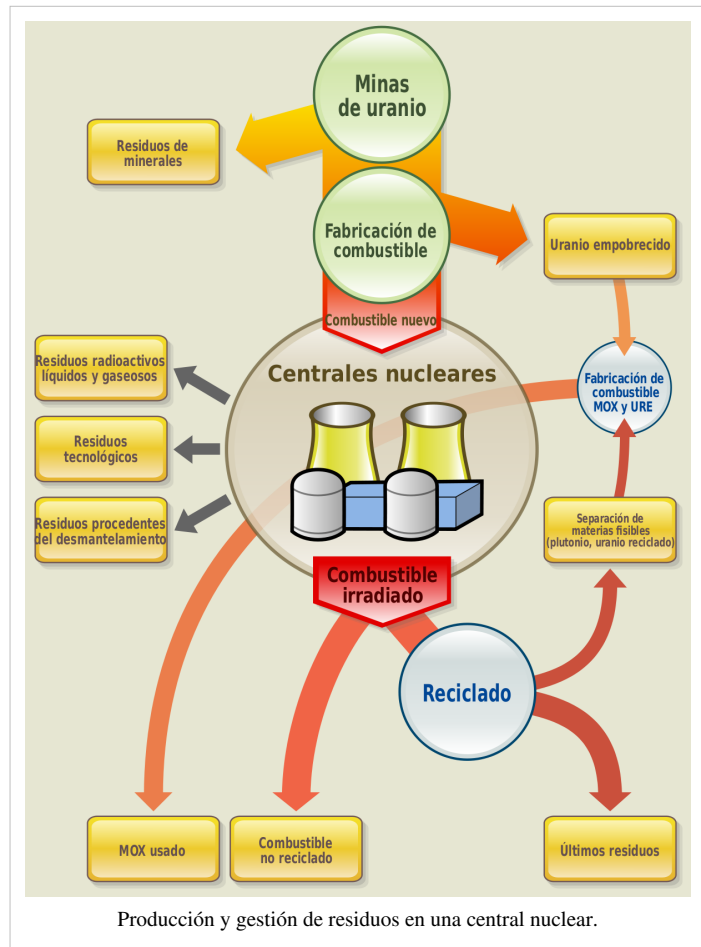
- Vida media
- Semivida

Residuo radiactivo

Los **Residuos radiactivos** son residuos que contienen elementos químicos radiactivos que no tienen un propósito práctico. Es frecuentemente el subproducto de un proceso nuclear, como la fisión nuclear. El residuo también puede generarse durante el procesamiento de combustible para los reactores o armas nucleares o en las aplicaciones médicas como la radioterapia o la medicina nuclear.

Se suelen clasificar por motivos de gestión en:

- **Residuos desclasificables (o exentos):** No poseen una radiactividad que pueda resultar peligrosa para la salud de las personas o el medio ambiente, en el presente o para las generaciones futuras. Pueden utilizarse como materiales convencionales.
- **Residuos de baja actividad:** Poseen radiactividad gamma o beta en niveles menores a $0,04 \text{ GBq/m}^3$ si son líquidos, $0,00004 \text{ GBq/m}^3$ si son gaseosos, o la tasa de dosis en contacto es inferior a 20 mSv/h si son sólidos. Solo se consideran de esta categoría si además su periodo de semidesintegración es inferior a 30 años. Deben almacenarse en almacenamientos superficiales.
- **Residuos de media actividad:** Poseen radiactividad gamma o beta con niveles superiores a los residuos de baja actividad pero inferiores a 4 GBq/m^3 para líquidos, gaseosos con cualquier actividad o sólidos cuya tasa de dosis en contacto supere los 20 mSv/h . Al igual que los residuos de baja actividad, solo pueden considerarse dentro de esta categoría aquellos residuos cuyo periodo de semidesintegración sea inferior a 30 años. Deben almacenarse en almacenamientos superficiales.
- **Residuos de alta actividad o alta vida media:** Todos aquellos materiales emisores de radiactividad alfa y aquellos materiales emisores beta o gamma que superen los niveles impuestos por los límites de los residuos de media actividad. También todos aquellos cuyo periodo de semidesintegración supere los 30 años (por ejemplo los actínidos minoritarios), deben almacenarse en almacenamientos geológicos profundos (AGP).



Envases con residuos nucleares transuránicos.

Composición

Los residuos nucleares, cuyo aspecto es igual al del combustible nuevo. Emiten radiación alfa, beta y gamma, además de generar calor como consecuencia de la desintegración radiactiva. Además contienen diferentes sustancias que desarrollan su radiactividad independientemente, lo que dificulta el tratamiento de los residuos; por ejemplo, aunque el principal elemento sea el uranio (95% de los residuos), son los productos de fisión del combustible (2% de los residuos) los que se mantienen mayor actividad durante los primeros 150-200 años. Entre estos residuos se encuentran también el plutonio 240, que tarda aproximadamente 6600 años en desintegrarse; y el neptunio 237, con una vida media de 2.130.000 años.

Transporte de residuos

Se genera un peligro importante en el transporte de los residuos desde las centrales al Almacén temporal centralizado, se realiza en el interior de unos grandes cilindros de metal extremadamente resistentes, de hecho Enresa ha publicado videos con pruebas en las que incluso estos cilindros superan sin problemas la embestida de una locomotora a más de 100 kilómetros hora o resistencia al fuego a 800 grados durante media hora, ahora bien, un error o atentado terrorista podría resultar catastrófico, una persona no puede soportar con vida más de 20 segundos cerca de tales residuos.

Almacenamiento de los residuos

Existen medios viables para la gestión de los residuos. En el caso de los de media y baja actividad, se cuenta con dos opciones. Por un lado, el confinamiento en superficie o bien su almacenamiento en instalaciones subterráneas de baja profundidad. En el caso de España, se almacenan en la superficie en celdas de hormigón, donde se ubican los contenedores con los residuos debidamente acondicionados. El Cabril, en la Sierra Albarrana (Córdoba), es la instalación de almacenamiento de residuos de baja y media actividad para todo el país. Consta de tres módulos de almacenamiento, un edificio de acondicionamiento de los residuos de baja y media actividad, un laboratorio de verificación de la calidad y 28 estructuras de almacenamiento, con capacidad de 320 contenedores por cada una.

Por su parte, los residuos de alta actividad requieren sistemas de gestión que garanticen su aislamiento y confinamiento durante largos periodos de tiempo. Las dos opciones que existen para su almacenamiento son el almacenamiento temporal prolongado y el almacenamiento definitivo a gran profundidad o almacenamiento geológico profundo. El almacenamiento temporal prolongado permite guardar el combustible entre 100 y 300 años y puede llevarse a cabo con la tecnología existente en la actualidad a través de los almacenes temporales centralizados. Respecto a la segunda opción, el almacenamiento geológico profundo, aún ha de demostrarse que sea efectivo para periodos extremadamente largos o al menos similares a los del almacenamiento temporal prolongado. Pese a no existir una regulación internacional específica al respecto, sí que hay consenso acerca de que el almacenamiento geológico profundo es la mejor opción una vez que la tecnología ofrezca totales garantías. El ATC, sin embargo, no ofrece una solución definitiva al problema, sino que queda pendiente para generaciones futuras. Se trata, por tanto, de una opción de gestión temporal, y no final. Aun así, mientras se terminan de perfilar los proyectos para los almacenes geológicos profundos, es la opción viable. La investigación no se detiene y para 2035 está prevista la creación de un almacén geológico profundo en España.

Véase también

- Contaminación
- Cementerio nuclear
- ENRESA
- Energía nuclear
- Abandono de la energía nuclear
- Desmantelamiento de instalaciones nucleares

Enlaces externos

- Empresa Nacional de Residuos SA ^[1].
- Agencia Reguladora Nuclear ^[2] (de EE. UU., en inglés).
- Greenpeace.org, «Media vida marcada por los daños de la energía nuclear» ^[3].
- Juan José Gómez Cadenas, «¿Basura radiactiva o energía para el futuro?» ^[4], *Revista de Libros*, 167, noviembre de 2010.

Referencias

[1] <http://www.enresa.es>

[2] <http://www.nrc.gov/waste.html>

[3] <http://www.greenpeace.org.ar/mayak>

[4] http://www.revistadelibros.com/articulo_completo.php?art=4784

Cementerio nuclear

Cementerio nuclear es un término coloquial en castellano que se refiere a cualquier lugar utilizado para almacenar residuos radiactivos producidos en reacciones nucleares, independientemente de su naturaleza y del tipo de residuo almacenado.

Los residuos radiactivos normalmente constan de una serie de radioisótopos: configuraciones inestables de los elementos que emiten radiaciones ionizantes que pueden ser nocivas para la salud humana y el medio ambiente. Los isótopos emiten diferentes tipos y niveles de radiación, durante períodos distintos para cada uno de ellos.

Bajo el término genérico *cementerio nuclear* se encuentran las distintas ubicaciones que se han buscado para alojar este tipo de materiales, y que han sido condicionadas por el tipo de radiación de los residuos.

Son considerados cementerios nucleares los almacenes de residuos de baja actividad, los almacenes temporales, los almacenes geológicos profundos y las zonas del fondo oceánico utilizadas para el vertido de residuos radiactivos, denominados en ocasiones almacenes submarinos.



Símbolo utilizado tradicionalmente para indicar la presencia de radiactividad.

Tipos de residuos

Atendiendo a las características de su gestión, los residuos radiactivos se suelen clasificar según su período de actividad radiactiva en:

- **Residuos de baja y media actividad****Residuos de baja actividad:** son los generados por los hospitales y la industria, así como en el tratamiento del combustible nuclear. Constan de papel, trapos, herramientas, ropa, filtros, etc, que suelen contener pequeñas cantidades de radiación de corta duración (un periodo de semidesintegración de hasta 30 años).^[1]
- **Residuos de baja y media actividad****Residuos de media actividad:** contienen cantidades más altas de radiactividad y, en algunos casos, requieren protección. Incluyen resinas, productos químicos y lodos del reactor nuclear, así como los materiales contaminados de desmantelamiento del reactor. Suelen ser solidificados en hormigón o alquitrán para su eliminación. Su periodo de semidesintegración es también de hasta 30 años.^[2]
- **Residuos de alta actividad:** son los producidos por los reactores nucleares. Contienen productos de fisión y elementos transuránicos generados en el núcleo del reactor. Son altamente radiactivos y, a menudo térmicamente calientes. Los residuos de alta actividad suponen más del 95% de la radiactividad total producida en el proceso de generación de electricidad nuclear. Son todos aquellos cuyo proceso de semidesintegración supera los 30 años. Entre estos residuos se encuentran el plutonio 240, que tarda aproximadamente 6600 años en desintegrarse; y el neptunio 237, con una vida media de 2.130.000 años.

Tipos de almacenado

De residuos de baja actividad

Los almacenes de residuos de baja y media actividad suelen ubicarse en superficie o a baja profundidad, y en ocasiones aprovechando minas abandonadas. Albergan todo tipo de residuos de baja y media actividad, y están diseñados con un sistema de barreras múltiples, tanto naturales como artificiales, en zonas geológicamente estables e impermeables.^[1] Además, los residuos se ubican en contenedores para evitar su contacto con el exterior.

Almacenes temporales

El almacén temporal centralizado (ATC) está diseñado para albergar residuos de alta actividad. En su interior se gestionan los residuos radiactivos, bien como solución temporal para su aislamiento, o bien con el objetivo de tratar y reciclar estos residuos. En países como Francia o el Reino Unido, se encuentran anexos a plantas de reprocesado, donde se separa cualquier elemento utilizable, como el uranio y el plutonio, de productos de fisión y otros materiales existentes en el combustible nuclear gastado en los reactores nucleares. El problema de este tipo de instalación es que está concebida para el almacenamiento durante menos de 100 años, mientras que este tipo de residuos tienen una vida máxima superior a 300 años.^[3]



Las instalaciones de Sellafield en la costa de Cumbria, Reino Unido.

Almacenes geológicos

El almacenamiento geológico profundo (AGP) se utiliza para residuos de alta actividad, y es el lugar donde deben almacenarse éstos durante un periodo de miles de años. Su utilización está justificada por motivos tecnológicos, ambientales y de seguridad, éticos y de buena práctica internacional. Asegura la protección a largo plazo del ser humano y del medio ambiente contra las radiaciones, aprovechando formaciones geológicas que permitan ubicar estos residuos tan duraderos. Los factores más importantes de este tipo de almacenado son la formación geológica a utilizar (como simas y cuevas) y las barreras artificiales para aislarlo del medio.^[4]



Almacenado de residuos radiactivos en la Waste Isolation Pilot Plant, en Carlsbad (Estados Unidos).

El sistema se encuentra en fase de desarrollo; si bien la mayoría de países con un alto desarrollo nuclear se encuentran en fase de estudio de ubicaciones idóneas, en Nuevo México funciona el único AGP del mundo, el Waste Isolation Pilot Plant, destinado a residuos militares de Estados Unidos.

Almacenamiento submarino

El vertido de residuos radiactivos en los mares fue una práctica habitual desde los años 1950. A finales de la década, hubo varias controversias sobre estos vertidos en las costas de los Estados Unidos por empresas autorizadas por la Comisión de Energía Atómica, y en el Mar de Irlanda a cargo de empresas británicas, y la práctica se incrementó con la proliferación nuclear de los años 1980.

Desde 1993, existen leyes internacionales que prohíben el depósito de residuos de alta actividad en el mar.^[5] A pesar de esta legislación, se estudia la posibilidad de utilizar fosas oceánicas como almacenes en distintas partes del mundo. Se estima que la Fosa Atlántica (parte de la Dorsal mesoatlántica, situada a unos 700 km de las costas de Galicia y de unos 4.000 m de profundidad)^[6] alberga más de 140.000 toneladas de residuos radiactivos, vertidos entre 1967 y 1983.^{[7] [8]}

Accidentes

El almacenamiento de este tipo de residuos en cantidades importantes les convierte en lugares altamente peligrosos, por lo que son objeto de extremas medidas de seguridad. No obstante, a lo largo de la historia se han producido algunos accidentes que han producido fugas radiactivas a la atmósfera.

- Entre 1948 y 1951, se produjeron fugas en un almacén en la Unión Soviética que provocó un vertido al río Tetcha, lo que provocó la evacuación de más de 7.000 personas.^[5]
- El 29 de septiembre de 1957 la planta rusa de Mayak sufrió la explosión de un contenedor que liberó 2.000.000 de curios, lo que provocó la evacuación de 11.000 personas y la muerte de un número indeterminado, siendo el segundo accidente nuclear más grave de la historia de la URSS tras el accidente de Chernóbil.^[5] El biólogo disidente Jaurès Medvedev afirmó en 1978 que



Cartel de entrada a Hanford Site.

este accidente había provocado centenares de muertos, hecho ocultado por el régimen soviético.

- El 20 de abril de 1973, en las instalaciones de Hanford Site, en Estados Unidos, un tanque de residuos dejó escapar 435.000 litros de residuos líquidos altamente radiactivos de cesio, estroncio y plutonio.
- En 1993 se produjeron dos graves accidentes en instalaciones ex soviéticas que ocasionaron las consiguientes fugas radiactivas en los depósitos de Tomsk (en abril) y de nuevo Mayak (en julio), lo que puso en evidencia la seguridad de los depósitos en la antigua URSS.^[5]

Referencias

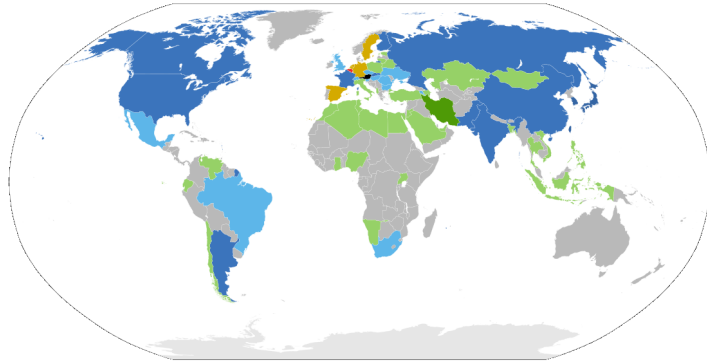
- [1] Consumer « Residuos radiactivos de baja y media actividad (http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/08/02/144187.php)» Consultado el 2 de febrero de 2010
- [2] Enresa « Residuos de Baja y Media Actividad (http://www.enresa.es/actividades_y_proyectos/rbma)» Consultado el 2 de febrero de 2010
- [3] Enresa « Residuos de Alta Actividad (http://www.enresa.es/actividades_y_proyectos/raa)» Consultado el 2 de febrero de 2010
- [4] Universidad de Castilla-La Mancha « Los almacenes de residuos nucleares: Almacenes geológicos profundos (http://www.uclm.es/users/higuera/mga/Tema06/Tema_06_Residuos_4.htm)» Consultado el 2 de febrero de 2010
- [5] NoDo50 « Residuos Radiactivos (<http://www.nodo50.org/panc/Res.htm>)» Consultado el 2 de febrero de 2010
- [6] Corral, pp. 10
- [7] Fundación Giulia Adinolfi « Residuos radiactivos y cierre anticipado (<http://books.google.es/books?id=r7wtrny6M0kC&pg=PA97&dq=Vertido+de+residuos+radiactivos+en+la+fosa+atlántica&cd=2#v=onepage&q=Vertido+de+residuos+radiactivos+en+la+fosa+atlántica&f=false>)» Consultado el 2 de febrero de 2010
- [8] El Correo Gallego « La fosa atlántica en 1982 (<http://edelman-monitoring.es/enresa/pdfs/07-1321.pdf>)» Consultado el 2 de febrero de 2010

Bibliografía

- Corral Suárez, Margarita. *El vertido de residuos radiactivos en la "Fosa Atlántica" y el derecho internacional*. Universidad de Valladolid, 1988. ISBN 84-7762-053-9

Abandono de la energía nuclear

El **abandono de la energía nuclear** es una opción política consistente en dejar de usar la energía nuclear para la generación de electricidad. La idea incluye en algunos países el cierre de las centrales nucleares existentes. Suecia fue el primer país donde se propuso (1980) (este país es el 9º país que más energía nuclear consume del mundo^[1]). Siguió Italia (1987), Bélgica (1999), Alemania (2000) (Alemania es el 4º consumidor mundial de energía nuclear^[1]) y se ha discutido en otros países europeos. Austria, Holanda, Polonia, y España promulgaron leyes que paralizaron la construcción de nuevos reactores nucleares, aunque en algunos de ellos esta opción se está debatiendo en la actualidad (véase imagen). Nueva Zelanda no utiliza reactores nucleares para la generación de energía desde 1984. Teóricamente el abandono de la energía nuclear debería promover el uso de fuentes de energía renovables.



Estado de la política nuclear actual en el mundo. Países sin reactores, construyendo su primer reactor. Países sin reactores, considerando su construcción. Países en funcionamiento, situación estable. Países con reactores en funcionamiento y otros en construcción. Países con reactores en funcionamiento y considerando la construcción de nuevos reactores. Países con reactores, considerando su cierre. Países donde la actividad nuclear civil es ilegal.



Planta nuclear en Grafenrheinfeld, Alemania. Se prevé que todas las plantas nucleares alemanas terminen de operar en 2020.

Argumentos a favor del abandono

Seguridad

Riesgo de accidentes y terrorismo

- Basándose en las estimaciones del Gobierno alemán, (4º Consumidor de energía nuclear) usando la probabilidad de daño al núcleo que se obtuvo en 1980 en los estudios de seguridad de los reactores alemanes de $2.9 \cdot 10^{-5}$ al año, se puede calcular^[2] que el riesgo de una fusión de núcleo en un periodo de 40 años es del 16% para Europa y de un 40% a nivel mundial. Para los nuevos diseños de reactores los estudios probabilísticos de seguridad obtienen valores de entre $5 \cdot 10^{-7}$ y $3 \cdot 10^{-8}$.^[3] Usando estos valores, la probabilidad de que ocurriera un accidente en una central nuclear que conllevara daño al núcleo en las mismas condiciones que ese estudio sería de un 0.3% para Europa o de un 0.9% para el mundo en 40 años. La probabilidad de que ocurrieran dos de estos accidentes en esos 40 años sería de un 0.0005% para Europa y un 0.004% para el mundo.
- Con los datos del estudio alemán, la probabilidad de que uno de estos accidentes ocurra en España sería de un 0.005% como máximo, para una vida útil máxima de 20 años (que es la vida útil que le restaría teóricamente a la más moderna de las centrales nucleares españolas).
- Las consecuencias de un accidente en una central nuclear podrían ser graves. El accidente de Chernobyl fue el accidente nuclear más grave de la historia, el peor caso en las peores condiciones, tanto humanas, morales, idóneas y técnicas con lo cual, no es posible que vuelva a pasar otro Chernobyl. Pero para conocer el mismo, es recomendable consultar el artículo sobre el accidente, donde se ofrecen datos al respecto de los informes más recientes. Las estimaciones de fallecidos hasta el presente van desde los 41 que estiman instituciones reconocidas y mundiales como el OIEA, la OMS y otros hasta decenas o centenares de miles según otros como la antinuclear americana (Greenpeace, y otros como el TORCH, AIMPON). Las estimaciones de muertes debidas al accidente (principalmente debido a un incremento en la incidencia del cáncer) varían también en un rango entre las 4000 y las decenas o centenares de miles.
- Las centrales nucleares pueden ser objetivo de ataques terroristas:
 - La mayoría de las centrales nucleares fueron construidas en las décadas de 1960 y 1970, y al igual que el World Trade Center, fueron diseñadas para resistir el impacto de los aviones más pequeños. David Kyd, portavoz del OIEA, afirmó literalmente en 2001 que "Si se postula el riesgo de un jumbo cargado de combustible, está claro que el diseño no fue concebido para resistir semejante impacto".^[4] Edwin Lyman, Director Científico del Instituto de Control Nuclear de Washington (EE.UU.) señala que "si un avión comercial se estrellase contra una central nuclear, el reactor no explotaría, pero los sistemas de refrigeración podrían resultar destruidos. En tal caso las varillas de combustible nuclear se sobrecalentarían y producirían una explosión de vapor que podría liberar cantidades letales de radioactividad a la atmósfera".^[5] Existen informes de experimentos llevados a cabo por el Instituto de Investigaciones de Energía Eléctrica americano (EPRI) en los que se pusieron a prueba estas afirmaciones, llegando a la conclusión de que una contención como las usadas en las centrales nucleares occidentales resistiría el impacto directo de un avión Boeing 767-400.^{[6] [7]}
 - El mismo doctor Lyman, también miembro de la *Union of Concerned Scientists*, explica que "si un equipo de terroristas bien entrenados consiguiera introducirse por la fuerza en una central nuclear, en cuestión de minutos podría causar suficiente daño para causar la fusión del núcleo y un fallo en la estructura de la contención. Semejante ataque tendría consecuencias devastadoras y duraderas en la salud pública, el medio ambiente y la economía".^[8] David Lochbaum, de la misma organización, añade que "la Comisión Reguladora Atómica



Símbolo tradicional de la oposición a la construcción de centrales nucleares.

(NRC por sus siglas en inglés) exige a las 103 centrales de los EE.UU. que tengan planes de prevención contra el sabotaje de una única persona dentro de la central. Sin embargo, los secuestros (de los aviones del 11-S) fueron obra de entre 3 y 5 terroristas en cada avión, y las regulaciones de la NRC permiten que cientos de personas se encuentren trabajando en centrales nucleares antes de que sus controles de seguridad hayan sido completados".^[5] Estas afirmaciones sin embargo parten del desconocimiento del funcionamiento de una central nuclear comercial, para la que se precisan conocimientos especializados, otorgados solo a un pequeño número de personas anualmente (los operadores de las centrales nucleares)^[cita requerida], y un tiempo considerable para lograr la fusión del núcleo^[cita requerida]. En España por ejemplo, es imposible que haya *cientos de personas trabajando en centrales nucleares antes de que sus controles de seguridad hayan sido completados.*^[cita requerida] De hecho, antes de poder tener acceso autorizado a una de estas instalaciones como trabajador, la instalación solicita una serie de informaciones de cada sujeto entre la que se encuentra un informe de penales.^[9]

- Existe también el peligro de accidentes (o sabotajes) en otras instalaciones relacionadas con el ciclo del combustible nuclear.
- Otro posible riesgo es el transporte por tren de desechos y materiales radiactivos, que suelen atravesar grandes ciudades ^[cita requerida] [10]
- Además existe la posibilidad del desvío de materiales nucleares para la fabricación de armas atómicas con fines terroristas. Este supuesto solo puede darse en aquellos países en los que se posean instalaciones de reprocesamiento del combustible gastado nuclear, como Francia, Reino Unido, EE.UU., Japón y Rusia o bien instalaciones de enriquecimiento de uranio.
- También algunas sustancias radiactivas procedentes de los residuos podrían ser sustraídas por los terroristas para la fabricación de bombas sucias.

Proliferación nuclear

Según los grupos antinucleares, el uso de energía nuclear contribuye a la proliferación de armas nucleares. Israel, India, Corea del Norte y Sudáfrica iniciaron programas "pacíficos" de energía nuclear con reactores para investigación que posteriormente fueron empleados para hacer armas atómicas, y existe la sospecha (apoyada en el hecho de la negativa a una inspección del OIEA) de que el programa de Irán tenga un objetivo similar.

Un arma nuclear puede construirse a partir de:

- Uranio: exige instalaciones de enriquecimiento de uranio. Según Mohamed ElBaradei, Director General del OIEA, "si un país posee instalaciones de enriquecimiento de uranio, en pocos meses podría desarrollar un arma nuclear". [11] [12]
- Plutonio: requiere instalaciones de reprocesamiento, una parte del ciclo nuclear que solo se utiliza en países con un nivel muy alto de tecnología nuclear, como Francia o el Reino Unido. El plutonio es una sustancia de propiedades variables, dependiendo de su origen. Existen varios isótopos distintos, incluyendo el Pu-238, Pu-239, Pu-240, y Pu-241, pero no todos son fisibles: solamente el Pu-239 y Pu-241 pueden fisiónar en un reactor de agua ligera (como la mayoría de los occidentales), siendo el plutonio-239 el preferido como combustible nuclear y para la producción de armas nucleares, porque tiene una tasa de fisión espontánea relativamente baja, así como una masa crítica baja. El plutonio "útil" (mayoritariamente Pu-239) se divide, en función de su contenido de Pu-240, en grados (*súper*: 2-3%; *armamento*: <7%; *combustible*: 7-19%; *reactor*: 19% o superior). El plutonio de "grado de armamento" fue utilizado en la bomba de Nagasaki en 1945 y en muchas otras bombas nucleares. Por otra parte, el plutonio de "grado de reactor" (tal como habitualmente se produce en todos los reactores para energía nuclear comerciales) contiene hasta un 40% de los isótopos más pesados de plutonio, especialmente Pu-240, debido a que ha permanecido en el reactor por un período relativamente largo. Sin embargo la distinción de grados es un tanto arbitraria: los grados de combustible y de reactor son menos apropiados para construir armas nucleares, pero no inservibles para tal propósito (aunque los resultados son menos predecibles). El Ministerio de

Energía de EE.UU. (en inglés: *U.S. Department of Energy*) ha confirmado que en 1962 su país realizó con éxito una prueba atómica con plutonio de grado de reactor.^[13]

Medio ambiente y salud

Residuos radioactivos

- Según los grupos antinucleares no existe una solución satisfactoria a la generación de residuos nucleares, que permanecen radiactivos durante decenas de miles de años y constituyen el mayor problema de la energía nuclear. Algunos países extraen el plutonio (y otros isótopos útiles) de las barras de combustible en el Centro COGEMA de La Hague (en Francia) o en Sellafield (Reino Unido), que son las únicas plantas de reprocesado existentes en Europa. Ambas plantas vierten cantidades enormes de desechos radiactivos al mar:
 - La planta de Sellafield vierte unos 8 millones de litros de desechos radiactivos cada día en el Mar de Irlanda.^[14] Este mar presenta uno de los índices de contaminación radiactiva más altos del planeta^[cita requerida]. Los niveles de contaminación en el área alrededor de Sellafield son superiores a los de la zona de exclusión de Chernobyl^[cita requerida]. La leucemia infantil es unas diez veces más frecuente en la zona que en el resto del Reino Unido.^{[15] [16]} En dos pequeños pueblos del Estrecho de Menai (norte de Gales) se han detectado 43 casos de cáncer infantil, lo que supone 15 veces más que la media británica.^[17]
 - El centro de La Hague vierte anualmente cientos de miles de metros cúbicos de desechos radiactivos en el Canal de la Mancha. La contaminación se extiende por el Mar del Norte y se puede medir incluso en el Océano Glacial Ártico. El riesgo de padecer leucemia infantil es en las cercanías del centro tres veces superior a la media de Francia.^[18]
- Una de las soluciones existentes técnicamente viables para deshacerse de los residuos radiactivos denominados "de alta actividad" (los únicos que permanecen siendo muy radiactivos más de 300 años) consiste en enterrarlos en almacenamientos geológicos profundos (AGP).
- Existen otras soluciones en desarrollo para eliminar el volumen de residuos de alta actividad que quedaría tras su reprocesado. El más avanzado hasta la fecha es la transmutación.

Emisiones de radioactividad

- En su funcionamiento rutinario, las centrales nucleares emiten material radiactivo al medio ambiente: emisiones gaseosas radiactivas por la chimenea construida al efecto y emisiones líquidas radiactivas al mar, al embalse o al río del que depende para su refrigeración. Las emisiones rutinarias generan niveles muy bajos de dosis^[cita requerida], debido a los tratamientos previos a su vertido y a la dilución producida tanto en la atmósfera como en los medios acuáticos. Sin embargo varios estudios indican que esos niveles de dosis podrían ser nocivos para la salud:
 - Estudios de 1999 y 2001 del Instituto de Salud Carlos III^[cita requerida] detectaron también la existencia de una tasa inesperadamente más alta de cáncer de estómago en personas de ambos sexos en el entorno de la central nuclear de Garoña. Este incremento, ligado a la proximidad a esta instalación, se produjo en el periodo posterior al inicio de actividad de la central nuclear, tras comparar con la situación anterior a su entrada en funcionamiento.
 - En un estudio del mismo instituto de julio de 2001 se constató que la mortalidad por cáncer de pulmón mostró un mayor incremento en las áreas en el entorno de 30 km en la vecindad de las instalaciones del ciclo del uranio. En el estudio se señala que No aparece un patrón bien definido en la vecindad de las centrales nucleares estudiadas.^[19] Este estudio señala la necesidad de estudios más específicos.



- En julio de 2003 fue publicado en la revista *Occupational & Environmental Medicine* un estudio epidemiológico realizado por científicos de la Universidad de Alcalá de Henares y el Hospital Universitario de Guadalajara en el cual se concluye que el riesgo de sufrir cáncer se incrementa linealmente con la proximidad a la central nuclear de Trillo, pero no en la proximidad de la central nuclear de Zorita, y que el riesgo de padecer un tumor es un 71% superior en el entorno más cercano a la primera central nuclear (en un radio de 10 km alrededor de ésta) que en el área situada entre 10 y 30 km de distancia a la central.^[20]
- Otros estudios sin embargo señalan lo contrario.
 - Así el *Committee on Medical Aspects of Radiation on the Environment* (COMARE), realizó en 2005 un estudio completo de todas las centrales nucleares en el Reino Unido acerca de la incidencia de cáncer en niños.^[21] Su principal conclusión indica que: [Estudiada] la incidencia de cáncer infantil en la vecindad de todas las plantas de producción nuclear en Gran Bretaña [...] no se encuentra evidencia de un incremento en el número de casos en cualquier área de 25km, que pueda incluir tanto la exposición primaria a descargas radiactivas como las secundarias debidas a la resuspensión de materiales.
 - El *Instituto Nacional del Cáncer* americano obtuvo similares resultados^[22] en 1991. Señalando que un estudio realizado por este instituto no muestra un incremento general del riesgo de muerte debido al cáncer para las personas que viven en 107 condados de EE.UU. que contienen o que están adyacentes a 62 instalaciones nucleares.
 - Un estudio del Centro Nacional de Epidemiología (dependiente del Instituto de Salud Carlos III del Ministerio de Sanidad) de 1999 asevera que Ninguna de las plantas registra un exceso en el riesgo de mortalidad inducida por leucemia en ninguna de las áreas circundantes[...] ninguno de los tumores estudiados mostraron evidencia de un incremento en el riesgo. Este estudio se publicó en el número de octubre de la revista *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*.^[23]

Emisiones de CO₂ y efecto invernadero

La energía nuclear puede ayudar a cumplir los acuerdos del Protocolo de Kyoto ya que no provoca emisiones de CO₂. Sin embargo sí se emite cierta cantidad de CO₂ durante el ciclo de obtención de combustible nuclear y durante la construcción y desmantelamiento de las centrales nucleares. Un estudio del Instituto Öko de Alemania muestra que, teniendo en cuenta el ciclo completo de generación de energía (incluyendo la construcción y desmantelamiento de las centrales eléctricas), la energía nuclear emite unos 34 gramos de CO₂ por cada kWh de electricidad producido. Esto es mucho menos de lo que emite una central térmica de carbón (que emite alrededor de 1000 g/kWh). La energía eólica, por ejemplo, emite alrededor de 20 g/kWh, y la hidroeléctrica alrededor de 33 g/kWh.^[24] Otros estudios estiman las emisiones de CO₂ debidas a la energía nuclear entre 30 y 60 g/kWh.^{[25] [26]} A nivel mundial, el CO₂ emitido en la producción de energía eléctrica no es más que el 9% del total anual de emisiones de gases de efecto invernadero de origen humano,^[27] siendo el transporte el gran productor de estos gases.

Para producir un efecto notable en la reducción de emisiones de CO₂ se requeriría construir 2000 nuevos reactores de gran tamaño (1000 MW) en todo el mundo.^[28] En EE.UU. serían necesarios entre 300 y 400 nuevos reactores en los próximos 30-50 años, incluyendo los necesarios para reemplazar aquellos que se retiren del servicio durante ese periodo.^[29] El uranio no es un recurso renovable y esta opción exigiría consumir las reservas mundiales mucho más rápidamente. Las reservas actuales son suficientes para 50 años de producción de energía nuclear mediante el consumo de uranio 235, al ritmo de consumo actual^[cita requerida]; si se reemplazase todo el combustible fósil en la producción de energía eléctrica por energía nuclear, las reservas de uranio se agotarían en tres o cuatro años.^{[30] [31]} Sin embargo existen alternativas nucleares en desarrollo, como el uso del isótopo más abundante del uranio (el 238, unas 1400 veces más abundante que el 235), el torio (su isótopo 232), 20000 veces más abundante o la fusión.^[cita requerida] Además, el agua de mar contiene cantidades de uranio incontables, pero no es rentable utilizarlas hoy en día a comparación del uranio en minas que es muy económico.

Razones económicas

- Otro argumento aducido es el alto costo de la energía nuclear. Según este argumento la energía nuclear sólo ha sido capaz de sobrevivir gracias a los subsidios públicos. El Consejo Mundial para las Energías Renovables estima que la industria nuclear ha recibido alrededor de 1 trillón de dólares (corregidos al valor actual) de dinero público en todo el mundo, mientras que el conjunto de las energías renovables no ha recibido más que unos 50.000 millones de dólares.^[32] Hoy en día la generación de electricidad mediante energía nuclear es más cara que la eólica, comparable en precio a la hidroeléctrica y a la cogeneración con madera gasificada, pero más barata que la fotovoltaica^[24] y que las térmicas que consumen combustibles fósiles (incluidas las de ciclo combinado). Sin embargo los costes de las energías renovables están disminuyendo rápidamente gracias al progreso en el incremento de la eficiencia y reducción de costes.^[33] El estudio europeo "Externe",^[34] dedicado a los costes externos asociados a las tecnologías de producción eléctrica todos los componentes indirectos (llamados externalidades), afirma que sólo la energía eólica tiene menores costes externos que la nuclear, y que la energía hidroeléctrica tiene costes menores o mayores, dependiendo del país. El resto de sistemas de producción eléctrica tendría siempre mayores costes externos.
- El coste de la gestión de los residuos radiactivos en España (que se paga a través de la tarifa eléctrica y por las empresas que precisan sus servicios, ya sean eléctricas, hospitales, laboratorios de investigación, etc^[35]), según los cálculos de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A. en su 6º Plan General de Residuos Radiactivos, será de cerca de 13.800 millones de euros. Este cálculo se extiende hasta el año 2070, y no incluye los costes ni ingresos de años posteriores (la radiotoxicidad de los residuos se mantiene durante decenas de miles de años).
- En Alemania es el Estado quien paga los costes derivados de los residuos directos (barras de combustible gastadas)^[cita requerida], materiales contaminados en las plantas de energía y por la extracción del plutonio y uranio, así como por otros residuos radiactivos, como los generados en hospitales o universidades, y por los costes de almacenaje de estos residuos, puesto que *la industria carece de suficientes fondos para hacerlo*^[cita requerida].
- Los costes de construcción de las centrales nucleares ha sido tradicionalmente mucho más alto de lo estimado. En EE.UU., un estudio de 75 de sus reactores nucleares muestra que sus costes construcción fueron más del 322% de lo presupuestado.^[36] También en la India, el país con la experiencia más reciente en construcción de reactores nucleares, sus últimas 10 instalaciones han sobrepasado su presupuesto en una media del 300%.^[36] Parte del incremento de los costes de construcción se debe al aumento de tiempo necesario para la misma: de los 66 meses de media requeridos a mediados de los 70 se ha pasado en la práctica a una media de 82 meses (casi 7 años) entre los años 2000 y 2005.^[36]
- El coste de desmantelamiento de las centrales nucleares ha demostrado^[37] ser mucho más elevado de lo previsto. Por ejemplo, el desmantelamiento de la central de Yankee Rowe (Massachusetts, EE.UU.) costó unos 450 millones de dólares, en comparación con los 120 millones previstos inicialmente. Aunque hasta ahora han sido pocas las plantas desmanteladas, en los próximos años muchas alcanzarán el final de sus vidas previstas, y deberán ser desmanteladas.
- Según el Secretariado de la Conferencia Internacional de Energías Renovables de 2004, la nuclear es la fuente de energía que menos empleo genera por unidad de energía producida. Menos que cualquier energía renovable.^[38] Pero también es cierto que es algo propio de la tecnología, hay más obreros disponibles y además los utilizados son de alta capacidad intelectual con lo cual al ser un sueldo no tan bajo, el PBI tampoco decrece, es decir, que favorece la ocupación intelectual, que es la más elevada de las ocupaciones y poco valorada, gracias a la cual existen las computadoras.
- Está excluida de los mecanismos financieros del Protocolo de Kioto, que impone penalizaciones a las empresas emisoras de gases de efecto invernadero, ya que la energía nuclear los genera de forma indirecta. Esta decisión se concretó en julio de 2001, en la Cumbre de Bonn del Convenio Marco de Protección del Clima.

- Las plantas de energía nuclear no pueden ser aseguradas sólo por aseguradoras privadas. En 2005, el importe máximo de un seguro para una planta nuclear en EEUU era de 300 millones de dólares. Los costes de un posible accidente nuclear grave podrían ser mucho mayores, por lo que se estableció un fondo (llamado fondo Price-Anderson), que es financiado por las propias empresas, que cubriría cualquier exceso de dichos 300 millones de dólares (en 2006 dicho fondo era de 9500 millones de dólares).^[39] En el caso de España, según un borrador del Anteproyecto de Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares,^[40] que refleja los convenios internacionales que regulan esta actividad, las empresas gestoras de centrales nucleares deben establecer una cobertura de responsabilidad civil por valor de 1200 millones de euros, pero las aseguradoras que operan en el país (al igual que en otros) no disponen de capacidad suficiente para prestar la garantía, por lo que la tarifa eléctrica deberá cubrir dicha garantía para los daños no asegurables, que finalmente resultaría en el pago de una prima al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.^[40]
- Según la revista de negocios norteamericana Forbes, "el fracaso del programa nuclear de Estados Unidos se considera como el mayor desastre empresarial en la historia de los negocios".^[41]
- El Banco Mundial afirma que "otorgar un préstamo bancario al sector energético requiere una revisión de las políticas, las instituciones y las inversiones del sector. Las centrales nucleares en el sector energético no son económicas; son un enorme despilfarro".^[42]

Recurso no renovable

- El uranio-235 es un recurso limitado. Según los estudios disponibles (como la última edición del *Libro Rojo de la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE*) las reservas de uranio-235 fisionable, uno de los combustibles de los reactores nucleares, alcanzarán sólo para unas pocas décadas más, aún considerando niveles de consumo como los actuales (hoy en día, cincuenta años después de su nacimiento, la energía nuclear cubre tan sólo el 7% de las necesidades energéticas mundiales, mientras que el petróleo alcanza hasta el 80% en la mayor parte de los casos). Sin embargo existen alternativas al U-235:
 - Usar el plutonio que fue elaborado para la fabricación de armamento en los combustibles MOX con un contenido de entre un 3 y un 10% de plutonio.
 - Usar el U-238 en reactores rápidos. Los reactores rápidos que se han construido hasta ahora han sido cerrados.
- Su precio también aumenta rápidamente. En 2005 era cinco veces más caro que en 2002.^[43] Según el Libro Rojo de la Agencia de la Energía Nuclear de la OCDE, las reservas conocidas y recuperables a un coste inferior a los 80 dólares y a los 130 dólares (por kilogramo de uranio) son de unos 3 y 4 millones de toneladas respectivamente, es decir, menos de la mitad del que se entiende necesario para satisfacer las demandas de la industria nuclear.
 - Hay más uranio en la Naturaleza, pero su coste de extracción sería aún mayor y, lo que es más importante, su obtención será mucho más intensiva en energía fósil, con la consiguiente generación de CO₂. Hay estudios que indican que, usando uranio de menas de riqueza inferior a 100 ppm se emite más dióxido de carbono del que se emitiría generando la misma electricidad usando gas natural.^[30]

Existencia de alternativas

- Según los detractores de la energía nuclear, existe una solución eficaz al cambio climático: un modelo energético sostenible cuyo eje fundamental sean las energías limpias (renovables junto con tecnologías de ahorro y eficiencia). Aplicadas en todos los ámbitos -generación de electricidad, transporte, consumo doméstico...- pueden lograr reducir de forma efectiva, las emisiones de CO₂. Algunos estudios indican que las inversiones dirigidas a promover la eficiencia energética son siete veces más efectivas que las dirigidas a la energía nuclear a la hora de evitar emisiones de CO₂ ^[cita requerida].
- Según algunos grupos la energía nuclear es prescindible. Los casos de Alemania y Suecia (4º y 9º consumidores de energía eléctrica de procedencia nuclear a nivel mundial) parecen indicar que, si hay voluntad política, es posible abandonar la energía nuclear al tiempo que se reduce el aumento de las emisiones de CO₂ en

cumplimiento de las obligaciones contraídas con el Protocolo de Kyoto. Este argumento parece estar siendo rebatido por los hechos, ya que en realidad estos países se comienzan a replantear su política de abandono de esta alternativa al no haber encontrado un método de suplir la energía que producían estas instalaciones^[cita requerida].

- Por el contrario, Francia, un país que ha apostado por la energía nuclear para la generación de electricidad (tiene 59 centrales nucleares, y más del 75% de su electricidad es de origen nuclear) no está cumpliendo con sus compromisos con el Protocolo de Kyoto.^[44] Está alejándose cada vez más del objetivo acordado (incremento del 0% para el periodo 2008-2012) y ello es debido fundamentalmente al crecimiento de las emisiones de CO₂ en el sector transporte, absolutamente dependiente del petróleo. La solución a la dependencia a los combustibles fósiles, para ciertos grupos, está en otras medidas: como el desarrollo del transporte colectivo, la ordenación del territorio, la gestión ecosocial de la movilidad, el uso de los biocombustibles, un aumento de la eficiencia en los motores, o la promoción de la bicicleta.
- En España, por ejemplo, hay un enorme potencial sin aprovechar en la eficiencia energética y en las energías renovables (según un estudio realizado para Greenpeace por el Instituto de Investigaciones Tecnológicas,^[45] en España las renovables podrían cubrir con su máximo desarrollo toda la demanda de energía prevista para el año 2050 y unas 56 veces la demanda de electricidad). En España hay un exceso de potencia eléctrica instalada que permitiría hacerlo sin sufrir problemas de suministro^[46] *[cita requerida]*. España es el segundo país con mayor potencia renovable instalada del mundo: produjo 53.565 GWh (de los cuales 29.978 provinieron de hidroeléctricas) en el año 2004 frente a 63.153 GWh de producción nuclear en el mismo año.

Argumentos contra el abandono

Protección ecológica y contra los gases invernadero

- Recientemente se ha producido un interés renovado en la energía nuclear como solución al agotamiento de las reservas petrolíferas y al calentamiento global ya que la demanda de electricidad está incrementándose y la energía nuclear no genera directamente gases de efecto invernadero, en contraposición a las alternativas habituales tales como el carbón. Sin embargo, la minería, el proceso de uranio, el transporte de piezas y combustible, el desmantelamiento y tratamiento de los residuos sí implican emisiones de gases de efecto invernadero. Según la Asociación Nuclear Mundial las emisiones que proceden del ciclo completo de la vida de una central nuclear son comparables a las de la energía eólica y mucho menores que cualquier otro sistema de generación de electricidad.^[47]
- Alemania ha combinado el apagado con una iniciativa para la energía renovable y quiere incrementar la eficiencia de las plantas de energía fósil en un esfuerzo para reducir su dependencia del carbón. De acuerdo con el ministro alemán Jürgen Trittin, en 2020, esto reducirá en un 40% las emisiones de dióxido de carbono en comparación con los niveles de 1990. Alemania se ha convertido en uno de los líderes en los esfuerzos por cumplir con el protocolo de Kyoto. Los críticos con la política alemana han destacado la supuesta contradicción entre abandonar la energía nuclear y las instalaciones de energía renovable, cuando ambas tienen muy bajas emisiones de CO₂. Por el momento Alemania es el 4º país consumidor de energía eléctrica nuclear del mundo.
- También se aduce que los reactores nucleares, así como otros tipos de plantas de energía, elevan la temperatura de los ríos que se utilizan como refrigeración, lo que supone un peligro para la salud de los peces en determinados ecosistemas. Esta amenaza se reduce mediante el uso de torres de refrigeración, que se sitúan en lugares donde el calentamiento adicional se estima inaceptable.
- Todos los residuos radiactivos son clasificados, envasados y almacenados (debido a su peligrosidad), en comparación con otras fuentes como el carbón o el petróleo, cuyos vertidos se emiten directamente al entorno.
- Los residuos nucleares pierden su radioactividad con el paso del tiempo. Después de 50 años, el 99,1% de la radiación ya ha sido emitida,^[48] lo que presenta un fuerte contraste con el arsénico, el azufre y otros elementos químicos que son estables y existirán para siempre, y que son liberados al quemar carbón.^[49] ^[50] A pesar de ser

muy controvertido, los defensores de la energía nuclear mantienen que la solución del enterramiento para los residuos está muy probada. Así se señala el ejemplo natural de Oklo, reactor nuclear natural, en el que tales residuos han estado almacenados durante aproximadamente 2 mil millones de años con una contaminación mínima del ecosistema circundante. Los residuos nucleares se generan en un volumen pequeño, siendo menos del 1% de los residuos tóxicos en los países industrializados. En ciertos países el 96% de los residuos nucleares podrían ser reciclados y reutilizados, si los riesgos adicionales de proliferación fueran aceptables.^[51]

- De acuerdo con los grupos antinucleares, los escapes de contaminación radioactiva cuestionan en general la seguridad de las plantas de producción nucleares. También se sostiene que las plantas de energía nuclear son un peligro para la salud. Para conocer estos riesgos todos los operadores de instalaciones nucleares están obligados a efectuar mediciones de radiación en y alrededor de sus emplazamientos así como a informar de todas las partículas y radiación que emiten, debiendo ser certificados por la autoridad reguladora (el CSN en el caso español). Esta práctica es más o menos la misma en todos los países que son miembro del OIEA. En caso que existan emisiones significativas, esto es por encima de los límites prescritos por la NCRP, y siendo obligatorio para los miembros del OIEA, se debe informar al OIEA y asignársele una calificación INES de 5 o superior, lo cual es muy raro. Todas las instalaciones de los países miembros del OIEA son comprobadas con regularidad. Además todos los operadores están obligados a poner todas las medidas a disposición del público. Como promedio una persona que viva cerca de una planta nuclear recibirá de ella un 1% del total de radiaciones naturales, lo que se encuentra dentro de los límites de seguridad.^{[47] [52]}
- En Gran Bretaña, estudios llevados a cabo por el Comité sobre Aspectos Médicos de la Radiación en el Medio Ambiente (COMARE, por sus siglas en inglés) en 2003, no hallaron ninguna evidencia de incremento de cáncer infantil alrededor de las plantas nucleares. Sí encontraron un exceso de leucemia y linfomas no-Hodgkins (NHL) cerca de otras instalaciones nucleares entre ellas las plantas de: AWE Burghfield, UKAEA Dounreay y BNFL's Sellafield. El COMARE ha afirmado que es improbable la vinculación con los materiales nucleares, pero admite que "el exceso alrededor de Sellafield y Dounreay no parecen deberse a la casualidad, a pesar de que no hay actualmente ninguna explicación convincente".

Independencia energética

- Según los partidarios de la energía nuclear, en algunas naciones desarrolladas, como es el caso de España, no existen alternativas viables. En palabras de los franceses: "No tenemos carbón, no tenemos petróleo, no tenemos gas natural, no tenemos elección". Un estudio de Greenpeace defiende que, en España, las fuentes renovables podrían generar mucha más energía de la que se consume.^[45]
- Los críticos con el apagado afirman que la energía producida por las plantas de energía nuclear no podría ser compensada, prediciendo una crisis energética o indicando que únicamente el carbón podría compensar la energía nuclear con el consiguiente incremento de las emisiones de CO₂ y el necesario incremento de las importaciones de carbón o de petróleo. La energía nuclear no se ha visto afectada por los embargos internacionales, ya que el mineral de uranio se importa desde países políticamente estables, como Australia o Canadá, a diferencia de los grandes proveedores de petróleo, carbón o gas natural, donde están incluidos países de Oriente Próximo y las nuevas Repúblicas procedentes de la antigua Unión Soviética.
- Además, el Uranium Information Center defiende que la energía nuclear tiene mejor rendimiento de energía sobre su inversión (EROI en inglés). Realizando un análisis del ciclo de vida, se requieren 5 meses de producción de energía para reembolsar la inversión energética inicial.^[53] Los defensores también argumentan que es posible un relativamente rápido incremento del número de instalaciones. Los nuevos diseños de los reactores tienen un período de construcción de tres a cuatro años.^{[54] [55]}

Economía

- Un argumento para los defensores de la energía nuclear es la economía energética. Los defensores de la energía nuclear afirman que se trata de una energía económicamente competitiva y un modo de producir energía amistoso con el entorno, en contraposición a los combustibles fósiles. También afirman que en algunos lugares, especialmente donde las minas de carbón están lejos de las plantas, la energía nuclear es más barata, aunque en otros casos es aproximadamente equivalente o más cara. Las mismas comparaciones pueden hacerse con el gas y con el petróleo ^[cita requerida].
- Un estudio del Instituto Tecnológico de Massachusetts de 2003^[56] concluye que la opción nuclear debería mantenerse porque es una importante fuente de generación eléctrica libre de dióxido de carbono. También indica que, en las condiciones actuales, la energía eléctrica de origen nuclear no es competitiva frente al uso de combustibles fósiles. El estudio indica varias alternativas en las que esta energía sería competitiva frente a la quema de esos combustibles fósiles, por ejemplo cargando un impuesto a las emisiones de gases contaminantes, reduciendo los gastos de construcción en un 25%, los costes operativos y de mantenimiento en más de un 25%, acortando los plazos de construcción de las centrales de 5 años (cifra considerada ya "optimista" en el informe) a 4 años o alcanzando un entorno en el que las condiciones de financiación de las nucleares sea equiparable a las de carbón. Según Greenpeace, se requiere unos 7 años de media.^[36] Sin embargo los fabricantes de las centrales aseguran que la construcción de las centrales de nueva generación se encuentra en torno a 3-4 años de construcción (p.ej. AP-1000 3 años, EPR y CANDU 3.5 años).^{[54] [55]}
- Además, según el proyecto europeo Externe, la energía nuclear tiene uno de los más bajos costes externos, es decir costes al medio ambiente y a las personas. No están incluidos en el precio pero son pagados por la sociedad y estarán parcialmente incluidos por el protocolo de Kyoto. En el Reino Unido, por ejemplo, los costes externos nucleares, son de un cuarto de céntimo de euro por kWh, lo que es un poco más que para la energía eólica que está tarifada a 0,15 céntimos de euro por kWh, pero considerablemente menos que para el carbón que se sitúa de 4 a 7 céntimos de euro por kWh, para el petróleo (3 a 5 céntimos de euro por kWh), para el gas: 1 a 2 céntimos de euro por kWh y para biomasa: 1 céntimo de euro por kWh. En otras naciones europeas la situación es más o menos similar.^[57]
- Además, el coste de muchas energías renovables, se incrementaría si se incluyeran las necesarias fuentes de respaldo dada su naturaleza intermitente. Se ha calculado que la energía eólica, por ejemplo, tiene un coste de tres veces más que la media de la electricidad en Alemania^[cita requerida]. Aunque en muchos países la energía nuclear es impopular, en las épocas en la que crecen los precios del petróleo, los argumentos para la energía nuclear vuelven a plantearse.

Niveles de seguridad

- Los defensores de la energía nuclear mantienen que las plantas de energía nuclear son seguras y están protegidas contra los ataques terroristas o militares. Los edificios de contención están fuertemente reforzados y extremadamente protegidos.
- Estos también sostienen que el accidente de Chernobyl fue un caso único que sólo pudo ocurrir por la combinación de un diseño deficiente del reactor y la realización de unas pruebas no autorizadas. Los reactores del tipo de Chernobyl no poseen edificios de contención que protejan el reactor de ataques exteriores ni a las personas del exterior de posibles accidentes nucleares. Esto es diferente en los reactores occidentales, que son los de diseño más extendido. En el accidente de Three Mile Island no se liberaron cantidades significativas de partículas radioactivas (aunque en realidad se estima que el accidente causó una emisión de gas radiactivo equivalente a 2,5 millones de curios). Esto se debió principalmente a la existencia de la contención del reactor de esta central nuclear, no existente en la central de Chernóbil.
- Igualmente remarcan el elevado nivel de seguridad para los trabajadores en esta industria. En los reactores nucleares se produjeron 8 muertes debidas a descargas eléctricas, número significativamente más bajo que los

accidentes producidos en la industria del carbón (342), del gas natural (85), o de la hidroeléctrica (883).

Países que han tomado alguna opción hacia el abandono

Bélgica

La legislación Belga de abandono fue aprobada en julio de 1999 por los partidos liberales (VLD y MR), los socialistas (SP.A y PS) y los partidos verdes (Groen! y Ecolo). La ley prevé que los siete reactores nucleares del país cierren después de 40 años de operación (que es la vida de diseño de una central nuclear), y prohíbe la construcción de nuevas centrales. Cuando la ley fue aprobada, se especuló acerca del futuro de la misma bajo un gobierno no asociado al partido verde.

En 2003 resultó elegido un nuevo gobierno sin los verdes. En septiembre de 2005 se revocó parcialmente la decisión alargando en 20 años adicionales el periodo de abandono, con la posibilidad de nuevas prórrogas posteriores. Aún se desconoce si se construirán nuevas instalaciones nucleares. La razón que se planteó para revocar la decisión de la parada de los reactores belgas fue la imposibilidad del reemplazo de la electricidad que en este momento se genera mediante centrales nucleares con energías alternativas^[cita requerida], siendo las únicas alternativas prácticas el empleo masivo de nuevas centrales térmicas de petróleo o carbón o la compra de electricidad a otros países. La primera de las opciones no parece factible debido a las restricciones que impone el protocolo de Kyoto, mientras que la segunda tiene unos costes asociados mayores que la continuación del uso de las propias centrales nucleares belgas.

En julio de 2005 el *Bureau Nacional de Planificación* publicó un informe que señala que el petróleo y otros combustibles fósiles generan el 90% de la energía utilizada en el país, mientras que la energía nuclear genera el 9% y la energía renovable el 1%. Debe notarse que sólo el 19% de la energía total consumida es eléctrica (el resto se consume en el transporte), y que en ciertas zonas de Bélgica como Flandes la energía nuclear proporciona hasta más del 50% de la energía eléctrica a los hogares y empresas. Esta fue la principal razón planteada para la extensión del plazo para el abandono de la energía nuclear, ya que era imposible alcanzar el 50% de la generación de electricidad mediante el uso de energías renovables, y el uso de combustibles fósiles acarrearía la imposibilidad del cumplimiento del protocolo de Kyoto.

Se estima que en un lapso de 25 años la energía renovable se incrementará como máximo en un 5%, debido a los altos costes asociados. El plan actual del gobierno belga prevé el cierre de las plantas nucleares para el 2025. Ese informe creó cierta preocupación en relación con los gases que causan el efecto invernadero y la sostenibilidad del sistema.^[58] En agosto de 2005, el Grupo Suez de Francia ofreció comprar Electrabel de Bélgica, que opera los reactores nucleares. A finales del 2005 Suez poseía el 98.5% de las acciones de Electrabel. A comienzos del 2006 Suez y Gas de Francia anunciaron su fusión.

Alemania

En 2000 el gobierno alemán, formado por el SPD y la alianza '90/los verdes, anunció oficialmente sus intenciones de abandonar la energía nuclear. Jürgen Trittin (de los verdes alemanes) como *Ministro de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear*, alcanzó un acuerdo con las compañías de energía para la parada gradual de los 19 reactores nucleares que posee el país, y el cese del uso civil de la energía nuclear para el año 2020. Basado en los cálculos de 32 años del tiempo habitual de operación de los reactores, el acuerdo estipula de forma precisa cuánta energía se permite generar a una planta antes de su cierre.

Los reactores en Stade y Obrigheim fueron cerrados el 14 de noviembre de 2003 y el 11 de mayo de 2005 respectivamente. El comienzo de su desmantelamiento está programado para 2007. No se descarta que los reactores pudieran ser puestos de nuevo en funcionamiento por el recientemente elegido gobierno liderado por el partido Unión Demócrata.

Los activistas anti-nucleares critican el acuerdo puesto que creen que es más una garantía de operación que un abandono de la energía nuclear. También argumentan que el tiempo límite para el abandono de la energía nuclear es

demasiado extenso, y que el acuerdo prohíbe solamente la construcción de plantas nucleares comerciales, y no es aplicable a las centrales nucleares de uso científico, que desde entonces han comenzado su operación, ni a las instalaciones para el enriquecimiento de uranio. Más aún, no se prohibió inmediatamente el reprocesado de combustible nuclear, sino que se permitió hasta mediados del 2005.

Una nueva ley para las fuentes de energía renovable creó un nuevo impuesto de apoyo a las energías renovables. El gobierno alemán, que declara que la protección del clima es un asunto clave de su política, anunció un objetivo de reducción de las emisiones de CO₂ en un 25% en comparación con las de 1990. En 1998 el uso de energías renovables alcanzó los 284 PJ de demanda energética primaria, que corresponde a un 5% de la demanda eléctrica total. Para 2010 el gobierno plantea alcanzar el 10%.

Los activistas anti-nucleares argumentan que el gobierno alemán ha apoyado el uso de la energía nuclear dando garantías financieras a los suministradores. También plantean que hasta el momento no existen planes para el almacenamiento final de los residuos nucleares. Y opinan que endureciendo las regulaciones en seguridad e incrementando los impuestos podría haberse forzado un abandono más rápido de la energía nuclear. También se plantea que el cierre se ha realizado a costa de concesiones en cuestiones de seguridad al deber transportar los residuos nucleares a lo largo de toda Alemania. Este punto ha sido desmentido por el ministro de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear.

Los críticos de los planes de abandono de la energía nuclear en Alemania argumentan que las centrales nucleares no podrán ser compensadas, y predicen una crisis energética, o aducen que solo el carbón o el petróleo podrían compensar la energía nuclear, incrementando de forma tremenda las emisiones de CO₂. Además deberían crecer las importaciones de electricidad, que se realizarían de forma irónica de energía nuclear generada en Francia o de gas natural ruso, que algunos no perciben como un suministrador seguro.^[59] Debido a los crecientes precios de los combustibles fósiles florecieron discusiones acerca de un *abandono del abandono*. En las elecciones federales de 2002 el candidato para canciller de la CDU/CSU, Edmund Stoiber, prometió cancelar los planes de abandono de la energía nuclear, en caso de ganar. En las elecciones federales de 2005 ganó Angela Merkel, candidata de la CDU y actual canciller, que ha anunciado negociar con las compañías de energía el tiempo límite para el cierre de los reactores nucleares. La *batalla* sobre la energía nuclear que fue planteada como un elemento clave en la colisión entre el CDU y el SPD se decidió a favor del abandono.

A principio de 2008, las encuestas muestran una actitud favorable de los alemanes acerca del mantenimiento de la energía nuclear (54% de los encuestados).^[60] La Canciller Merkel afirma que "en cuanto sea posible, hemos de reevaluar la decisión de abandonar la energía nuclear".^[61]

Italia

El abandono de la energía nuclear en Italia comenzó un año después del accidente de Chernobyl en 1986. Tras un referéndum en 1987 se decidió cerrar las cuatro centrales nucleares de producción eléctrica, cerrándose la última en 1990. Además, la moratoria de construcción de nuevas centrales nucleares, que originalmente tenía efecto de 1987 a 1993, se extendió finalmente de forma indefinida.

Italia es un importador neto de energía primaria, importando todo el petróleo, gas, carbón y electricidad de países extranjeros.

En 2006 Italia es importador de electricidad de generación nuclear, y su mayor empresa eléctrica ENEL SPA invierte en reactores nucleares en Francia y Eslovaquia para que puedan proveerle de electricidad en el futuro, además de que forman parte del desarrollo de la tecnología del EPR.

El abandono continúa siendo un asunto vivo en la política italiana. El Ministro Italiano de Medio Ambiente, Altero Matteoli, anunció en octubre de 2005 el interés del uso de la energía nuclear como fuente principal de energía en unos 10-15 años^[cita requerida].

Países Bajos

En 1994 el Parlamento votó su abandono tras una discusión sobre la gestión de los residuos nucleares. La planta eléctrica en Dodewaard fue apagada en 1997. En 1997 el gobierno decidió finalizar la licencia de operación de la central nuclear de Borssele a finales del 2003.

En 2003 el apagado fue pospuesto por el gobierno conservador hasta 2013.

En 2005 la decisión fue revocada y se inició una investigación sobre la expansión del uso de la energía atómica. Esta revocación fue precedida por la publicación de un reportaje sobre energía sostenible de la CDA (principal partido de la coalición de gobierno, democristiano). Otros partidos políticos la apoyaron en ese momento.

En el 2006 el gobierno decidió que Borssele permanecería abierta hasta el 2033, mientras pueda cumplir con normas de seguridad incrementadas. Los propietarios, Essent y Delta invertirán junto al gobierno 500 millones de euros en energía sostenible, dinero que el gobierno dice que de todos modos deberían haber pagado a los propietarios de las centrales como compensación.

Filipinas

En Filipinas, en 2004, la Presidenta Gloria Macapagal-Arroyo definió su política energética. Quería incrementar las reservas nacionales de petróleo y gas mediante exploraciones, el desarrollo de las fuentes de energía alternativas, reforzar el desarrollo del gas natural como combustible y el coco diésel como combustible alternativo. También el establecimiento de colaboraciones con Arabia Saudí, los países asiáticos, China y Rusia. También hizo públicos sus planes para convertir la Planta de Energía Nuclear de Bataan en una planta alimentada por gas.

Suecia

Después de la fusión parcial del núcleo de la planta de generación nuclear de Three Mile Island en Estados Unidos en el año 1979, se realizó un referéndum en Suecia en que la gente sólo podía votar "No a lo nuclear". Aunque existían 3 soluciones, todas eran básicamente un suave o un duro "No". Después el parlamento sueco decidió en 1980 que no se iba a continuar con las plantas nucleares que debían construirse, y que la retirada progresiva de la energía nuclear debería terminarse para el 2010. Después del Accidente de Chernóbil de 1986 (en la actual Ucrania) el tema de la seguridad de la energía nuclear fue puesto en duda de nuevo. En 1997 el Riksdag, el parlamento sueco, decidió parar uno de los reactores nucleares de Barsebäck el 1 de julio, de 1998 y el segundo antes del primero de julio de 2001, aunque bajo la condición de que su producción de energía fuera compensada. El siguiente gobierno conservador trató de cancelar el proceso de parada de las centrales nucleares, pero su decisión fue revocada debido a las protestas. En cambio decidieron alargar el límite de tiempo de vida de las centrales hasta el 2010. En Barsebäck el grupo 1 fue apagado el 30 de noviembre de 1999, y el grupo 2 el 1 de junio, de 2005.

El proceso de abandono de la energía nuclear en Suecia ha sido controvertido. Algunas personas temen que Suecia pierda su competitividad internacional^[cita requerida]. La producción de energía de las restantes plantas nucleares se ha aumentado considerablemente en los últimos años para compensar el cierre de Barsebäck. En 1998, el gobierno decidió no construir más plantas hidroeléctricas para proteger los recursos de agua.

El 25 de julio de 2006 se produjo un fallo eléctrico^[62] en el reactor número 1 de la central de Forsmark, incidente clasificado preliminarmente de nivel 2 en la escala INES (escala de 7 niveles) por la autoridad reguladora sueca SKI. Lars-Olov Höglund, ex-director de la central, afirmó que "fue pura suerte que no ocurriese una fusión del núcleo".^[63] Otros tres reactores nucleares de idéntico diseño (Forsmark II, Oskarshamns I y Oskarshamns II) fueron apagados el 4 de agosto de 2006 para llevar a cabo una investigación por el organismo regulador. La investigación dio como resultado que eran necesarios cambios en la instalación eléctrica de Forsmark-I, II y Oskarshamns-II.^[64] A fecha de 14 de septiembre de 2006 era inminente el re arranque de Oskarshamns-II,^[65] y aún no se había sido solicitado permiso para el re arranque de Oskarshamns-I. En la actualidad, el Gobierno sueco ha revocado la prohibición de construir nuevas centrales nucleares.^[66]

Suiza

En Suiza han realizado muchos referendums en cuanto al tema de la energía nuclear, empezando en 1979 con una iniciativa ciudadana a favor de la seguridad nuclear, la cual fue rechazada. En este país las centrales nucleares no tienen un límite de vida establecido como se ha hecho en otros países con energía nuclear.

Otros países

(Véase también Política sobre Energía Nuclear y Lista de reactores nucleares)

España

En España en 1983 el gobierno socialista promulgó una moratoria nuclear (ya derogada) y se inició la discusión (como en el resto de Europa) sobre qué debía hacerse con la energía nuclear. En 2005 con un gobierno socialista y ante la subida imparable de los precios de los combustibles fósiles importados se reabrió el debate sobre la necesidad de la energía nuclear.^[67]

En el Debate sobre el Estado de la Nación de 2006 el Gobierno español confirmó la decisión de abandonar la energía nuclear.

En 1990 se cerró la central nuclear de Vandellós-I debido a los daños ocasionados por un incendio que se había producido el año anterior. El 30 de abril de 2006 se cerró la central nuclear de Zorita, la más antigua del país. En España quedan 8 reactores nucleares en funcionamiento.

El gobierno anunció el cierre de la central nuclear de Garoña en 2009.^[68] Su vida útil inicialmente finalizaba en el 2011, siendo esta la de construcción más antigua en España tras Zorita. España busca ahora una ubicación para un *Almacén Temporal Centralizado (ATC)* de residuos radiactivos de alta actividad,^[69] ^[70] que deberá estar en funcionamiento en el año 2011 (año en que deberá comenzar a albergar el combustible gastado procedente del desmantelamiento de las centrales de Vandellós, Garoña y Zorita). El municipio que acepte albergarlo recibirá 700 millones de euros, 300 puestos de trabajo en construcción y 110 durante su mantenimiento (previsto de 60 años), aparte de las compensaciones contempladas en la legislación vigente (11,5 millones de euros anuales). La fecha de presentación de solicitudes de los municipios comenzó la tercera semana de septiembre. Los 69 municipios integrados en la AMAC (Asociación de Municipios en Áreas de Centrales Nucleares) solicitaron información sobre el ATC.^[71] Una noticia del diario gratuito "20 minutos" afirma que de los 9 municipios que se interesaron por la propuesta casi todos han desistido ya tras pulsar la opinión vecinal.^[72]

Irlanda

En 1968 se propuso construir por primera vez una planta nuclear. Debía haberse construido durante los años 70 en Carnsore Point en el Condado de Wexford. El plan preveía inicialmente una sola planta, que posteriormente fueron ampliadas hasta cuatro en el mismo lugar, pero se desistió debido a la fuerte oposición de los grupos medioambientales, e Irlanda ha continuado desde entonces sin energía nuclear. A pesar de la oposición a la energía nuclear (y al reprocesado de combustible nuclear en Sellafield) Irlanda estableció una conexión con Gran Bretaña para comprarle electricidad, la cual es en parte producto de la energía nuclear.

Austria

El 9 de julio de 1997, el Parlamento Austríaco votó por unanimidad mantener su política nacional antinuclear.[73]

Francia

Con cifras de 2002, EDF - la mayor compañía francesa de generación y distribución de electricidad, estatal- produce alrededor del 78% de su electricidad con 58 plantas de energía nuclear. Los sectores críticos han destacado la desproporción de medios suministrados por la energía nuclear con relación a la procedente de la de otros medios - carbón y petróleo importados básicamente -, sin embargo el conjunto de la sociedad francesa acepta la energía nuclear.

Bulgaria

La Central nuclear de Kozloduy posee seis reactores de agua presurizada con una potencia total de 3760 MWe actualmente. Cuatro son viejos reactores VVER-440 V230, considerados peligrosos, y que de acuerdo con un acuerdo de 1993 entre el Banco Europeo para la Reconstrucción y el Desarrollo (BERD) y el gobierno búlgaro debían ser cerrados a finales de 1998. Las Unidades 5 y 6 son reactores VVER-1000 más nuevos.

Reino Unido

A principios de los 90, creció la preocupación acerca de los efectos de las plantas de energía nuclear sobre el feto humano, cuando se detectó una mayor incidencia de casos de leucemia en las proximidades de alguna de estas plantas. El efecto fue especulativo dado que otros incrementos fueron también encontrados en lugares donde no había plantas nucleares y tampoco todas las plantas registraban incrementos en sus alrededores. Los estudios llevados a cabo por COMARE, Compete on Medical Aspects of Radiation in the Environment (Comisión sobre Aspectos Médicos de la Radiación en el Ambiente) en 2003, no encontraron ninguna evidencia de relación entre la energía nuclear y la leucemia infantil. Una encuesta de opinión llevada a cabo en 2003 en Gran Bretaña por MORI por cuenta de Greenpeace mostró un respaldo amplio a la energía eólica, con una mayoría a favor de poner fin a la energía nuclear en igualdad de costos. Recientemente, se ha producido una acalorada discusión acerca del despilfarro nuclear. Como reacción se creó en abril de 2005, bajo la *Energy Act 2004*, la Autoridad para el Desmantelamiento Nuclear (Nuclear Decommissioning Authority) (NDA) para garantizar que 20 emplazamientos nucleares británicos del sector público fueran desmantelados y descontaminados con seguridad y de forma que se protegiera el medio ambiente para las futuras generaciones.

En abril de 2005, los consejeros del Primer Ministro Británico Tony Blair sugirieron que la construcción de nuevas plantas de energía nuclear sería el mejor modo para cumplir con los objetivos nacionales de reducción de las emisiones de gases responsables del calentamiento global. El gobierno tiene un objetivo a corto plazo para recortar por debajo del 20% los niveles de 1997 y un recorte más ambicioso del 60% para 2050. Los críticos a la energía nuclear dicen que esta medida no ayudará a cumplir el objetivo de 2010, debido al largo período necesario para planificar, construir e instalar tales plantas de energía. No obstante, los que respaldan la idea dicen que la energía nuclear ayudará a cumplir el recorte del 60% para el 2050^[cita requerida].

Eslovenia

En 2003 se cierra su única planta nuclear, ubicada en Krško, decidiéndose no construir nuevas plantas.

Finlandia

El Parlamento de Finlandia votó el 24 de mayo de 2002 construir su quinta planta de energía nuclear. Como razones se dieron motivaciones económicas, de seguridad energética y ambientales (política climática). Mientras que la generación de energía hidroeléctrica se ve recortada en años de sequía, la energía nuclear suministra volúmenes de

energía constantes. Con una demanda creciente (las proyecciones apuntan a la necesidad de 7500 MW de capacidad adicional para 2030) y la necesidad de asegurar un suministro económico fiable para el largo plazo, varios estudios muestran que la energía nuclear es la opción más barata para Finlandia^[cita requerida].

Los Verdes abandonaron el gobierno como reacción a esta decisión, con la dimisión del Ministro de Medio Ambiente, Satu Hassi. Otras fuentes ven en la construcción un subsidio encubierto para la poderosa industria papelerá fina, que es una voraz consumidora de energía eléctrica.

El voto se consideró muy significativo en lo que supone la construcción, después de más de una década, de una nueva central nuclear en Europa Occidental. La compañía eléctrica TVO, que pretende explotar el nuevo reactor, consiguió imponer condiciones extremadamente favorables en la construcción del reactor, debido a su importancia estratégica para la industria nuclear: la feroz competencia entre los fabricantes hizo que el precio del proyecto descendiera a 3200 millones de euros (aunque este precio todavía excedía en 700 millones de euros el coste máximo previsto durante el debate político). Areva, la compañía pública francesa que construirá el nuevo reactor, planea actualmente construir uno similar en Francia, aunque su coste será un 25% más alto que el acordado para Finlandia. Otro hecho a tener en cuenta es que TVO y Areva establecieron un contrato de precio fijo, lo cual implica que si los costes totales exceden los 3200 millones de euros (algo bastante probable dado el nuevo diseño, los ambiciosos plazos y el retraso ya acumulado de 18 meses), Areva deberá cubrir los costes adicionales.^[74] Esta y otras razones han llevado a que la Comisión Europea esté investigando la existencia de ayudas estatales ilegales en la financiación del nuevo reactor, según la denuncia de la Federación Europea de Energías Renovables.^[75] A pesar de todas estas ventajas para la compañía TVO, Standard & Poor's modificó la calificación crediticia de TVO de "estable" a "negativa", después de que se anunciara la decisión de construir el nuevo reactor. Según el analista crediticio Andreas Zsiga, de Standard & Poor's, esto "refleja el creciente riesgo financiero y comercial que puede producirse si TVO decide seguir adelante".^[76] Los grupos ecologistas fineses han establecido una página web para suministrar información sobre la construcción de este reactor nuclear: (en inglés) www.olkiluoto.info^[77].

Sin embargo, en julio de 2009 el proyecto acumulaba 3 años de retraso.^[78]

Rusia

Se han hecho planes para incrementar el número de reactores en funcionamiento de veintinueve a cincuenta y nueve, financiados con la ayuda de préstamos de la Unión Europea. Los viejos reactores serán mantenidos y actualizados, incluidas las unidades RBMK similares al reactor de Chernobyl. En agosto de 2005, Rusia y Finlandia, acordaron la exportación de energía nuclear desde Finlandia hacia Rusia. China y Rusia acordaron estrechar la cooperación en la construcción de plantas nucleares en octubre de 2005.

Oceanía

Nueva Zelanda promulgó en 1987 la *New Zealand Nuclear Free Zone, Disarmament, and Arms Control Act* (Acta de 1987 de Zona Libre Nuclear, Desarme y Control de Armas), que prohíbe el estacionamiento de armamento nuclear en el territorio de Nueva Zelanda y la entrada en aguas de Nueva Zelanda de embarcaciones con armamento o propulsión nuclear. Esta Acta del Parlamento, no obstante, no prohíbe la construcción de plantas de energía nuclear.

En Australia no hay ninguna planta nuclear. Australia tiene unas reservas de carbón muy extensas y de bajo costo de extracción, y considerables reservas de gas natural. La mayoría de la opinión política se opone a la energía nuclear doméstica tanto por motivos medioambientales como económicos. Sin embargo, un número de destacados políticos ha empezado a invocar la energía nuclear como un medio asequible de reducir las emisiones contaminantes y tal vez facilitar la instalación de plantas desalinizadoras a gran escala^[cita requerida].

Asia

China e India están actualmente construyendo nuevas plantas de energía nuclear.

En Taiwán, el petróleo supone el 48% del total de consumo energético. Le sigue el carbón con un 34%, y, a continuación, la energía nuclear con un 9%, el gas natural con un 8% y la energía hidráulica (por debajo del 2%). La energía nuclear es objeto de controversia y la privatización del mercado energético (con Taipower que es una compañía estatal), que fue inicialmente prevista para 2001, fue pospuesta en el 2002 hasta el 2006. Taipower tiene una capacidad instalada de 31.915 MW, de los cuales el 69% correspondían a térmicas, 16% a nucleares y 14% a hidráulicas. A principios del 2000, fue elegido el gobierno del Partido Progresista Democrático, con las promesas de aprobar para el futuro únicamente proyectos de energía de gas natural licuado, y de incrementar la participación del gas natural licuado en la generación de la energía de Taiwan hasta alcanzar alrededor de la tercera parte del total para 2010. Se intentó detener la construcción en marcha de la planta nuclear de Kungliao de 2.700 MW, pero un tribunal falló que la construcción no podía ser interrumpida.

En Japón, según la situación al año 2005, 55 reactores generan el 30% de su electricidad. El 80% de su energía procede de la importación. Desde 1973 la energía nuclear ha constituido una prioridad estratégica nacional.

Con datos al año 2005, Corea del Sur tiene 18 reactores de energía nuclear operativos, y dos más en construcción y previstos para su inauguración en el 2004. Lentamente, la energía renovable, principalmente hidroeléctrica, va ganando cuota de participación.

En Corea del Norte, dos reactores de agua presurizada, en Kumho, estaban en construcción, la cual fue suspendida en noviembre de 2003. El 19 de septiembre de 2005 se comprometió a suspender la construcción de armas nucleares y a permitir las inspecciones internacionales a cambio de ayudas en el sector energético, las cuales incluirían uno o más reactores de agua ligera (El acuerdo decía: "Las otras partes expresaron su respeto y acordaron debatir en el momento adecuado los temas para el suministro de reactor/es de agua ligera").

Irán tiene dos plantas de energía nuclear en construcción y, como cualquier otro país, el derecho legal al enriquecer uranio con fines pacíficos de acuerdo con el Tratado para la No Proliferación de Armas Nucleares. A partir de 2005 los Estados Unidos y la Unión Europea comenzaron a denunciar que el Tratado había sido vulnerado por el programa nuclear secreto que fue descubierto en 2002. Irán afirma que la energía nuclear es necesaria para una población en expansión que ha más que duplicado su número en los últimos veinte años, así como para su creciente industrialización. El país importa de forma habitual gasolina y electricidad, y la combustión en grandes cantidades de petróleo fósil daña de forma drástica el medio ambiente iraní. Irán cuestiona que no se le permita la diversificación de sus fuentes de energía, especialmente cuando existe el temor de que sus campos petrolíferos pudieran estar agotándose^[cita requerida]. Además, reivindica que su petróleo debiera utilizarse para obtener productos de alto valor, y no simplemente en la conversión en electricidad. Irán también expone cuestiones financieras, reclamando que el desarrollo del exceso de capacidad en su industria petrolera podría costar 40 mil millones de dólares, sólo para el pago de las plantas energéticas. La dotación de elementos para energía nuclear costaría sólo una parte de esta cifra, si se tiene en consideración sus abundantes recursos accesibles de mineral de uranio.

En julio de 2000, el gobierno de Turquía decidió no construir una controvertida planta nuclear en Akkuyu.

Estados Unidos

En los Estados Unidos, la explotación se inició cuando el Presidente Dwight D. Eisenhower inauguró la central nuclear de Shippingport el 26 de mayo de 1958 como parte de su programa Átomos para la Paz. El Reactor de Shippingport fue la primera planta de energía nuclear construida en los Estados Unidos.

En 2004 en los Estados Unidos, había 69 reactores comerciales de agua presurizada y 35 de vapor de agua con unidades autorizadas a funcionar en total, 104 produciendo un total de 97.400 MW, que, aproximadamente, representa el 20% del total de consumo eléctrico nacional. Los Estados Unidos son el mayor proveedor mundial comercial de energía nuclear.

Varias plantas nucleares de Estados Unidos se han cerrado con antelación a sus vidas previstas de funcionamiento, incluyendo las plantas de Rancho Seco en 1989 en California, San Onofre Unit 1 en 1992 en California (las unidades 2 y 3 siguen funcionando), Zion en 1998 en Illinois y Trojan en 1992 en Oregon. No obstante, un gran número de plantas han recibido recientemente una prórroga de 20 años para sus períodos de vigencia autorizados.

En los EE.UU., con datos de 2005, ninguna planta nuclear ha sido encargada sin la subsiguiente cancelación durante veinte años. Sin embargo, el 22 de septiembre de 2005 se anunció que dos nuevos emplazamientos habían sido seleccionados para recibir nuevos reactores de energía (con exclusión del nuevo reactor programado para INL) - ver Programa de Energía Nuclear 2010, y otros dos equipamientos tenían planes para nuevos reactores. También había una instalación para un permiso anterior en Exelon's Clinton Nuclear en Clinton, Illinois para instalar otro reactor así como un rearranque de un reactor en la planta nuclear de la Tennessee Valley Authority Browns Ferry. El 17 de febrero de 2010 el presidente Barack Obama anunció la construcción de 2 nuevas centrales nucleares en el estado de Georgia, las primeras en construirse en Estados Unidos en 30 años, con lo cual este país reinicia su apuesta por la energía nuclear.^[79]

México

En México tras una época en la que se pensó en dejar de hacer uso de la energía nuclear se decidió finalmente en 2007 por repotenciar la central nuclear Laguna Verde, la cual cuenta con 2 reactores de 683MW cada uno, tras la repotenciación los reactores aumentarían su producción a 817MW cada uno.^[80] El 14 de mayo de 2010 la secretaria de energía Georgina Kessel anunció que México contempla plenamente el desarrollo de la energía nuclear en su matriz energética como una alternativa para desincentivar el uso de combustibles fósiles y aumentar la generación de electricidad limpia.^[81] El director de proyectos de la CFE (Comisión Federal de Electricidad) reveló los 4 escenarios que México contempla: Uno que descarta el uso de la energía nuclear y en sustitución la construcción de 14 centrales de carbón entre 2019 y 2028; otro que implica la construcción de dos centrales nucleares que entrarían en operación en 2027 y 2028 además de límites al uso del carbón y del gas natural, a la vez del aumento del uso de la energía eólica; un tercer escenario que descarta el empleo del carbón y limita la construcción de nuevas plantas de ciclo combinado a gas, permitiendo así construir 6 plantas nucleares que empezarían a operar entre 2024 y 2028; y un cuarto escenario, que descarta el uso del carbón, impone límites a los ciclos combinados e incluye 10 plantas nucleares que estarían operando entre los años 2022 y 2028.^[82]

América del Sur

En Argentina existen dos plantas de energía nuclear, en la localidades de Atucha, Provincia de Buenos Aires, y de Embalse, Provincia de Córdoba. Se encuentra en avanzado estado de construcción una tercera planta en Atucha.

En Brasil, la energía nuclear, producida por dos reactores en la Angra, proporciona alrededor del 4% de la electricidad del país - en torno a 13.000 GWh por año.

Informaciones periodísticas (I semestre 2006) señalan que ambos países están considerando concluir las centrales que estaban con su cronograma de construcción desacelerado.

África

En África, Sudáfrica es el único país que tiene una planta de energía nuclear y está localizada en Koeberg.

Revisión


Varios países, en su mayoría europeos, se plantearon el abandono del uso de la energía nuclear a partir de 1987. Austria (1978), Suecia (1980) e Italia (1987) votaron en referéndum la oposición o el abandono de la energía nuclear. Entre los países que no tienen plantas nucleares y han prohibido la construcción de nuevas plantas se incluyen Australia, Austria, Dinamarca, Grecia, Irlanda y Noruega (este último tiene dos reactores de investigación). Polonia detuvo la construcción de un reactor. Bélgica, Alemania, Holanda, España y Suecia decidieron no construir nuevos reactores o tienen intenciones de abandonar la energía nuclear, aunque en su mayoría todavía dependen en mayor o menor medida de ella. Suiza tuvo una moratoria para el cese de construcción de plantas nucleares durante 10 años, pero en referéndum en 2003 se decidió no renovarla.

El parlamento de Finlandia aprobó en 2002 la construcción de una quinta central nuclear. Esta fue la primera decisión tomada en este sentido en una década en Europa Occidental.

Si los países abandonan la energía nuclear, deberán encontrar alternativas para la generación de energía, si no desean depender de la importación de combustibles fósiles (en su mayoría procedentes de países inestables políticamente). Por esta razón, las discusiones de un futuro abandono suelen estar ligadas a discusiones sobre el desarrollo de las energías renovables. Entre las alternativas a la energía nuclear más discutidas se encuentran la hidroeléctrica, la energía eólica, la energía solar y la biomasa. También los combustibles fósiles podrían ser considerados si la tecnología existente fuera mejorada para no producir efectos contaminantes.

En 2009, el Parlamento Europeo se pronunció a favor de la energía nuclear.^[83]

Véase también

-  Portal:Energía. Contenido relacionado con **Energía**.
- Controversia sobre la energía nuclear
- Energía nuclear
- Energías renovables en la Unión Europea
- Energía renovable
- Tratado de No Proliferación Nuclear

Enlaces externos

- Monitor Nuclear de WISE/NIRS ^[84], un boletín producido conjuntamente por el Servicio de Información y Recursos Nucleares (NIRS), con sede en Washington (Estados Unidos) y por el Servicio Mundial de Información sobre la Energía (WISE), con sede en Ámsterdam (Países Bajos)

Referencias

- [1] Países del mundo que poseen centrales nucleares de producción eléctrica (<http://f40.iaea.org/worldatom/Periodicals/Factsheets/Spanish/spelectr.html>)
- [2] Henrik Paulitz (2006), The probability of a Nuclear Meltdown (<http://www.ipnw-students.org/chernobyl/meltdown.pdf>), AIMPGN [4 de octubre de 2006] (inglés)
- [3] Nuevos cálculos de riesgo máximo de daño al núcleo de General Electric (<http://www.ans.org/pubs/magazines/nn/docs/2006-1-3.pdf>)
- [4] (en inglés) W. Kole (2001) Global atomic agency confesses little can be done to safeguard nuclear plants (<http://www.nci.org/01/09/19-11.htm>), Associated Press Wire Story, [6 de noviembre de 2006]
- [5] Página de opiniones de www.closeindianpoint.org (<http://www.closeindianpoint.org/opinions.htm>)
- [6] *Analysis of Nuclear Power Plants Shows Aircraft Crash Would Not Breach Structures Housing Reactor Fuel*. WASHINGTON D.C.. 23 de diciembre de 2002 (<http://www.nei.org/newsandevents/aircraftcrashbreach/>)
- [7] Resumen de "Aircraft Crash Impact Analyses Demonstrate Nuclear Power Plant's Structural Strength". Diciembre de 2002 (http://www.stpnoc.com/EPRI_study.doc)
- [8] (en inglés) Testimonio del dr. Lyman ante el Subcomité para el Aire Limpio, el Cambio Climático y la Seguridad Nuclear del Senado de EE.UU. (http://www.ucsusa.org/assets/documents/global_security/Lyman_testimony_5-26-05.pdf)
- [9] [http://noticias.juridicas.com/base_datos/Laboral/insis12-csn.html Instrucción IS-12, de 28 de febrero de 2007, del Consejo de Seguridad Nuclear, por la que se definen los requisitos de cualificación y formación del personal sin licencia, de plantilla y externo, en el ámbito de las centrales nucleares
- [10] Large & Associates, Nuclear Consultants (2006), Risks and hazards of the transportation of spent fuel in the UK (Riesgos y peligros del transporte de combustible gastado en el Reino Unido) [20 de octubre de 2006 (<http://www.greenpeace.org.uk/MultimediaFiles/Live/FullReport/7487.pdf>)] (inglés)]
- [11] Caterina Dutto (2006), ElBaradei Remarks at Georgetown University (<http://www.carnegieendowment.org/npp/publications/index.cfm?fa=view&id=18816>), Carnegie Endowment for International Peace (en inglés)
- [12] M. ElBaradei (2004), Nuclear Power: An Evolving Scenario, p. 4 (http://www.iaea.or.at/Publications/Magazines/Bulletin/Bull461/evolving_scenarios_4.html), OIEA (en inglés)
- [13] (en inglés)DOE FACTS: Additional Information Concerning underground Nuclear Weapon Test Of Reactor-grade Plutonium (http://www.ccnr.org/plute_bomb.html), Office of Public Affairs, U.S. Department of Energy [24 de agosto de 2007]
- [14] (en inglés) Greenpeace, Reprocessing (<http://www.greenpeace.org/international/campaigns/nuclear/waste/reprocessing>) (Reprocesado) [20 de octubre de 2006]
- [15] (en inglés) Gardner, MJ. (1991), Father's occupational exposure to radiation and the raised level of childhood leukemia near the Sellafield nuclear plant (http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=pubmed&dopt=Abstract&list_uids=1954939), Environmental Health Perspectives, 1994 [23 de septiembre de 2006]
- [16] (en inglés) Dickinson, H. Parker, L. (2002), Leukaemia and non-Hodgkin's lymphoma in children of male Sellafield radiation workers (<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/92013261/ABSTRACT>), International Journal of Cancer, 1999 [23 de septiembre de 2006]
- [17] Chris Busby, PhD (2003) Nuclear pollution, childhood leukaemia, retinoblastoma and brain tumours in Gwynedd and Anglesey Wards near the Menai Straits, North Wales 2000-2003 (<http://www.llrc.org/health/subtopic/menai.pdf>), [23 de septiembre de 2006] (inglés)
- [18] D. Pobel, J.F. Viel (1997), Case control study of leukaemia among young people near La Hague nuclear reprocessing plant (http://www.fraw.org.uk/mobbsey/pdfs/magnox_a1_18.pdf), British Medical Journal 314:7074 [23 de septiembre de 2003] (inglés)
- [19] (en inglés) Environmental Health Perspectives→Solid-Tumor Mortality in the Vicinity of Uranium Cycle Facilities and Nuclear Power Plants in Spain (<http://www.ehponline.org/docs/2001/109p721-729lopez-abente/abstract.html>)
- [20] (en inglés) Occupational & Environmental Medicine→Cancer risk around the nuclear power plants of Trillo and Zorita (Spain) (<http://oem.bmjournals.com/cgi/content/abstract/60/7/521>)
- [21] 10º informe del *Committee on Medical Aspects of Radiation on the Environment* (COMARE) sobre la incidencia del cáncer infantil alrededor de las instalaciones nucleares. 2005. (<http://www.comare.org.uk/documents/COMARE10thReport.pdf>)
- [22] Instituto Nacional del Cáncer *No Excess Mortality Risk Found in Counties with Nuclear Facilities* (<http://www.cancer.gov/cancertopics/factsheet/Risk/nuclear-facilities>)
- [23] (en inglés) Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention→Leukemia, Lymphomas, and Myeloma Mortality in the Vicinity of Nuclear Power Plants and Nuclear Fuel Facilities in Spain (<http://cebp.aacrjournals.org/cgi/content/abstract/8/10/925>)
- [24] U.R. Fritsche (1997), Comparing greenhouse-gas emissions and abatement costs of nuclear and alternative energy options from a life-cycle perspective (http://www.oeko.de/service/gemis/files/info/nuke_co2_en.pdf), Öko-Institut, Berlin [28 de septiembre de 2006] (inglés)

- [25] (en inglés) CRIEPI (1995) Comparison of CO₂ Emission Factors between Process Analysis and I/O Analysis. Working document prepared for IAEA, Tokyo.
- [26] (en inglés) IEA (1994) Energy and the Environment, Transport Systems Responses in the OECD - Greenhouse Gas Emissions and Road Transport Technology. Paris: IEA.
- [27] (en inglés) Uranium Information Centre (2004) Sustainable Energy - Uranium, Electricity and Greenhouse (<http://www.uic.com.au/ueg.htm>), Melbourne (Australia).
- [28] (en inglés) Makhijani, A. (2002) Nuclear Power: No Answer to Global Climate Change, Nukewatch Pathfinder, Autumn 2002, p.6.
- [29] (en inglés) National Commission on Energy (2004). Ending the Energy Stalemate. Washington, NCE.
- [30] Storm van Leeuwen, J.W. & Smith, P. (2004) Can nuclear power provide energy for the future: would it solve the CO₂ emission problem? (http://www.autonavzduch.cz/dokumenty/Nuclear_sustainability_rev3.pdf), [28 de septiembre de 2006] (inglés)
- [31] O'Rourke, B. (2004) As Global Warming Accelerates, Is It Time For Nuclear Power To Come In From The Cold? (<http://truthnews.com/world/2004070151.htm>), Truthnews, [28 de septiembre de 2006] (inglés)
- [32] Scheer H. (2004), Nuclear Energy Belongs in the Technology Museum (<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2004/11/nuclear-energy-belongs-in-the-technology-museum-19012>), WRCE Update [30 de septiembre de 2006] (inglés)
- [33] J. McVeigh, D. Burtraw, J. Darmstadter and K. Palmer (1999), Renewable Energy - Winner, Loser, or Innocent Victim? (http://www.rff.org/Documents/Resources/Resources-135-_Burtraw.pdf), Resources for the Future [18 de octubre de 2006] (inglés)
- [34] http://www.externe.info/Página_web_del_proyecto_Externe
- [35] Sistema de financiación de ENRESA (http://www.enresa.es/Servicio+Publico/Conocenos/Recursos_financieros/)
- [36] S. Thomas et al. (2007), The Economics of Nuclear Power (<http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/the-economics-of-nuclear-power.pdf>) (*La economía de la energía nuclear*), Greenpeace (en inglés)
- [37] United States General Accounting Office (1999), Better oversight needed to ensure accumulation of funds to decommission nuclear power plants (<http://www.gao.gov/archive/1999/rc99075.pdf>), Washington (EE.UU.) [1 de octubre de 2006] (inglés)
- [38] J. Goldemberg (2004), The Case for Renewable Energies (<http://www.renewables2004.de/pdf/tbp/TBP01-rationale.pdf>), Secretariat of the International Conference for Renewable Energies, Bonn [6 de noviembre de 2006] (inglés)
- [39] (en inglés) Price-Anderson Nuclear Industries Indemnity Act (página de la Wikipedia en inglés) (http://en.wikipedia.org/wiki/Price-Anderson_Nuclear_Industries_Indemnity_Act)
- [40] Borrador de Anteproyecto de Ley de Responsabilidad Civil por Daños Nucleares (<http://www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/borrador-del-anteproyecto-de-l.pdf>), Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid [30 de marzo de 2007]
- [41] (en inglés) Cook, J. (1985). Nuclear Follies. Forbes, 11 de febrero de 1985
- [42] (en inglés) World Bank (1992). Guideline for Environmental Assessment of Energy and Industry Projects. World Bank technical paper N. 154./1992. Environmental Assessment Sourcebook, Vol III.
- [43] (en inglés) TradeTech LLC (2006), Overview of uranium prices (<http://www.uranium.info/prices/overview.html>)
- [44] World Information Service on Energy (2005), Nuclear Power: No solution to climate change (<http://www.nirs.org/mononline/nukesclimatechangereport.pdf>), Nuclear Monitor, Amsterdam [28 de septiembre de 2005] (inglés)
- [45] Greenpeace - Informe Renovables 2050 (<http://energia.greenpeace.es/info.shtml>)
- [46] Red Eléctrica de España - Informe 2004 (http://www.ree.es/cap07/pdf/infosis/Inf_Sis_Elec_REE_2004_ElSectorElectrico.pdf)
- [47] (en inglés) World Nuclear Association (2003), Nuclear Electricity, Chapter 6 (<http://www.world-nuclear.org/education/ne/ne6.htm>)
- [48] (en inglés) World Nuclear Association (2003), Nuclear Electricity, Chapter 5 (<http://www.world-nuclear.org/education/ne/ne5.htm>)
- [49] (en inglés) A. Gabbard (¿año?) Coal combustion: nuclear resource or danger (<http://www.ornl.gov/info/ornreview/rev26-34/text/colmain.html>), Oak Ridge National Laboratory [6 de noviembre de 2006]
- [50] D.J. Hassett y L.V. Heebink (2001), Release of mercury vapor from coal combustion ash (<http://www.flyash.info/2001/envben3/65hasset.pdf>) (Contenido de mercurio en las cenizas de la combustión del carbón), International Ash Utilization Symposium [6 de noviembre de 2006] (inglés)
- [51] (en inglés) World Nuclear Association (2006), Processing of Used Nuclear Fuel for Recycle (<http://www.world-nuclear.org/info/inf69.htm>), [6 de noviembre de 2006]
- [52] (en inglés) Central nuclear de Ringhals, Suecia (¿año?) Environment (<http://www.barsebackkraft.se/templates/Umain.asp?ItemID=1630&OItemID=1627&siteid=>)
- [53] (en inglés) Uranium Information Centre (2003), Energy Analysis of Power Systems (<http://www.uic.com.au/ne6.htm>)
- [54] *Advanced Nuclear Power Reactors* - Artículo que recoge un resumen sobre los avances en Reactores de nueva generación (en inglés) [[Marzo de 2007 (<http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>)]]
- [55] Artículo de la BBC sobre reactores avanzados (en inglés) (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/5165182.stm#1>)
- [56] (en inglés) E. Beckjord, E. Moniz, j. Deutch et al. (2003), The Future of Nuclear Power (pdf) (<http://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclearpower-full.pdf>), Instituto Tecnológico de Massachussets [16 de octubre de 2006]
- [57] (en inglés) ExternE Project (¿año?) Results of ExternE (Figures of the National Implementation phase) (<http://www.externe.info/results.html>)
- [58] Addicted to nuclear energy? < Local News | Expatica Belgium (http://www.expatica.com/source/site_article.asp?subchannel_id=48&story_id=21976&name=Addicted+to+nuclear+energy?)
- [59] BBC NEWS | World | Europe | Germany split over green energy (<http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/4295389.stm>)
- [60] Newsweek | World | The Radioactive Energy Plan (<http://www.newsweek.com/id/151671>)

- [61] Der Spiegel | Wissen | German Party Politics Block Nuclear Consensus (<http://www.spiegel.de/international/business/0,1518,563193,00.html>)
- [62] (en inglés) http://www.ski.se/extra/news/?module_instance=3&id=468 Descripción del incidente en Forsmark I
- [63] (en inglés) 2006, Nuclear plant 'could have gone into meltdown' (<http://www.thelocal.se/article.php?ID=4487&date=20060801>), The Local [23 de septiembre de 2006]
- [64] http://www.ski.se/extra/news/?module_instance=3&id=480 Notas de prensa de la autoridad reguladora sueca
- [65] (en inglés) Nuclear watchdog blocks Forsmark restart (<http://www.thelocal.se/article.php?ID=4897&date=20060914&PHPSESSID=4cfc9cc82c3d18275d582e8c03b6e466>), The Local [23 de septiembre de 2006]
- [66] Manuel Ansele (5). « Suecia anula el apagón nuclear votado en 1980 (<http://www.publico.es/ciencias/197890/suecia/anula/apagon/nuclear/votado>) ». Público. Consultado el 22 de abril de 2009.
- [67] <http://www.mityc.es/Energia/Secciones/Mesadialogo> Mesa de diálogo sobre la energía nuclear
- [68] R. Méndez (2006), El Gobierno decide cerrar Garoña y descarta ampliar la vida de otras centrales nucleares (http://www.elpais.es/articulo/sociedad/Gobierno/decide/cerrar/Garona/descarta/ampliar/vida/otras/centrales/nucleares/elpporsoc/20060917elpepisoc_1/Tes/), El País, Madrid [28 de septiembre de 2006]
- [69] <http://www.emplazamientoatc.es/Emplazamiento> del ATC español
- [70] <http://www.mityc.es/es-ES/Servicios/GabinetePrensa/NotasPrensa/HistoricoNoticias/2006/8/atcprimerasinformaciones09.08.06.htm> Nota de prensa del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio acerca de la apertura del ATC
- [71] <http://www.castillalamancha.es/medioambiente/SP/Contenidos/PB/Periodico/default.asp?s=detalle&Reg=3479> Los 69 municipios del AMAC solicitan información sobre el ATC
- [72] J. Rada (2006), Nadie quiere basura atómica (<http://www.20minutos.es/noticia/155557/0/Nadie/basura/atomica/>), 20 Minutos [25 de septiembre de 2006]
- [73] <http://www10.antenna.nl/wise/index.html?http://www10.antenna.nl/wise/478/aai.html>
- [74] H. Lammi y K. Kosonen (2004), Fiebre nuclear en Finlandia (<http://www10.antenna.nl/wise/index.html?http://www10.antenna.nl/wise/esp/612-13/5620.php>), Monitor Nuclear de WISE/NIRS [19 de octubre de 2006]
- [75] (en inglés) Nota de prensa de la FEER (2004), EU investigation requested into illegal aid to Finnish nuclear plant (http://www.eref-europe.org/downloads/pdf/2004/EPR_Finland.pdf) (Solicitada investigación de la UE sobre la ayuda ilegal de Finlandia a la construcción de una central nuclear), FEER [20 de octubre de 2006]
- [76] WISE Ámsterdam (2002), Finlandia: El Parlamento aprueba un nuevo reactor, el Partido Verde presenta su renuncia (<http://www10.antenna.nl/wise/index.html?http://www10.antenna.nl/wise/esp/569/5409.html>), Monitor Nuclear de WISE/NIRS [19 de octubre de 2006]
- [77] <http://www.olkiluoto.info/en/>
- [78] *Tres años de demora en la nueva nuclear de Finlandia* (http://www.elpais.com/articulo/sociedad/anos/demora/nueva/nuclear/Finlandia/elpepisoc/20090706elpepisoc_6/Tes/) El País, 06/07/2009. Consultada el 17 de diciembre de 2009
- [79] <http://www.elimparcial.es/mundo/obama-apuesta-por-la-energia-nuclear-para-combatir-la-contaminacion-57502.html>
- [80] <http://www.cnnexpansion.com/obras/laguna-verde-recargada>
- [81] <http://www.informador.com.mx/mexico/2010/201187/6/mexico-apostara-por-la-energia-nuclear.htm>
- [82] <http://www.mexiconews.com.mx/primera/34982.html>
- [83] Peter Heilbrunner, Albrecht Breitschuh (7). « Europa redescubre la energía nuclear, ¿y Alemania? (<http://www.deutsche-welle.de/dw/article/0,,4008615,00.html>) ». Deutsche Welle. Consultado el 22 de abril de 2009.
- [84] <http://www10.antenna.nl/wise/esp/index.html>

Desmantelamiento de instalaciones nucleares

El desmantelamiento de centrales nucleares se distingue del desmantelamiento 'convencional' en la existencia de materiales radiactivos o fisiles que requieren de medidas de tratamiento especiales.

El desmantelamiento involucra diversas acciones técnicas administrativas, incluyendo la descontaminación y demolición progresiva de la planta. Una vez que la instalación está desmantelada, no debería subsistir riesgos de accidentes radiactivos que pudiesen afectar a las personas. Una vez que el desmantelamiento se completa se puede liberar el emplazamiento del control regulador.

Los objetivos buscados en el desmantelamiento son:

- Acondicionar a largo plazo el emplazamiento en una condición segura para su utilización sin restricciones.
- Desmantelar la instalación de forma segura y con eficiencia económica.

Opciones de desmantelamiento

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha definido tres opciones para el desmantelamiento:

- *Desmantelamiento inmediato*: Esta opción permite que la instalación sea excluida del control regulador en un periodo relativamente corto, tras la parada o finalización de las prácticas reguladas. Normalmente se llega al final del desmantelamiento en unos meses o años, tras lo cual, el emplazamiento puede estar disponible para su reutilización para otras aplicaciones.
- *Desmantelamiento diferido*: Esta opción retrasa la liberación del control por un período mayor que en el caso de desmantelamiento inmediato, del orden de 40 a 60 años. La instalación se configura en una especie de almacén de residuos radiactivos, hasta el desmantelamiento final.
- *Enterramiento*: Esta opción consiste en acondicionar la instalación de forma que permita la permanencia de parte o todo el material radioactivo. Normalmente se reduce el tamaño de área donde se localiza el material radiactivo envolviendo la instalación en una estructura protectora que pueda resistir por un período suficientemente largo como para que la radiactividad decaiga a niveles aceptables.

Inventario radiológico

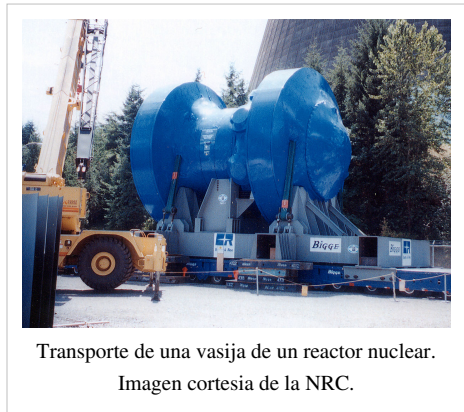
Uno de los factores clave para poder desarrollar correctamente un desmantelamiento de una instalación nuclear es disponer de un inventario radiológico, ya que es clave para decir, tanto el modo de desmantelamiento como la planificación del mismo. El grado de descontaminación y el traslado y tratamiento del material radiactivo es una función directa del tipo y magnitud de la fuente radiactiva. Un inventario preciso es necesario para estimar las exposiciones de los trabajadores, así como los impactos ambientales.

Según su origen, los materiales radiactivos pueden ser:

- Procedentes de activación neutrónica
- Contaminación externa depositada en superficies.



Ejemplo de desmantelamiento en proceso.



Transporte de una vasija de un reactor nuclear.
Imagen cortesía de la NRC.

Plan de desmantelamiento

Es necesario realizar un plan de desmantelamiento que sirva como base para organizar las actividades que han de desarrollar los participantes en el proyecto, así como para informar a la autoridad reguladora para poder obtener los permisos necesarios. El plan ha de contemplar los criterios de descontaminación, incluyendo los límites de contaminación superficial actividad dispersada final aceptables.

Técnicas de desmantelamiento

Algunas de las técnicas empleadas en el desmantelamiento de instalaciones nucleares son:

- Segmentación. Es una de las actividades principales, especialmente cuando existe contaminación radiactiva o activación, lo que en ciertos casos requiere actuación a distancia mediante robots. Consiste en el troceado de grandes componentes en secciones más manejables.
- Proceso de arco de plasma. Se establece un arco de corriente continua entre un electrodo de wolframio y un material conductor en una corriente de gas (por ejemplo, argón), a temperaturas de 10000-24000 °C.
- Quemador de oxígeno. Se produce una ignición en una mezcla de gas combustible y oxígeno en el orificio de un lanzallamas. En ocasiones se denomina a esta técnica como soldadura a gas. Normalmente no pueden cortar acero inoxidable, aluminio, otros metales no ferrosos o metales con altos porcentajes de hierro.
- Lanza de reacción termita. Una tubería de hierro se empaqueta con una combinación de acero, aluminio e hilos de magnesio con un flujo de oxígeno mantenido.
- Corte con explosivos. Un núcleo explosivo, rodeado de un recubrimiento de plomo, aluminio, cobre o plata, permite una detonación con un flujo a reacción de productos de combustión. Se utiliza normalmente con objetos de geometría compleja o se requiere varias cortes simultáneos.
- Sierras de guillotina.
- Cortadora circular. Cortadoras circulares autopropulsadas que cortan al moverse alrededor de la circunferencia exterior de un tubería o conducción.
- Corte abrasivo. Es una rueda propulsada eléctrica, hidráulica o neumáticamente, formada por partículas de aluminio o de carburo de silicio.
- Sierra de arco. Es una hoja de sierra circular sin dientes que corta un metal conductor sin contacto físico con la pieza.
- Demolición de hormigón. Prácticamente cada programa de desmantelamiento implica la demolición o descontaminación de estructuras de hormigón.
- Explosiones controladas. Es el método de demolición recomendado para secciones de hormigón grueso reforzado o grandes masas de hormigón. La dirección del movimiento del material se controla mediante la técnica de detonación retrasada.
- Bola de demolición.
- Arietes neumáticos e hidráulicos. Se utilizan para estructuras de hormigón poco reforzadas y la demolición interior en áreas confinadas. Producen poco ruido y vibraciones.
- Corte de llama. Una reacción de termita con una mezcla de hierro y aluminio que se oxida en un chorro a reacción de oxígeno puro.
- Divisor de rocas. Una cuña que puede expandirse hidráulicamente en un agujero previamente perforado para romper rocas u hormigón. Puede operarse mediante presión de aire, motores de gasolina o eléctricos.
- Demolición con Bristar. Un compuesto expandible químicamente se utiliza para rellenar agujeros para provocar tensiones en el hormigón.

- Perforación con agujas. Un perforador de punta de diamante o carburo se utiliza para perforar agujeros en el hormigón, de forma muy densa.
- Martillos neumáticos

Experiencia

Hasta el momento se han desmantelado un amplio rango de instalaciones nucleares, incluyendo centrales nucleares, reactores nucleares, plantas de producción de isótopos, aceleradores de partículas, minas de uranio.

Ejemplo de instalaciones desmanteladas o en proceso de desmantelamiento en España son:^[1]

- Planta Elefante
- Planta Quercus
- Fábrica de Uranio de Andújar
- Ciemat
- Central Nuclear de Vandellós I
- Planta Lobo

Referencias

[1] Instalaciones nucleares en desmantelamiento/desmanteladas en España (http://www.csn.es/.plantillas/frame_nivel1.jsp?id_nodo=270&&keyword=&auditoria=F)

- Tang, Y. S.; Saling, J.H.. *Radioactive Waste Management*. Hemisphere Publishing Corporation. pp. 450. ISBN 0-89116-666-1.

Enlaces externos

- decommissioning.info portal con información sobre desmantelamiento (en inglés) (<http://www.decommissioning.info/>)
- Comisión reguladora nuclear de EE.UU. (en inglés) (<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/decommissioning.html>)
- Sitio europeo sobre desmantelamiento de instalaciones nucleares (en inglés) (<http://www.eu-decom.be/siteentrance>)

Fuentes y contribuyentes del artículo

Energía nuclear *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45190845> *Contribuyentes:* 2pamela, 4lex, A ver, A*M*S*S*11, Abgenis, Achury, Adrytan, Aibdescalzo, Airunp, Alberto Salguero, Aleuze, Alfredobi, Alhen, Aloriel, Amadís, Andreateltrabajo, Angel GN, Antur, Antón Franchó, Any Rand, Armando-Martin, Armandoballen, Asdasd123, Axxgreaz, B123459876, BL, Baiji, Balderai, Banfield, Beto29, BlackBeast, Buddy Foster, CASF, Camilo, Camima, Carlosediazp, Cmaneiromer, Cobaltempest, Comae, Comakut, CommonsDelinker, Cratón, Cucaracha, DaniDa, Danielba894, Dark seiya, David0811, Davorxp, DerHexer, Dermot, Dferg, Diego Rivera, Diegusjaimes, Dove, Ecemaml, Edslov, Eduardosalg, El Ayudante, El Clarin, El Moska, El weon, Emijrp, Eric, Escarlati, Estonofunciona, Euratom, FAR, Feliciano, Felipealvarez, Feministo, Fernando de Miguel, Filipo, Fjsalguero, Foundling, Fractalside, Fran89, FrancoGG, Gaeddal, Gaius iulius caesar, Galandil, García Cano, Ghon tala, Gilliano, HUB, Hahaha92, Hispalois, House, Humberto, Hyarmendel, Ibiltari, Icvav, Ijayala, Ingolll, Integral Momento Dipolar, Isha, Jaap1123, Jarfil, Javierito92, Jewbask, Jgaray, Jjafjaf, Jyvaca, Jkbw, JorgeGG, Joseaperez, Joselarrucea, Juanma 312008, Julie, KES47, Kmlon645, Kved, LMLM, LadyInGrey, Lagutica2, Laura Fiorucci, Leonpolanco, Libertad y Saber, Lips0910, Llull, Locutus, Lon Abirisain, Lucien leGrey, Mac, Macalla, Macarrones, Macu Rguez, Magister Mathematicae, Maldoror, Maleiva, Manlolsarroc, Manuel Trujillo Berges, Manwë, Maritoperez, Matdroses, Melocoton, Miik Ezdanitoff, Mike3050, Mion, Mitdem, Mjuarez, Montehermoso-spain, Montgomer, Moriel, Mortadelo2005, Muro de Aguas, Mutari, Netito777, Nicadapa, Nihilo, Nixón, Nuvem, Obelix83, Odarp, Onofre sancho, Ooscarr, Opereznavarro, Oscar ., Otama, P.o.l.o., Pan con queso, Paz.ar, PeiT, Pelix, Pelusa sabe, Pencho15, Petronas, Petrus, Platonides, PoLuX124, Poco a poco, Polinizador, Ppja, Queninosta, RPA, Raco, Raystorm, Restaurado, Retama, Rjgalindo, Roberpl, Rodrigo, Rosarinagazo, RoyFocker, Rrmsjp, Rumpelstiltskin, Røge, SaeedVilla, Saloca, Santhy, Santiperez, Savh, Suki77, Super braulio, SuperTusam, Surfsurfsurf, Taichi, Tano4595, Taty2007, Technopat, Tirithel, Tony Rotondas, Tortillovsky, Tostadora, Trarsheise, Tuc negre, Txo, Txuspe, Un Mercenario, Uspsf, Utanari, Vic Fede, Vitamine, Wesisnay, Will vm, Xenoforme, Xinese-v, Yago AB, Yeza, Zhto.21, 769 ediciones anónimas

Reactor nuclear *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45159293> *Contribuyentes:* 3coma14, Af3, Alexav8, Antur, Artheliane, Cinabrium, Deleatur, Diegusjaimes, Diosa, El Ayudante, Emiduronte, Estonofunciona, Euratom, Eustanacio IV, FAR, Fambroggio, Feministo, Fractalside, Gaeddal, HUB, Heavy, Ingolll, JMPerez, Jarisleif, Jgaray, Jkbw, Johnbojaen, JorgeGG, Joseaperez, Kaninchen, Latysheva, Locutus, Lucien leGrey, Mafores, Maltusnet, Mcastanon, Melocoton, Migp, Montgomery, Mortadelo2005, Muro de Aguas, Natket, Neutronix, Paz.ar, Poco a poco, Raulshc, RoyFocker, Rsg, SaeedVilla, Sanbec, Sincefalstrum, Tano4595, Technopat, Template namespace initialisation script, Tostadora, Umbriel, Vitamine, Xenoforme, Xerpa27, 180 ediciones anónimas

Radiación de Cherenkov *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=43789491> *Contribuyentes:* Agremon, Bertou, Emijrp, Fibonacci, Hispa, Joseaperez, Julian Mendez, Karmenquez, Kordas, Maurix, Pateyro68, THINK TANK, Tano4595, Wricardoh, Xenoforme, 20 ediciones anónimas

Fisión nuclear *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45188043> *Contribuyentes:* 1994mike18, Alhen, Alkayata, Ana uv, Antonio, Ascánder, Beto29, Bigsus, BorjaGF, Causer, Camilo, Charlitos, Diegusjaimes, Diotime, Dmlamba, Dpeinador, Edmenb, Eli22, Er Komandante, Escarlati, Euratom, FrancoGG, Gaius iulius caesar, Galandil, Ingolll, Isha, Isidro a h, Jclerman, Jfmelero, Jkbw, Jorge c2010, JorgeGG, Joseaperez, Juanpicart, Juanma 312008, Julian Mendez, Karlos666, Kiroh, Laxmen, Leonpolanco, Loco085, Locutus, Lucien leGrey, MARC912374, Magister Mathematicae, Maldoror, Mansoncc, Marcelo2891, Matdroses, Miguelixulo, Molomaniac, Montgomery, Moriel, Netito777, Pacomeco, Paintman, PhJ, Prietouilmes, Ricardogpn, Rodrigo, SITOMON, Tano4595, Technopat, Valentín estevanez navarro, Xenoforme, Xvazquez, Youssefsan, Zeti ii, 205 ediciones anónimas

Uranio *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45085169> *Contribuyentes:* Af3, Aibdescalzo, Airunp, Aleuze, Angel GN, Any Rand, Aritzjr, Balderai, Carlosblh, Cesarmarcano80, Cobaltempest, Diegusjaimes, Dodo, Edocastillo, Ejmeza, ElektronikWC, Emijrp, Euratom, Farisori, Fergarci, Fidoco, Fonso, Garosuke, GermanX, Grillitus, Groman, Götz, Heavy, Hispalois, Hortografía, Ialad, Ikertza, Ingolll, Interwiki, JWBE, JavierCastro, Jguillermosanchez, Joanjoc, JorgeGG, Joseaperez, Jsanchezes, Kuantto, Kved, Laura Fiorucci, Lolilolaila, Lopezpablo 87, MadJoker, Marco94, Matdroses, Mecamático, Mercurio2054, Mirir, Moondraco92, Moriel, Muro de Aguas, Nagul, Nicadapa, Numbo3, OboeCrack, Onairam309, Paz.ar, Pedro1267, Petronas, Petrus, PhJ, Pownerus, Proximo.xv, Rondador, Rosarinagazo, Tano4595, Template namespace initialisation script, Theklan, Untrozo, Uruk, Xvazquez, Youssefsan, 193 ediciones anónimas

Uranio-235 *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45111502> *Contribuyentes:* Bob Saint Clar, El Varito, JADelmas, Muro de Aguas, Paintman, Ponalgoyya, Tano4595, Xvazquez, 12 ediciones anónimas

Plutonio *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=44734870> *Contribuyentes:* Sergio, Alejandrocra035, Açipni-Lovrij, Balderai, Carabo, Dodo, Eamezaga, Emijrp, Euratom, Furado, Galaxy4, GermanX, Gonzalez.K, Guay, Hispa, Ikertza, J.delanoy, JWBE, Joanjoc, Joseaperez, Jsanchezes, Jynus, Kuantto, Matdroses, Mister, Moriel, Mralfredov, Muro de Aguas, Mutari, Navazuelo, Neokaiser, Paz.ar, Petrus, Pintoandres90, Saperaud, Suruena, Template namespace initialisation script, Tomatejc, Untrozo, Vitamine, 53 ediciones anónimas

Torio *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45079034> *Contribuyentes:* Amadís, Balderai, Beninho, Diegusjaimes, Dodo, Euratom, Feliciano, FulcanelliBLAVATSKY, GermanX, HUB, Hispalois, Ikertza, JWBE, Joanjoc, Jsanchezes, Kuantto, Matdroses, Mister, Moriel, Muro de Aguas, Oxartum, PhJ, Template namespace initialisation script, Untrozo, Xenoforme, Zeroth, 39 ediciones anónimas

Radiactividad *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45182377> *Contribuyentes:* Sergio, Aalvial, Aida Ivars, Airunp, Alberto Lopez Viñals, Alexan, Alexav8, Alhen, Alphabravotango, Alvaro qc, Andreasperu, Angel GN, Angus, Antur, Antón Franchó, Armando-Martin, Arquen, Ars, Ascánder, Astrantia, AstroNomo, Baiji, Balderai, Bechristian95, Bigsus, BuenaGente, CaPiMitZu, Camilo, Carlosperezobles, Cerato, Charlitos, Correogsk, Dangelin5, David0811, Davidmh, Davius, Dianai, Diegusjaimes, Dodo, Dossier2, Dvssolidaridad, Ecks, EduNavarro, Efege, El Moska, Elduende, Elgrissom, Elliniká, Elphreaker, Estonofunciona, Euratom, FAR, Fernando Estel, Fitoschido, Foundling, FrancoGG, Gerard 123, GermanX, Gothmog, Graviton estupefacto, Grillitus, Gsrzdl, Gurgut, HUB, Heavyrock, Hispa, Hprmedina, Humberto, Ingolll, Japuchi, Jclerman, Jgaray, Jkbw, Jorge c2010, JorgeGG, Jorgechp, Julian Mendez, Jurgens, Klystrode, Kuantto, Kved, LP, Leall, Locutus, Locutus Borg, LuchoX, Magister Mathematicae, Maldoror, Manuelt15, Manwë, Marco94, Matdroses, Moriel, Morini, Mortadelo2005, Morthylla, Muro de Aguas, Museovirtual, Mute Erebus, NELS-adolesente, Netito777, Newrednight, Normantg, Nubetostada, Oscar ., Oso Pardo, Pacomeco, Palapa1995, Pedonasa, PedroMCh, PhJ, Pintoandres90, Pit, Pit pitin, Platonides, PoLuX124, Qoan, Queninosta, Richy, Rigalindo, Roberpl, RodríguezGómez, Rondador, Rosarinagazo, RoyFocker, Sabbut, SrDGato, Super braulio, Superandrys, Tano4595, Tarantino, Technopat, Thunderbird2, Tirithel, Tomatejc, Tostadora, Tyncho04, Varano, Vikoand2009, Vitamine, Warlok raider, Will vm, Xenoforme, Xvazquez, Yeza, Zufs, 542 ediciones anónimas

Partícula alfa *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45120797> *Contribuyentes:* 4e to 4e, 4lex, AstroNomo, Davidmh, Davius, Diegusjaimes, Emijrp, Engarbo, Gusbelluwiki, Ingolll, Julian Mendez, LuisArmandoRasteletti, Matdroses, Netito777, PoLuX124, Ppik, RodríguezGómez, Sinman, Spacebirdy, Superandrys, Tano4595, Violetduffy, Xenoforme, Xvazquez, Youssefsan, 35 ediciones anónimas

Rayos gamma *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45154548> *Contribuyentes:* 3coma14, Aitormoreno, Alphabravotango, Armando-Martin, AstroNomo, CSI MIAMI, Caritdf, Cobaltempest, Comae, Cookie, Davius, Deleatur, Diegusjaimes, Eli22, Euratom, Garosuke, Götz, Humberto, Indu, Inefable001, Ingolll, Jcortina, Jmcalderon, JorgeGG, Masterjazz, Matdroses, Mercenario97, Muro de Aguas, Natanworking, Nickelbird, Ortisa, Pablillo, Petrus, Phirosiberia, PoLuX124, Programatesis, Rondador, Rumpelstiltskin, Sanbec, Spacebirdy, Suisui, Superandrys, Taichi, Template namespace initialisation script, Tirithel, Vitamine, Walter Martin Muchino, Walter closser, Wilfredor, Wricardoh, Xuankar, Yeza, Ánforas, 142 ediciones anónimas

Periodo de semidesintegración *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=44930920> *Contribuyentes:* Barcex, Canyq, ElektronikWC, Fitoschido, GermanX, Ingolll, Jclerman, Kuantto, Locos epraix, Muro de Aguas, Raulul, Richy, Rodrigo, Tano4595, Txerokee, Untrozo, W, 39 ediciones anónimas

Residuo radiactivo *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45040100> *Contribuyentes:* Abece, Acastrolorenzo, Alehopio, Andreasperu, Anonimo96, Banfield, Bigsus, Camima, Cavanaugh, Dgarcia29, Diegusjaimes, Dodo, Ecobio, Elsenyor, Euratom, F.A.A, Filipo, Goldorak, HUB, Jclerman, Jgaray, JorgeGG, Joseaperez, Juan castillo R-M, Matdroses, Mortadelo2005, Roberpl, Siabef, Super braulio, Tano4595, Technopat, Telemonica, Tirithel, Vendeae, Wikiléptico, Xenoforme, Yrithinnd, 56 ediciones anónimas

Cementerio nuclear *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=45039991> *Contribuyentes:* Aleuze, Asdf, Bigsus, Dreitmen, Edmenb, Fran89, Goldorak, 24 ediciones anónimas

Abandono de la energía nuclear *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=44958487> *Contribuyentes:* Sergio, Aleuze, Alfredobi, Alhen, Alkayata, Ben, BetoCG, Camboracho, Carabás, Doctor seisedos, Dodo, Ecemaml, El Moska, Eligna, Ensada, Entransito, Er Komandante, Euratom, Gallowolf, Germanxv, Gnapse, Grillitus, Groucho NL, Hanzo86, Hiarmendel, Igor21, Ingolll, J.M.Domingo, JADelmas, Jaontiveros, Javierito92, Jgaray, Jimenoj, Jorge c2010, Juanjfb, Kardrak, Lopezmts, Matdroses, Mckend3, Mirir, Mortadelo2005, Muro de Aguas, Napoleón333, Nicholasraul, Ortisa, Paintman, Pentiumjohn, Rrrr, Savh, Siger, Simeón el Loco, Souleaper, Strigoiul, Sunsinron, Superzerocool, Tano4595, Vivvero, 86 ediciones anónimas

Desmantelamiento de instalaciones nucleares *Fuente:* <http://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=36384685> *Contribuyentes:* Ca in, Ingolll, Migp, Ortisa, Xosema

Fuentes de imagen, Licencias y contribuyentes

Archivo:TrigaReactorCore.jpeg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:TrigaReactorCore.jpeg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: ChNPP, Pieter Kuiper, Tungsten, 1 ediciones anónimas

Archivo:Ikata Nuclear Powerplant.JPG Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Ikata_Nuclear_Powerplant.JPG Licencia: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 Contribuyentes: ChNPP, J o, Jappalang, Newsliner, Theanphibian, Vonvon, 7 ediciones anónimas

Archivo:Susquehanna steam electric station.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Susquehanna_steam_electric_station.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Original uploader was Garthhh at en.wikipedia

Archivo:Centralnucleardelemoniz.JPG Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Centralnucleardelemoniz.JPG> Licencia: GNU Free Documentation License Contribuyentes: User:Frobles

Archivo:Henri Becquerel.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Henri_Becquerel.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Jean-Jacques MILAN

Archivo:Oppenheimer Fermi Lawrence.jpeg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Oppenheimer_Fermi_Lawrence.jpeg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Eusebius, JdH, Joao Xavier, Limojoe

Archivo:Fusion microcapsule.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Fusion_microcapsule.jpg Licencia: desconocido Contribuyentes: Croquant, Earthsound, Kaldari, Mindmatrix, Zereskh, 1 ediciones anónimas

Archivo:RTG before it's insallation on New Horizons.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:RTG_before_it's_insallation_on_New_Horizons.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: GDK, TheDJ, Uwe W.

Archivo:Isotopes and half-life.PNG Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Isotopes_and_half-life.PNG Licencia: Public Domain Contribuyentes: Fffred, Joey-das-WBF

Archivo:Binding energy curve - common isotopes.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Fastfission

Archivo:Fission product-en.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Fission_product-en.svg Licencia: Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Contribuyentes: User:KES47, User:Mubs

Archivo:Nuclear fission.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuclear_fission.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Fastfission

Archivo:Deuterium-tritium fusion.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Deuterium-tritium_fusion.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Wykiss

Archivo:Alpha Decay.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Alpha_Decay.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Inductiveload

Archivo:Beta-minus Decay.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Beta-minus_Decay.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Inductiveload

Archivo:Fission bomb assembly methods.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Fission_bomb_assembly_methods.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Fastfission

Archivo:Teller-Ulam device 3D.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Teller-Ulam_device_3D.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Fastfission

Archivo:TaskForce One.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:TaskForce_One.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: USN

Archivo:NSsavannah-1962.gif Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:NSsavannah-1962.gif> Licencia: Public Domain Contribuyentes: US Government

Archivo:NASA-project-orion-artist.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:NASA-project-orion-artist.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: NASA

Archivo:Nuclear Power History.png Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuclear_Power_History.png Licencia: desconocido Contribuyentes: Dragons flight, JamesEG, Joey-das-WBF, Josette, Santosga, Tetris L, Tosaka, 2 ediciones anónimas

Archivo:Wwer-1000-scheme.png Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Wwer-1000-scheme.png> Licencia: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 Contribuyentes: User:Panther

Archivo:Sucesos-notificables-sp.gif Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Sucesos-notificables-sp.gif> Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Euratom

Archivo:ITER-img 0236.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:ITER-img_0236.jpg Licencia: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Contribuyentes: User:Rama

Archivo:Nif hohlraum.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nif_hohlraum.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Croquant, Glenn, 4 ediciones anónimas

Archivo:MHW-RTGs.gif Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:MHW-RTGs.gif> Licencia: Public Domain Contribuyentes: Honza.havlicek, Ruslik0, Uwe W.

Archivo:Vittrification1.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Vittrification1.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: (at Pacific Northwest National Laboratory)

Archivo:Yucca Mountain waste packages.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Yucca_Mountain_waste_packages.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Coyau, Fastfission

Archivo:IAEABoardOfGovernors.JPG Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:IAEABoardOfGovernors.JPG> Licencia: Attribution Contribuyentes: Dean Calma

Imagen:Crystal Clear app laptop battery.png Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Crystal_Clear_app_laptop_battery.png Licencia: desconocido Contribuyentes: CyberSkull, It Is Me Here, Rocket000

Archivo:Spanish Wikiquote.SVG Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Spanish_Wikiquote.SVG Licencia: desconocido Contribuyentes: User:James.mcd.nz

Imagen:Commons-logo.svg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Commons-logo.svg> Licencia: logo Contribuyentes: User:3247, User:Grunt

Archivo:Kewaunee.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Kewaunee.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: Royalbroil, Theanphibian

Archivo:Cherenkov Wavefront.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Cherenkov_Wavefront.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Inductiveload, User:Pieter Kuiper

Image:Wikibooks-logo.svg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Wikibooks-logo.svg> Licencia: logo Contribuyentes: User:Bastique, User:Ramac

Archivo:Orthorhombic.svg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Orthorhombic.svg> Licencia: GNU Free Documentation License Contribuyentes: User:Stannered

Archivo:HEUraniumC.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:HEUraniumC.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: Original uploader was Zxctypo at en.wikipedia

Archivo:UraniumUSGOV.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:UraniumUSGOV.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: Kluka, Mav, Saperaud

Archivo:U.92.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:U.92.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: Dbc334, Saperaud, Túrelio, דרם לביי, 3 ediciones anónimas

Archivo:Wiktionary-logo-es.png Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Wiktionary-logo-es.png> Licencia: logo Contribuyentes: es:Usuario:Pybalo

Archivo:Nuclear fuel pellets.jpeg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuclear_fuel_pellets.jpeg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Coyau, Crochet.david, D-Kuru, Paddy, TarmoK, Tetris L, Tungsten

Archivo:Pu-TableImage.png Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Pu-TableImage.png> Licencia: GNU Free Documentation License Contribuyentes: User:Ahoerstemeier

Archivo:Pu,94.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Pu.94.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: United States Department of Energy

Archivo:MonaziteUSGOV.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:MonaziteUSGOV.jpg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: Saperaud

Archivo:Th-TableImage.png Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Th-TableImage.png> Licencia: GNU Free Documentation License Contribuyentes: Paddy, Paginazero, Pieter Kuiper, Saperaud

Archivo:Electron shell 090 Thorium.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Electron_shell_090_Thorium.svg Licencia: Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Contribuyentes: User:GregRobson, User:Pumbaa80

Archivo:Alfa beta gamma radiation.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Alfa_beta_gamma_radiation.svg Licencia: Creative Commons Attribution 2.5 Contribuyentes: User:Stannered

Archivo:Radioactive.svg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Radioactive.svg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Bastique

Archivo:Logo iso radiation.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Logo_iso_radiation.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Historicair

Archivo:Alphadecay.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Alphadecay.jpg> Licencia: Creative Commons Attribution 2.5 Contribuyentes: Belfer00, Burkhard HF, Church of emacs, D-Kuru, Inductiveload, Joey-das-WBF, Karelj, Pieter Kuiper, 2 ediciones anónimas

Imagen:Nuvola apps katomic.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuvola_apps_katomic.svg Licencia: GNU Lesser General Public License Contribuyentes: User:Stannered

Archivo:Gammadecay-1.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Gammadecay-1.jpg> Licencia: Creative Commons Attribution 2.5 Contribuyentes: Belfer00, Burkhard HF, Joelholdsworth, Karelj, McSush, Pieter Kuiper, Rfsjim, 1 ediciones anónimas

Archivo:Gamma Abs Al.png Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Gamma_Abs_Al.png Licencia: Public Domain Contribuyentes: H. Paul

Archivo:Gamma Abs Pb.png Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Gamma_Abs_Pb.png Licencia: Public Domain Contribuyentes: H. Paul

Archivo:Cobalt 60.png Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Cobalt_60.png Licencia: Public Domain Contribuyentes: H. Paul

Archivo:SchémaDechetsNucleaires ES.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:SchémaDechetsNucleaires_ES.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: User:Mortadelo2005, User:Nicolas Lardot

Archivo:Transuranic waste casks.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Transuranic_waste_casks.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: National Nuclear Security Administration / Nevada Site Office

Archivo:Sellafield-1515b.jpg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Sellafield-1515b.jpg> Licencia: desconocido Contribuyentes: Amgine, Fintan264, Oneblackline, Theanphibian, Thuresson, 1 ediciones anónimas

Archivo:WIPP-04.jpeg Fuente: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:WIPP-04.jpeg> Licencia: Public Domain Contribuyentes: DOE Photo

Archivo:Hanford Site sign.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Hanford_Site_sign.jpg Licencia: GNU Free Documentation License Contribuyentes: Cacophony, Duesentrieb, Kokoo, TobinFricke

Archivo:Nuclear power station.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuclear_power_station.svg Licencia: Creative Commons Attribution 3.0 Contribuyentes: User:Ichabod Paleogene, User:Twink

Archivo:Nuclear plant at Grafenrheinfeld.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nuclear_plant_at_Grafenrheinfeld.jpg Licencia: GNU Free Documentation License Contribuyentes: Christian VisualBeo Horvat

Archivo:nucleares no gracias3.png Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Nucleares_no_gracias3.png Licencia: Public Domain Contribuyentes: Akinom, Jgaray

Archivo:Radiation warning symbol.svg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Radiation_warning_symbol.svg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Conscious, Fibonacci, Guillom, Jarekt, Nyks, Rfc1394, Silsor, Ssolbergj, Túrelío, Uwe W., W!B., Yann, 8 ediciones anónimas

Archivo:Containment destruction.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Containment_destruction.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Nuclear Regulatory Commission

Archivo:Old RPV.jpg Fuente: http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Archivo:Old_RPV.jpg Licencia: Public Domain Contribuyentes: Nuclear Regulatory Commission

Licencia

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>
