

Introducción

La fisión nuclear es un fenómeno por el cual un isótopo pesado, como el Uranio 235, entra en colisión con un neutrón y se escinde en dos núcleos más pequeños, liberando una enorme cantidad de energía: Así, 500g de material fisionable poseen la misma cantidad energética que 1400 ton de carbón. Esta energía se utiliza tanto en los reactores de propulsión (buques, cohetes) como en las bombas atómicas. También se utilizan reactores nucleares para la producción de plutonio (aplicaciones militares), de neutrones y de isótopos radioactivos.

La combinación de átomos ligeros forman átomos más pesados constituyendo otra reacción llamada fusión nuclear, fuertemente exotérmica (bombas H). Los reactores de fusión presentan la doble ventaja de utilizar un combustible abundante y más barato (el deuterio se encuentra en el agua) y de no ser contaminantes (ausencia de radioactividad). Si embargo, las dificultades técnicas de confinamiento de un plasma calentado a millones de grados Kelvin todavía retrasan la puesta en funcionamiento de los reactores de fusión.

Reactores Nucleares

El reactor nuclear es un dispositivo que permite el desarrollo controlado de una reacción nuclear en cadena, por fisión del uranio u otros elementos fisionables, con producción de energía y elevado número de neutrones libres. La energía producida por un reactor nuclear puede utilizarse directamente como calor o ser transformada en energía eléctrica. Los neutrones pueden emplearse para obtener isótopos radioactivos artificiales con fines experimentales (por ejemplo difracción de neutrones por medio de cristales).

En el núcleo del reactor, donde se encuentra el combustible nuclear (Uranio, Thorio o Plutonio) se produce una reacción en cadena autosostenida, es decir, los neutrones, al producirse la fisión, liberan calor y dos o tres neutrones, algunos de los cuales repiten el ciclo.

Las barras de control absorben neutrones y se suben o bajan para controlar las reacciones que ocurren en el núcleo y la cantidad de calor producida.

Los primeros reactores nucleares a gran escala se construyeron en 1944 en Hanford, en el estado de Washington (EEUU), para la producción de material para armas nucleares. El combustible era uranio natural; y como moderador el grafito. Estas plantas producían plutonio mediante la absorción de neutrones por parte del uranio 238; el calor generado no se aprovechaba.

Reactores de agua ligera y pesada

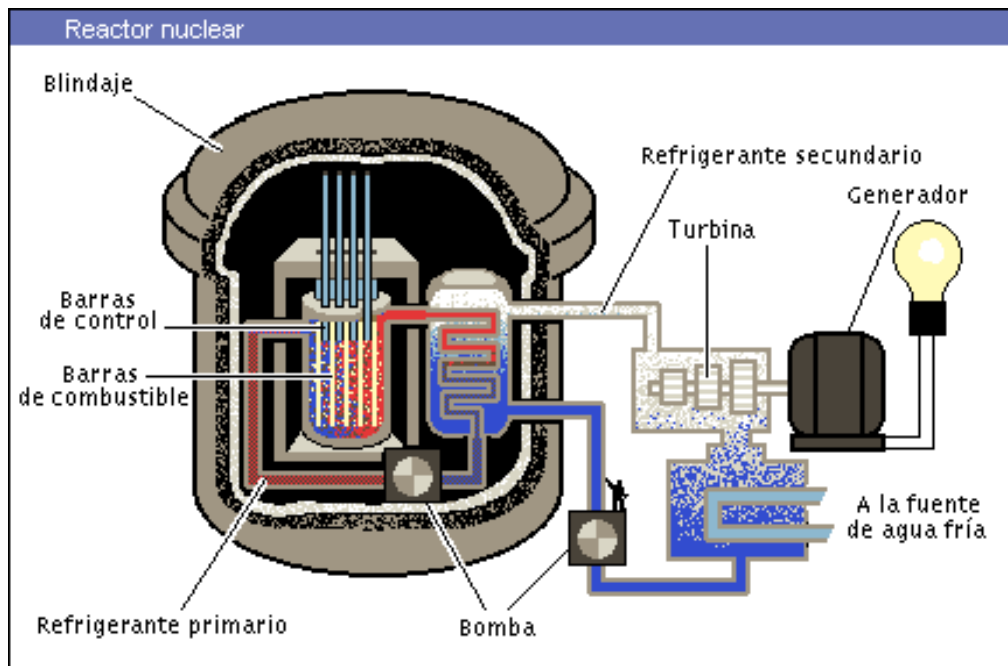
En todo el mundo se han construido diferentes tipos de reactores (caracterizados por el combustible, moderador y refrigerante empleados) para la producción de energía eléctrica. Por ejemplo, en Estados Unidos, con pocas excepciones, los reactores para la producción de energía emplean como combustible nuclear óxido de uranio isotópicamente enriquecido, con un 3% de uranio 235. Como moderador y refrigerante se emplea agua normal muy purificada. Un reactor de este tipo se denomina reactor de agua ligera (RAL).

En el reactor de agua a presión (RAP), una versión del sistema RAL, el refrigerante es agua a una presión de unas 150 atmósferas. El agua se bombea a través del núcleo del reactor, donde se calienta hasta unos 325 °C. El agua sobrecalentada se bombea a su vez hasta un generador de vapor, donde a través de intercambiadores de calor calienta un circuito secundario de agua, que se convierte en vapor. Este vapor propulsa uno o más generadores de turbinas que producen energía eléctrica, se condensa, y es bombeado de nuevo al generador de vapor. El circuito secundario está aislado del agua del núcleo del reactor, por lo que no es radiactivo. Para condensar el vapor se emplea un tercer circuito de agua, procedente de un lago, un río o una torre de refrigeración. La vasija presurizada de un reactor típico tiene unos 15 m de altura y 5 m de diámetro, con

paredes de 25 cm de espesor. El núcleo alberga unas 80 toneladas de óxido de uranio, contenidas en tubos delgados resistentes a la corrosión y agrupados en un haz de combustible.

En el reactor de agua en ebullición (RAE), otro tipo de RAL, el agua de refrigeración se mantiene a una presión algo menor, por lo que hierve dentro del núcleo. El vapor producido en la vasija presurizada del reactor se dirige directamente al generador de turbinas, se condensa y se bombea de vuelta al reactor. Aunque el vapor es radiactivo, no existe un intercambiador de calor entre el reactor y la turbina, con el fin de aumentar la eficiencia. Igual que en el RAP, el agua de refrigeración del condensador procede de una fuente independiente, como un lago o un río.

El nivel de potencia de un reactor en funcionamiento se mide constantemente con una serie de instrumentos térmicos, nucleares y de flujo. La producción de energía se controla insertando o retirando del núcleo un grupo de barras de control que absorben neutrones. La posición de estas barras determina el nivel de potencia en el que la reacción en cadena se limita a automantenerse.



Durante el funcionamiento, e incluso después de su desconexión, un reactor grande de 1.000 Megavatios (MW) contiene una radiactividad de miles de millones de curios. La radiación emitida por el reactor durante su funcionamiento y por los productos de la fisión después de la desconexión se absorbe mediante blindajes de hormigón de gran espesor situados alrededor del reactor y del sistema primario de refrigeración. Otros sistemas de seguridad son los sistemas de emergencia para refrigeración de este último, que impiden el sobrecalentamiento del núcleo en caso de que no funcionen los sistemas de refrigeración principales. En la mayoría de los países también existe un gran edificio de contención de acero y hormigón para impedir la salida al exterior de elementos radiactivos que pudieran escapar en caso de una fuga.

Aunque al principio de la década de 1980 había 100 centrales nucleares en funcionamiento o en construcción en Estados Unidos, tras el accidente de Three Mile Island (ver más adelante) la preocupación por la seguridad y los factores económicos se combinaron para bloquear el crecimiento de la energía nuclear. Desde 1979, no se han encargado nuevas centrales nucleares en Estados Unidos y no se ha permitido el funcionamiento de algunas centrales ya terminadas. En 1990, alrededor del 20% de la energía eléctrica generada en Estados Unidos procedía de centrales nucleares, mientras que este porcentaje es casi del 75% en Francia.

En el periodo inicial del desarrollo de la energía nuclear, en los primeros años de la década de 1950, sólo disponían de uranio enriquecido Estados Unidos y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). Por

ello, los programas de energía nuclear de Canadá, Francia y Gran Bretaña se centraron en reactores de uranio natural, donde no puede emplearse como moderador agua normal porque absorbe demasiados neutrones. Esta limitación llevó a los ingenieros canadienses a desarrollar un reactor enfriado y moderado por óxido de deuterio (D2O), también llamado agua pesada. El sistema de reactores canadienses de deuterio-uranio (CANDU), empleado en 20 reactores, ha funcionado satisfactoriamente, y se han construido centrales similares en la India, Argentina y otros países.

En Gran Bretaña y Francia, los primeros reactores de generación de energía a gran escala utilizaban como combustible barras de metal de uranio natural, moderadas por grafito y refrigeradas por dióxido de carbono (CO2) gaseoso a presión. En Gran Bretaña, este diseño inicial fue sustituido por un sistema que emplea como combustible uranio enriquecido. Más tarde se introdujo un diseño mejorado de reactor, el llamado reactor avanzado refrigerado por gas (RAG). En la actualidad, la energía nuclear representa casi una cuarta parte de la generación de electricidad en el Reino Unido.

En Francia, el tipo inicial de reactor se reemplazó por el RAP de diseño estadounidense cuando las plantas francesas de enriquecimiento isotópico empezaron a proporcionar uranio enriquecido. Rusia y los otros Estados de la antigua URSS tienen un amplio programa nuclear, con sistemas moderados por grafito y RAP. A principios de la década de 1990, estaban en construcción en todo el mundo más de 120 nuevas centrales nucleares.

En España, la tecnología adoptada en los reactores de las centrales nucleares es del tipo de agua ligera; sólo la central de Vandellòs tiene reactor de grafito refrigerado con CO2.

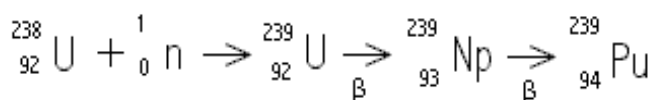
Reactores de propulsión

Para la propulsión de grandes buques de superficie, como el portaaviones estadounidense *Nimitz*, se emplean reactores nucleares similares al RAP. La tecnología básica del sistema RAP fue desarrollada por primera vez en el programa estadounidense de reactores navales dirigido por el almirante Hyman George Rickover. Los reactores para propulsión de submarinos suelen ser más pequeños y emplean uranio muy enriquecido para que el núcleo pueda ser más compacto. Estados Unidos, Gran Bretaña, Rusia y Francia disponen de submarinos nucleares equipados con este tipo de reactores.

Estados Unidos, Alemania y Japón utilizaron durante periodos limitados tres cargueros oceánicos experimentales con propulsión nuclear. Aunque tuvieron éxito desde el punto de vista técnico, las condiciones económicas y las estrictas normas portuarias obligaron a suspender dichos proyectos. Los soviéticos construyeron el primer rompehielos nuclear, el *Lenin*, para emplearlo en la limpieza de los pasos navegables del Ártico.

Reactores autorregenerativos

Existen yacimientos de uranio, la materia prima en la que se basa la energía nuclear, en diversas regiones del mundo. No se conoce con exactitud sus reservas totales, pero podrían ser limitadas a no ser que se empleen fuentes de muy baja concentración, como granitos y esquistos. Un sistema ordinario de energía nuclear tiene un periodo de vida relativamente breve debido a su muy baja eficiencia en el uso del uranio: sólo aprovecha aproximadamente el 1% del contenido energético del uranio.



La característica fundamental de un reactor autorregenerativo es que produce más combustible del que consume. Lo consigue fomentando la absorción de los neutrones sobrantes por un llamado material fértil.

Existen varios sistemas de reactor autorregenerativo técnicamente factibles. El que más interés ha suscitado en todo el mundo emplea uranio 238 como material fértil. Cuando el uranio 238 absorbe neutrones en el reactor, se convierte en un nuevo material fisionable, el plutonio, a través de un proceso nuclear conocido como desintegración(beta). La secuencia de las reacciones nucleares se indica en la siguiente ecuación:

En la desintegración beta, un neutrón del núcleo se desintegra para dar lugar a un protón y una partícula beta.

Cuando el plutonio 239 absorbe un neutrón, puede producirse su fisión, y se libera un promedio de unos 2,8 neutrones. En un reactor en funcionamiento, uno de esos neutrones se necesita para producir la siguiente fisión y mantener en marcha la reacción en cadena. Una media o promedio de 0,5 neutrones se pierden por absorción en la estructura del reactor o el refrigerante. Los restantes 1,3 neutrones pueden ser absorbidos por el uranio 238 para producir más plutonio a través de las reacciones indicadas en la ecuación anterior.

El sistema autorregenerativo a cuyo desarrollo se ha dedicado más esfuerzo es el llamado reactor autorregenerativo rápido de metal líquido (RARML). Para maximizar la producción de plutonio 239, la velocidad de los neutrones que causan la fisión debe mantenerse alta, con una energía igual o muy poco menor que la que tenían al ser liberados. El reactor no puede contener ningún material moderador, como el agua, que pueda frenar los neutrones. El líquido refrigerante preferido es un metal fundido como el sodio líquido. El sodio tiene muy buenas propiedades de transferencia de calor, funde a unos 100 °C y no hierve hasta unos 900 °C. Sus principales desventajas son su reactividad química con el aire y el agua y el elevado nivel de radiactividad que se induce en el sodio dentro del reactor.

En Estados Unidos, el desarrollo del sistema RARML comenzó antes de 1950, con la construcción del primer reactor autorregenerativo experimental, el llamado EBR-1. Un programa estadounidense más amplio en el río Clinch fue cancelado en 1983, y sólo se ha continuado el trabajo experimental. En Gran Bretaña, Francia, Rusia y otros Estados de la antigua URSS funcionan reactores autorregenerativos, y en Alemania y Japón prosiguen los trabajos experimentales.

En uno de los diseños para una central RARML de gran tamaño, el núcleo del reactor está formado por miles de tubos delgados de acero inoxidable que contienen un combustible compuesto por una mezcla de óxido de plutonio y uranio: un 15 o un 20% de plutonio 239 y el resto uranio. El núcleo está rodeado por una zona llamada capa fértil, que contiene barras similares llenas exclusivamente de óxido de uranio. Todo el conjunto de núcleo y capa fértil mide unos 3 m de alto por unos 5 m de diámetro, y está montado en una gran vasija que contiene sodio líquido que sale del reactor a unos 500 °C. Esta vasija también contiene las bombas y los intercambiadores de calor que ayudan a eliminar calor del núcleo. El vapor se genera en un circuito secundario de sodio, separado del circuito de refrigeración del reactor (radiactivo) por los intercambiadores de calor intermedios de la vasija del reactor. Todo el sistema del reactor nuclear está situado dentro de un gran edificio de contención de acero y hormigón.

La primera central a gran escala de este tipo empleada para la generación de electricidad, la llamada Super-Phénix, comenzó a funcionar en Francia en 1984. En las costas del mar Caspio se ha construido una central de escala media, la BN-600, para producción de energía y desalinización de agua. En Escocia existe un prototipo de gran tamaño con 250 megavatios.

El RARML produce aproximadamente un 20% más de combustible del que consume. En un reactor grande, a lo largo de 20 años se produce suficiente combustible para cargar otro reactor de energía similar. En el sistema RARML se aprovecha aproximadamente el 75% de la energía contenida en el uranio natural, frente al 1% del RAL.

Reactores de investigación

En muchos países se han construido diversos reactores nucleares de pequeño tamaño para su empleo en

formación, investigación o producción de isótopos radiactivos. Estos reactores suelen funcionar con niveles de potencia del orden de 1 MW, y es más fácil conectarlos y desconectarlos que los reactores más grandes utilizados para la producción de energía.

Una variedad muy empleada es el llamado reactor de piscina. En el núcleo del reactor hay por cada centímetro cúbico millones de millones de neutrones, dependiendo la cantidad de la potencia. La mayoría de estos neutrones son utilizados para mantener la reacción en cadena. Los restantes son utilizados para la realización de experimentos.

Los reactores de investigación tienen lo que se llaman facilidades de irradiación donde se colocan las muestras a irradiar. Algunas de estas facilidades son posiciones libres dentro del núcleo donde se puede colocar el experimento. Otras facilidades son conductos, ya sea llenos de aire o algún material específico, que conducen los neutrones hacia el lugar o sala de experimentación.

En la mayoría de los casos las muestras sometidas a irradiación de neutrones deben ser analizadas por distintos métodos. Generalmente los reactores de investigación están construidos junto a laboratorios que permiten estos análisis.

La función principal es proveer neutrones para:

- Conocer más acerca de la interacción de la radiación con los materiales.
- Investigar acerca del comportamiento de los neutrones en un reactor nuclear.
- Analizar materiales por técnicas no destructivas.
- Producir radioisótopos de uso medicinal e industrial.
- Investigar fenómenos físicos a nivel del átomo y sus núcleos.
- Desarrollar criterios de seguridad y radioprotección.
- Aprender sobre el manejo de reactores.
- Docencia en el área de la Ingeniería Nuclear y la Física.
- Conocer mejor el comportamiento de los reactores en general.

Combustibles y residuos nucleares

Los combustibles peligrosos empleados en los reactores nucleares presentan problemas para su manejo, sobre todo en el caso de los combustibles agotados, que deben ser almacenados o eliminados de alguna forma.

El ciclo del combustible nuclear

Cualquier central de producción de energía eléctrica es sólo parte de un ciclo energético global. El ciclo del combustible de uranio empleado en los sistemas RAL es actualmente el más importante en la producción mundial de energía nuclear, y conlleva muchas etapas. El uranio, con un contenido de aproximadamente el 0,7% de uranio 235, se obtiene en minas subterráneas o a cielo abierto. El mineral se concentra mediante trituración y se transporta a una planta de conversión, donde el uranio se transforma en el gas hexafluoruro de uranio (UF₆).

En una planta de enriquecimiento isotópico por difusión, el gas se hace pasar a presión por una barrera porosa. Las moléculas que contienen uranio 235, más ligeras, atraviesan la barrera con más facilidad que las que contienen uranio 238. Este proceso enriquece el uranio hasta alcanzar un 3% de uranio 235. Los residuos, o uranio agotado, contienen aproximadamente el 0,3% de uranio 235. El producto enriquecido se lleva a una planta de fabricación de combustible, donde el gas UF₆ se convierte en óxido de uranio en polvo y posteriormente en bloques de cerámica que se cargan en barras de combustible resistentes a la corrosión. Estas barras se agrupan en elementos de combustible y se transportan a la central nuclear.

Un reactor de agua a presión típico de 1.000 MW tiene unos 200 elementos de combustible, de los que una tercera parte se sustituye cada año debido al agotamiento del uranio 235 y a la acumulación de productos de fisión que absorben neutrones. Al final de su vida, el combustible es enormemente radiactivo debido a los productos de fisión que contiene, por lo que sigue desprendiendo una cantidad de energía considerable. El combustible extraído se coloca en piscinas de almacenamiento llenas de agua situadas en las instalaciones de la central, donde permanece un año o más.

Al final del periodo de enfriamiento, los elementos de combustible agotados se envían en contenedores blindados a una instalación de almacenamiento permanente o a una planta de reprocesamiento químico, donde se recuperan el uranio no empleado y el plutonio 239 producido en el reactor, y se concentran los residuos radiactivos.

El combustible agotado todavía contiene casi todo el uranio 238 original, aproximadamente un tercio del uranio 235 y parte del plutonio 239 producido en el reactor. Cuando el combustible agotado se almacena de forma permanente, se desperdicia todo este contenido potencial de energía. Cuando el combustible se reprocesa, el uranio se recicla en la planta de difusión, y el plutonio 239 recuperado puede sustituir parcialmente al uranio 235 en los nuevos elementos de combustible.

En el ciclo de combustible del RARML, el plutonio generado en el reactor siempre se recicla para emplearlo como nuevo combustible. Los materiales utilizados en la planta de fabricación de elementos de combustible son uranio 238 reciclado, uranio agotado procedente de la planta de separación isotópica y parte del plutonio 239 recuperado. No es necesario extraer uranio adicional en las minas, puesto que las existencias actuales de las plantas de separación podrían suministrar durante siglos a los reactores autorregenerativos. Como estos reactores producen más plutonio 239 del que necesitan para renovar su propio combustible, aproximadamente el 20% del plutonio recuperado se almacena para su uso posterior en el arranque de nuevos reactores autorregenerativos.

El paso final en cualquiera de los ciclos de combustible es el almacenamiento a largo plazo de los residuos altamente radiactivos, que continúan presentando peligro para los seres vivos durante miles de años. Varias tecnologías parecen satisfactorias para el almacenamiento seguro de los residuos, pero no se han construido instalaciones a gran escala para demostrar el proceso. Los elementos de combustible pueden almacenarse en depósitos blindados y vigilados hasta que se tome una decisión definitiva sobre su destino, o pueden ser transformados en compuestos estables, fijados en material cerámico o vidrio, encapsulados en bidones de acero inoxidable y enterrados a gran profundidad en formaciones geológicas muy estables.

Seguridad nuclear

La preocupación de la opinión pública en torno a la aceptabilidad de la energía nuclear procedente de la fisión se debe a dos características básicas del sistema. La primera es el elevado nivel de radiactividad que existe en diferentes fases del ciclo nuclear, incluida la eliminación de residuos. La segunda es el hecho de que los combustibles nucleares uranio 235 y plutonio 239 son los materiales con que se fabrican las armas nucleares.

En la década de 1950 se pensó que la energía nuclear podía ofrecer un futuro de energía barata y abundante. La industria energética confiaba en que la energía nuclear sustituyera a los combustibles fósiles, cada vez más escasos, y disminuyera el coste de la electricidad. Los grupos preocupados por la conservación de los recursos naturales preveían una reducción de la contaminación atmosférica y de la minería a cielo abierto. La opinión pública era en general favorable a esta nueva fuente de energía, y esperaba que el uso de la energía nuclear pasara del terreno militar al civil. Sin embargo, después de esta euforia inicial, crecieron las reservas en torno a la energía nuclear a medida que se estudiaban más profundamente las cuestiones de seguridad nuclear y proliferación de armamento. En todos los países del mundo existen grupos opuestos a la energía nuclear, y las normas estatales se han hecho complejas y estrictas. Suecia, por ejemplo, pretende limitar su programa a unos 10 reactores. Austria ha cancelado su programa. En cambio, Gran Bretaña, Francia, Alemania y Japón siguen

avanzando en este terreno.

Conclusiones

- En primer lugar, aprendí el funcionamiento de los reactores nucleares y sus diferentes tipos.
- Otra cosa que aprendí fue que este tipo de energía nuclear basada en la fisión nuclear, a parte de ser muy útil, es costoso, ocupa un combustible que a futuro podrá escasear y los residuos que deja son muy radioactivos y por ende muy peligroso para todo tipo de vida.
- Es interesante conocer como agua a 325°C se mantiene líquida por efecto de la gran presión a que está sometida.
- Si se pudiese avanzar mucho más en los conocimientos científicos se lograría desarrollar los reactores basados en la fusión nuclear, que en un futuro no muy lejano reemplazará a los reactores de fisión y será mucho más beneficioso y más seguros.

1

7

