

# **CENTRALES REPRODUCTORAS**

**Realizado por:**

**Ana Vicenta Sánchez Blanco**

**Noemi Domínguez Márquez**

## 1. INTRODUCCIÓN Y DISEÑO

En un reactor nuclear de fisión se produce, mantiene y controla una reacción en cadena. Para ello se utiliza un combustible, es decir, un elemento fértil que da lugar a uno físil, y cuando un neutrón es capturado por el núcleo de un átomo de material fisionable, el átomo fisiona. La energía liberada por este proceso la aprovechan los reactores de potencia para producir vapor, que a su vez acciona una turbina y genera electricidad.

Solo hay cuatro elementos físilos suficientemente pesados: el uranio-233, el uranio-235, el plutonio-239 y el plutonio-241.

Debe haber un moderador que cumpla con la función de frenar los neutrones producidos en la fisión a través de colisiones entre dos partículas, así pueden interactuar con otros elementos fisionables y mantener la reacción. Un componente muy importante es el refrigerante que conduce el calor generado a una turbina de propulsión para generar la electricidad.

Los reactores se pueden clasificar en tres principalmente:

- *Burner*: quema combustible (térmico).
- *Converter*: transforma combustible (térmico- rápido).
- *Breeder*: produce combustible (rápido).

A su vez se pueden definir:

- Reactores rápidos: aquellos en los que los neutrones producidos en la fisión tienen una energía de 2MeV.
- Reactores térmicos: en los que los neutrones que inducen la fisión tienen energías de 1eV.

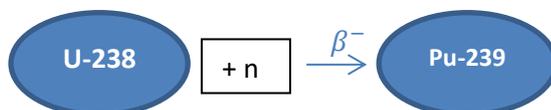
Para poder pasar de una energía a otra se usa el moderador anteriormente nombrado.

Los reactores reproductores, que es el tema a tratar, son aquellos en los que se puede producir más combustible del que se introduce, para ello el número de neutrones por fisión debe ser:

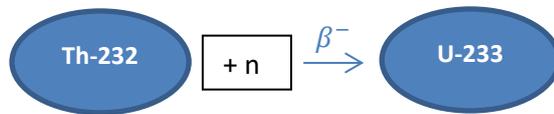
$$\eta = \frac{n^{\circ} \text{ neutrones rápidos producidos}}{n^{\circ} \text{ neutrones absorbidos}} > 2 \rightarrow \text{Razón de conversión: } C = \eta - 1 > 1$$

Se pueden clasificar fundamentalmente en dos tipos:

- *Reactor reproductor rápido (Fast Breeder Reactor, FBR)*: reactor que, después de su carga inicial de combustible de plutonio, sólo requiere como materia prima uranio natural (o incluso empobrecido) como entrada para su ciclo de combustible.



- *Reactor reproductor térmico (Thermal Breeder Reactor)*: un reactor moderado que, después de su carga inicial solo requiere de torio como entrada de su ciclo de combustible.



### **ASPECTOS IMPORTANTES DE AMBOS REACTORES**

El reactor térmico presenta unas ventajas e inconvenientes en cuanto al uso de torio en su ciclo de combustible. Entre las primeras se pueden destacar:

- La posibilidad de utilizar un recurso muy abundante que hasta ahora ha sido de tan poco interés.
- La producción de energía con pocos elementos transuránicos de vida larga en los residuos.
- Reducción de residuos radiactivos en general.

Sin embargo, tiene desventajas mucho más inquietantes:

- Alto coste de fabricación de combustible debido en parte a la alta radiactividad de U-233 en la separación química del combustible de torio irradiado.
- Separado U-233 siempre está contaminada con rastros de U-232 (69 años de vida media, pero cuya productos hijos tales como talio-208 son fuertes emisores gamma de vida media muy corta) haciendo que el ciclo sea difícil de manejar.
- En el residuo aparece Th-228 de alta actividad (emisor alfa con vida media de dos años).

El reactor rápido tiene una característica que lo diferencia claramente de uno térmico; al ser una reacción llevada a cabo por neutrones rápidos de alta energía no necesitan un moderador puesto que ya no requieren que éstos se frenen. Lo cual induce a un diseño más complejo y laborioso debido a que se utiliza como combustible plutonio o uranio mucho más enriquecido; los elementos combustibles son de diámetro más pequeño y están revestidos de acero inoxidable. Y además, como el agua es moderador de neutrones no se puede usar como refrigerante, en este caso se suele utilizar líquido metal (sodio y aleación de plomo-bismuto) o gas (helio y CO<sub>2</sub>). El enfriador es un factor muy importante porque los núcleos de los reactores pueden alcanzar así mayores temperaturas.

La fisión del combustible nuclear, en general, origina productos que absorben neutrones, debido a lo cual es conveniente realizar el reprocesamiento del combustible y así separar cualquier elemento fisil de productos de fisión y otros materiales existentes en el combustible, con el fin de aprovecharlos como nuevo combustible. Sin embargo, esta técnica conlleva el peligro de la proliferación, es decir, un aumento del armamento nuclear que hace crecer el número de países con armas nucleares y el arsenal que disponen. Esto se debe a que esta tecnología puede ser usada para extraer plutonio de calidad para armas. Por esta razón, el FBR es visto como una mayor preocupación.

Para evitar este problema con los desechos se han propuesto sistemas de reprocesamiento acuoso modificados, que agregan reactivos extras, forzando que las impurezas de actínidos

(grupo periódico, tierras raras) menores se mezclen con el plutonio. Tales impurezas importan poco en un reactor rápido, pero hace que la conversión de este plutonio en calidad para armas sea realmente difícil.

Sistemas como el del reactor integral rápido, usa piscinas de cadmio derretido para reprocessar el combustible metálico en el mismo reactor. Además de mezclar los actínidos con el uranio y el plutonio, son compactos y ningún material que contenga plutonio necesita transportarse muy lejos del reactor.

Los reactores térmicos alimentados con torio pueden ser un riesgo de proliferación ligeramente más alto que los que usan uranio debido a que el Pu-239 muy a menudo fallará en fisionarse después de la captura neutrónica y producir Pu-240, el proceso correspondiente en el ciclo del torio es relativamente abstracto. El torio-232 se convierte en U-233, que casi siempre se fisionará exitosamente, lo que significa que existirá muy poco U-234 producido en la camisa de reproducción del reactor, y el U-233 puro resultante será fácil de extraer y usar para armas. Aunque suele ocurrir el proceso opuesto (eliminación de neutrones), produciendo U-232, que tiene un fuerte emisor gamma que complica el manejo seguro de un arma y el diseño de su electrónica. Por este motivo el U-233 no ha sido un elemento con mucha preocupación en este tema.

### **REACTORES REPRODUCTORES RÁPIDOS**

Los reactores reproductores rápidos aprovechan mejor los actuales recursos de uranio natural (incluido el uranio empobrecido procedente de las plantas de enriquecimiento). Producen más plutonio que el que consumen y son capaces de utilizar del 60 al 70% del uranio.

#### ➤ *Núcleo + zona fértil*

En estos reactores, el material fértil (U-238) se encuentra en el núcleo y en la zona fértil alrededor del mismo. El núcleo está constituido por una mezcla de óxido de plutonio y de óxido de uranio (*yellowcake*). La fisión tiene lugar sobre todo en el núcleo del reactor, mientras que la conversión del U-238 en Pu-239, por captura de los neutrones en exceso, se realiza en ambas partes del reactor.

Los conjuntos de elementos combustibles de la zona fértil están formados por barras de un material de composición uniforme. Los del núcleo lo están por barras cuya parte central es de material fisionable, mientras que los extremos son de material fértil. Por tanto, todo el núcleo del reactor está rodeado por zonas fértiles. Una vez extraídos del reactor los conjuntos de elementos combustibles gastados del núcleo y los conjuntos de la zona fértil, el plutonio se separa de los mismos durante las operaciones de reprocessamiento y se utiliza para fabricar elementos combustible destinados a reactores reproductores rápidos o a centrales nucleares de otro tipo.

### ➤ Refrigerante

Como el agua modera rápidamente los neutrones rápidos producidos durante la fisión hasta un nivel energético inferior al necesario para la reproducción no puede utilizarse en los reactores reproductores rápidos. Por tanto, en un reproductor rápido tenemos que extraer una gran cantidad de calor de un pequeño volumen de combustible y a la vez utilizar un refrigerante que no modere los neutrones a un nivel energético inaceptable.

En la práctica, solo algunos metales líquidos o el helio a presión cumplen estas condiciones. La transferencia de calor es mayor con metales líquidos que con el helio a presión, pero este último no modera tanto los neutrones como aquellos. El pequeño núcleo de los reproductores rápidos necesita una elevada densidad de combustible, lo que favorece el empleo de metales líquidos como refrigerantes en el reducido espacio disponible; los grandes núcleos de los reproductores rápidos de centrales industriales requieren menor densidad de combustible y, en este caso, el espacio disponible en el núcleo es suficiente para permitir la refrigeración por helio a presión.

Para los reproductores rápidos que utilizan un sistema refrigerante a base de metal líquido, el sodio es el elemento elegido puesto que puede extraer eficazmente el calor del núcleo compacto del reactor y permanecer en estado líquido dentro de una gama relativamente amplia de temperaturas. El sodio, frente a otros posibles refrigerantes, presenta la mejor combinación de características necesarias:

- Excelentes propiedades de transferencia de calor.
- Necesidad de una baja potencia de bombeo.
- No muy elevadas presiones (puede emplearse prácticamente a la presión atmosférica).
- Capacidad de absorber una considerable energía en condiciones de emergencia (ya que trabaja muy por debajo del punto de ebullición).
- Muy buenas propiedades neutrónicas.

### ➤ Tipos

Hay dos tipos principalmente de reactores reproductores rápidos refrigerados por sodio:

- Tipo piscina.

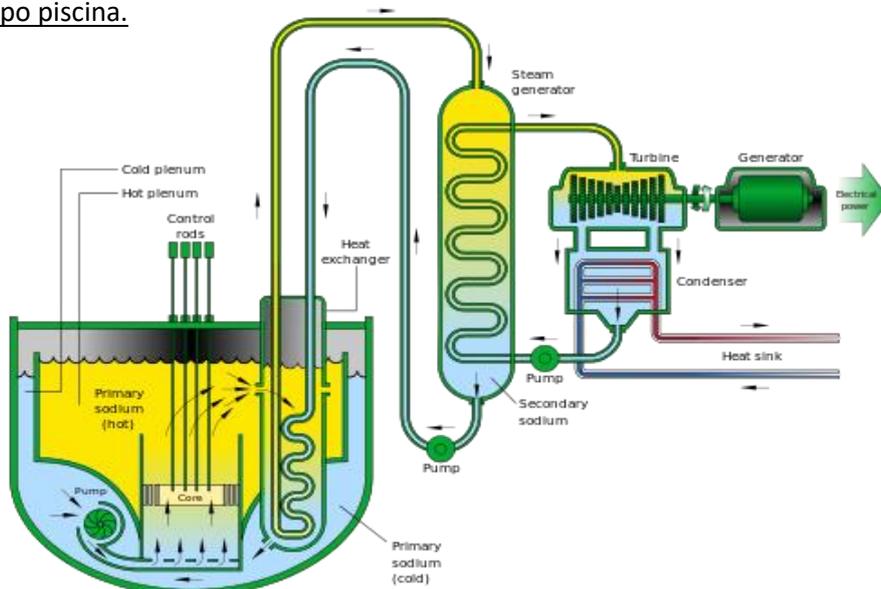


Figura1. [https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor nuclear r%C3%A1pido refrigerado por sodio](https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_nuclear_r%C3%A1pido_refrigerado_por_sodio)

La vasija del reactor, que está llena de sodio aproximadamente a la presión atmosférica, contiene el núcleo, la maquinaria de recarga de combustible, el circuito primario y los intercambiadores intermedios de calor. Este diseño permite reducir la cantidad de tuberías exteriores.

- Tipo circuito.

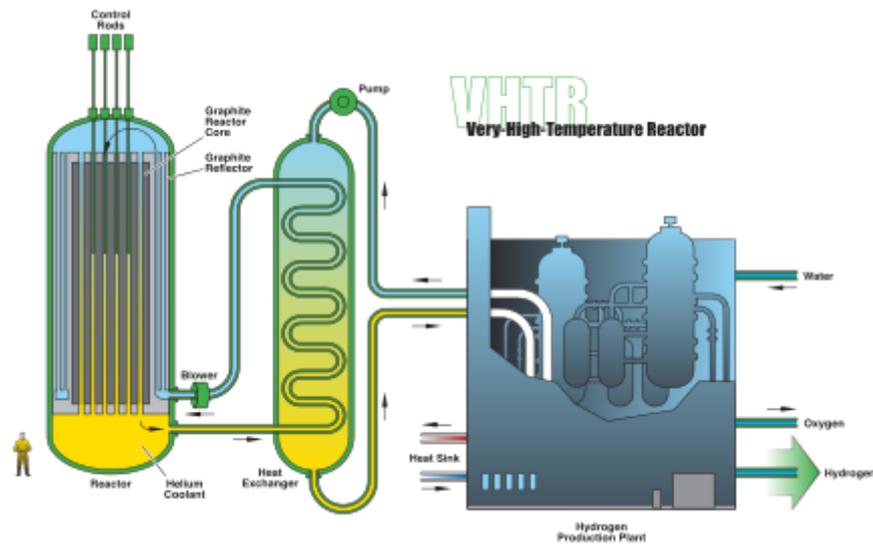


Figura2. [http://www.wikiwand.com/en/Generation\\_IV\\_reactor](http://www.wikiwand.com/en/Generation_IV_reactor)

Dentro de la vasija del reactor solo se encuentra el núcleo, mientras que los componentes del sistema de refrigeración están fuera de la vasija y conectados entre sí por tuberías.

En general, un FBR con refrigeración por sodio tiene el objetivo de minimizar el tiempo de parada para hacer la recarga del reactor. Se suele utilizar un tapón rotatorio en la cubierta de la vasija donde se sitúa la máquina de recarga del combustible del núcleo y también se encuentra los mecanismos de accionamiento de las barras de control, que se deben desconectar del núcleo antes de girar el tapón. Así pues, es posible trasladar el combustible con dicha maquinaria sin verse afectado todo el sistema; en el tipo piscina, el combustible gastado pasa al tanque de almacenamiento provisional que se encuentra dentro de la propia vasija y es trasladado posteriormente al lugar de almacenamiento exterior. Y en el tipo circuito, dicho combustible va directamente del núcleo al almacén exterior.

## 2. HISTORIA

La idea nació tras la Segunda Guerra Mundial donde varios países (India, Rusia, Japón, China, el Reino Unido, Francia o Alemania) se interesaron en ella debido a la creencia de la escasez de uranio. Fueron considerados de gran atractivo debido a su superior economía de combustible: un reactor normal consume menos del 1% del uranio natural que inicia el ciclo del combustible, mientras que un 'reproductor' puede quemarlo casi completamente (menos las pérdidas por reprocesamiento), también genera menos cantidad de desechos para las mismas cantidades de energía. Los reproductores pueden ser diseñados para usar torio, que es más

abundante que el uranio. Pero poco después, tras el descubrimiento de nuevos yacimientos de uranio, muchos de estos países dejaron de interesarse por estos reactores, cayendo su precio e inclinando la balanza hacia la tecnología que hoy es habitual en el mundo de la generación nuclear.

Por ello, de los reactores reproductores construidos solo quedan tres en funcionamiento: **el BN600 en Rusia, FBTR en India y Joyo en Japón**. Su operación siempre ha sido demostrativa o experimental, con potencias nominales muy bajas y pocos ejemplos de producción comercial de energía eléctrica, formando parte de la Generación IV como ya se ha dicho anteriormente. El mayor de todos, el Superphénix francés, producía un máximo de 1200 MWe durante su período de actividad.

### **DESARROLLO HISTÓRICO**

#### ➤ *Francia*

Fue el primer país en interesarse por los reactores reproductores, el primero que construyó fue el Rapsodie en 1967, aunque el más relevante fue el Superphénix, ya nombrado anteriormente, que estuvo en funcionamiento entre 1985 (criticidad) – 1998 (fue apagado el año 1998 debido al compromiso político del gobierno de izquierda).

#### ➤ *Alemania*

Construyó dos reactores reproductores pero uno de ellos nunca llegó a operar. El otro, el KNK-II fue convertido desde un reactor térmico usado como método de estudio del sodio como refrigerante hasta que en 1977 (criticidad) operó por primera vez como reactor rápido y produjo 20 MWe (desmantelado en 1991).

#### ➤ *India*

Es uno de los países que actualmente tiene un reactor reproducción en operación. Es el FBTR que comenzó como reactor de prueba y con el cual se ha desarrollado la tecnología para producir combustible rico en plutonio que pueda ser utilizado en un reactor rápido como es este. Hasta 1985 (criticidad) no comenzó a operar. Pero actualmente siguen investigando en este sector.

#### ➤ *Japón*

Es otro de los países que cuentan con un reactor reproductor actualmente operativo, el reactor Monju en Joyo que se construyó en 1985 – 1991 pero no operó hasta 1994 (criticidad). Pero por unas fugas de sodio se produjo un incendio en el circuito de refrigeración fue cerrado en 1995. Hasta 2010 no se comenzaron con las pruebas (durante las pruebas se cayó una máquina de 3.3 tm sobre el reactor) para final comenzar a producir en 2013. Japón ha sido un país interesado en la propagación de la tecnología con ayuda de nuevas compañías de desarrollo.

### ➤ *Reino Unido*

A pesar de haber construido varios reactores de este tipo, Reino Unido los ha usado básicamente como método de estudio centrándose en la preparación de combustible para las centrales reproductoras. Aunque muchos países han dejado de interesarse por ello, **Reino Unido** ha continuado separando el plutonio de sus residuos nucleares, de manera que tiene casi 120 toneladas de dióxido de plutonio en polvo listas para usarse en unos reactores reproductores que nunca llegaron. Esta enorme cantidad es superior a las reservas de los Estados Unidos y Rusia juntos; desde el Departamento de Energía y Cambio Climático británico estiman que podría generar energía suficiente para alimentar su red eléctrica durante 500 años.

### ➤ *Estados Unidos*

Fue un factor importante para el desarrollo de los reactores nucleares de potencia, ya que en 1951 (hasta 1964) su reactor experimental EBR-I fue capaz de producir la energía suficiente como para alimentar a todo el edificio del reactor. El primer reactor reproductor comercial y el único de Estados Unidos fue la Unidad 1 de 94 MWe de EFNGS (Enrico Fermi Nuclear Generating Station). La central entró en operación en 1963 hasta 1966, cuando debido a las altas temperaturas en el circuito refrigerante producidas por una pieza suelta de zirconio que había bloqueado el sodio. Se encontraron daños parciales por derretimiento de seis de los subconjuntos dentro del núcleo. Este incidente fue la base del libro del periodista investigador John G. Fuller titulado *We Almost Lost Detroit*, en castellano: *Casi Perdimos a Detroit*. Aunque consiguieron eliminar el bloqueo, la autoridad no le permitió renovar la licencia de la central.

### ➤ *Unión Soviética*

El primer reactor de la **Unión Soviética** se construyó en 1973, era un reactor rápido bifuncional BN-350, de 350 MW(e), destinado a la desalación de agua (120 000 m<sup>3</sup> por día) y la generación de electricidad. Aunque se construyeron otros más, el que actualmente está trabajando es el reactor BN-600 que está en funcionamiento desde 1980. Es un reactor rápido refrigerado por sodio y construido en la central nuclear de Beloyarsk (Rusia). Es un reactor de tipo piscina, donde las bombas de refrigerante, los intercambiadores de calor intermedios, las tuberías asociadas y el mismo se encuentran sumergidos en una masa de sodio líquido. En los primeros 15 años de funcionamiento, se han producido 12 incidentes debido a las interacciones sodio-agua procedentes de las roturas de tubos en los generadores de vapor. Pero al menos, todos estos incidentes se clasificaron dentro del nivel más bajo en la Escala Internacional de Eventos Nucleares, y ninguno de los eventos impidió el reinicio de la operación después de las reparaciones. A partir de 2013, el "factor de disponibilidad energética" acumulado registrado por el OIEA (*organismo internacional de energía atómica*) fue del 74,6%.

### **3. FUTURO**

Esta tecnología en sí misma se encuentra en vías de desarrollo. Aunque ya hay reactores de este tipo instalados en la actualidad, se debe seguir indagando y sacar el mayor provecho posible a los reactores rápidos, mejorando su eficiencia.

Una rama innovadora que se está empezando a investigar es el reactor de onda en movimiento. Una empresa de investigación de financiación privada de Estados Unidos, Intelectual Ventures, ha diseñado un reactor que necesita una pequeña cantidad de combustible enriquecido para realizar la reacción en cadena. El objetivo es lograr que un reactor nuclear funcione a base de lo que ahora se considera desecho. Este nuevo reactor convertirá al uranio-238 en combustible utilizable, el plutonio-239, como ya hacen los reactores convencionales. Sin embargo, éstos para poder usarlo requieren de un proceso de eliminación del combustible agotado, fragmentación, y extracción del plutonio por medios químicos (un método pesado que también es el paso principal hacia la construcción de una bomba atómica). El reactor de onda en movimiento produce plutonio y lo utiliza inmediatamente, eliminando la posibilidad de que se desvíe para su uso en armas.

La idea de la onda en movimiento es de principios de los años 90. Sin embargo, esta empresa es la primera en desarrollar un diseño práctico. La misma empresa comenta que está negociando la cuestión de las patentes con los fabricantes de reactores. Quedan algunos temas básicos de diseño por resolver (por ejemplo, modelos precisos de cómo se comportaría el reactor en caso de accidente), pero la empresa está trabajando para que una unidad comercial pueda estar para principios de la década de 2020.

### **4. BIBLIOGRAFÍA**

[http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs\\_trabajo/2015/DIEEET152015\\_FuturoEnergiaNuclear\\_E.Minguez.pdf](http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_trabajo/2015/DIEEET152015_FuturoEnergiaNuclear_E.Minguez.pdf)

<https://es.wikipedia.org/>

AEN/OCDE-OIEA. Report on Uranium Resources, Production and Demand (Informe sobre recursos, producción y demanda de uranio), 1973.

Nuclear Power 1973-2000, WASH-1139(72), diciembre de 1972.

[http://www.wikiwand.com/en/Generation\\_IV\\_reactor](http://www.wikiwand.com/en/Generation_IV_reactor)

[https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor\\_nuclear\\_r%C3%A1pido\\_refrigerado\\_por\\_sodio](https://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_nuclear_r%C3%A1pido_refrigerado_por_sodio)