

## PRIMER EJERCICIO

### GRUPO B - FÍSICA Y TECNOLOGÍA NUCLEARES

#### TEMA 9: Reactores nucleares. Componentes. Tipos.

#### INDICE

<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>2. COMPONENTES .....</b>	<b>1</b>
2.1. <u>COMBUSTIBLE</u> .....	1
2.2. <u>MODERADOR</u> .....	2
2.3. <u>REFRIGERANTE</u> .....	3
2.4. <u>ELEMENTOS DE CONTROL</u> .....	5
2.5. <u>ELEMENTOS ESTRUCTURALES</u> .....	6
<b>3. TIPOS DE REACTORES .....</b>	<b>6</b>
3.1. <u>REACTORES DE AGUA A PRESIÓN (PRESSURIZED WATER REACTOR)</u> .....	6
3.2. <u>REACTORES DE GRAFITO-SODIO</u> .....	7
3.3. <u>REACTOR REPRODUCTOR RÁPIDO DE METAL LÍQUIDO (LIQUID METAL FAST BREEDER REACTOR LBFBR)</u> .....	7
3.4. <u>REACTORES DE AGUA EN EBULLICIÓN (BOILING WATER REACTOR BWR)</u> .....	7
3.5. <u>REACTOR ACUOSO HOMOGÉNEO</u> .....	8
3.6. <u>REACTORES CON MODERADOR ORGÁNICO</u> .....	8
3.7. <u>REACTOR REFRIGERADO POR GAS</u> .....	9
3.7. <u>REACTOR DE GAS DE ALTA TEMPERATURA (HIGH TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR HTGR)</u> .....	9
3.7. <u>REACTOR DE GAS DE ALTA TEMPERATURA</u> .....	9
<b>4. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>10</b>
<b>5. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE TEMARIO .....</b>	<b>10</b>

## **1. RESUMEN**

Un reactor nuclear se define básicamente como una instalación en la que se ha reunido y estructurado convenientemente suficiente material fisionable para iniciar, controlar y mantener de modo estable una reacción en cadena de fisión, extrayendo el calor que se genera en este proceso y produciendo los productos de fisión correspondientes.

El calor generado en un reactor nuclear se transfiere a un fluido de trabajo, y desde esta etapa en adelante las centrales de energía nuclear y las plantas convencionales de energía de combustibles fósiles son esencialmente semejantes.

Existe gran variedad de reactores nucleares en cuanto a su diseño y componentes. Sin embargo todos constan de cinco componentes básicos.

## **2. COMPONENTES**

### **2.1. Combustible**

Es el material que sufre el proceso de fisión, y que se utiliza simultáneamente como fuente de energía y fuente de neutrones para mantener la reacción en cadena.

Se presenta en dos estados:

- a) Sólido, en forma metálica o de óxido con diversas configuraciones como placas, varillas, pastillas, normalmente encapsuladas con otros metales o aleaciones.
- b) Fluido, mezclado con el moderador y refrigerante en forma de solución, suspensión o sales fluidas.

La disposición del combustible se llama núcleo.

El combustible debe protegerse de la evasión y corrosión que sufre durante el funcionamiento del reactor. Para ello se encapsula en vainas de metal de alta hermeticidad de diferentes tipos y formas, lo que además proporciona protección contra la dispersión de los productos de fisión. Estas vainas pueden ser de aluminio, acero inoxidable o zircalloy.

Además en algunos tipos de reactores varias unidades de combustible se agrupan en elementos combustibles, que a su vez se distribuyen en función del tipo de reactor.

Los materiales más utilizados como combustible son:

- a) Uranio metálico. Alta densidad de material fisionable, alta conductividad, mala estabilidad dimensional.
- b) Aleaciones de uranio. Menor densidad.
- c) UO<sub>2</sub> cerámico. Elevada retención de los productos de fisión y alto punto de fusión.

Son requisitos deseables para el combustible:

- Propiedades nucleares adecuadas tales como alta densidad de material fisionable y baja sección eficaz de absorción de neutrones.
- Estabilidad dimensional frente a la temperatura y quemado.
- Resistencia mecánica y a la fluencia.
- Buenas propiedades térmicas: punto de fusión elevado y elevada conductividad térmica.

## **2.2. Moderador**

Es el componente que se introduce en el reactor para reducir la alta energía de los neutrones de fisión (aprox. 2 MeV) a los valores en los que la probabilidad de una nueva fisión sea máxima (menos de 1 eV). En función de su energía los neutrones pueden clasificarse en tres grupos:

Rápidos.  $E > 100 \text{ KeV}$

Intermedios.  $1 \text{ eV} < E < 100 \text{ KeV}$

Térmicos.  $E < 1 \text{ eV}$

En el grupo rápido el proceso de moderación consiste en provocar choques elásticos entre los neutrones y los átomos del moderador. La pérdida de energía es mayor cuanto más parecidas sean las masas de los núcleos que colisionan. Así en este caso los mejores moderadores serán los elementos más ligeros. Además los neutrones rápidos sufrirán procesos de dispersión inelástica y de absorción total, que es el proceso básico de generación de material fisionable a partir de material fértil.

En el grupo intermedio son importantes las reacciones de absorción en especial en la zona de resonancia.

En el grupo térmico, además de las fisiones, pueden producirse absorciones térmicas en el combustible y en otros materiales.

Por tanto las condiciones de un buen moderador serán:

- Alta sección eficaz de dispersión

- Baja sección eficaz de absorción.
- Peso atómico bajo.
- Otros factores no nucleares, como:
  - a) Facilidad de mecanización (si es sólido)
  - b) Disponibilidad (precio, en definitiva)
  - c) Estabilidad frente a la temperatura y la radiación, y resistencia a la corrosión.
  - d) Buenas propiedades de transmisión del calor.

En la práctica se utilizan elementos como H, He, Li, Be, C, O, en materiales como:

1. Agua pesada. Es el mejor moderador, pero resulta muy caro.
2. Be, óxido de Be. Muy bueno, pero tóxico y caro.
3. Grafito. De peores propiedades moderadoras, pero barato y térmicamente estable.
4. Agua. Barato y utilizable además como refrigerante. Tiene como inconvenientes su elevada sección eficaz de absorción, lo que requiere enriquecimiento del uranio, y que se descompone por radiólisis.
5. Parafinas e hidrocarburos. Buenos moderadores, pero inestables frente a las radiaciones.

### **2.3. Refrigerante**

El calor producido en el núcleo debe extraerse por dos razones, una prevenir el daño estructural al núcleo y otra para utilizar la energía generada para producir electricidad.

La función esencial del refrigerante es extraer ese calor. Por ello debe tener gran fluidez a la temperatura de operación del reactor, lo que hace pensar en gases y líquidos.

Los requisitos de un buen refrigerante son:

- Baja absorción de neutrones.
- Baja radiactividad inducida.
- Gran estabilidad frente a una disociación por calor, radiación o bombardeo neutrónico. Además los productos resultantes de la radiactividad inducida deben ser estables o de vida corta para que sea fácil manejar el refrigerante fuera del reactor.
- Desde el punto de vista térmico, alta conductividad térmica y elevado punto de ebullición.

Hasta ahora se han utilizado como refrigerantes:

## 1. Agua.

Buena transmisión del calor, con propiedades físicas y químicas muy bien estudiadas. Baja viscosidad (fácil bombeo). No presenta grandes problemas de corrosión, es barata y abundante.

Entre sus desventajas: necesita como combustible uranio algo enriquecido, activación del oxígeno con emisión de rayos gamma de alta energía y bajo período, activación de impurezas, lo que requiere un tratamiento de purificación, aunque su principal desventaja es su bajo punto de ebullición, lo que requiere mantener el ciclo del refrigerante a presiones muy altas. Esta limitación repercute en una eficacia térmica (relación entre la potencia eléctrica producida y la potencia calorífica generada) del 30 al 35%, ya que ésta aumenta con la mayor temperatura del fluido de trabajo.

## 2. Agua pesada

Tiene esencialmente las mismas propiedades físicas y químicas que el agua ligera, con mejores propiedades de moderación. Permite usar uranio natural, pero es muy cara.

## 3. Gases

Pobre transferencia de calor, a menos que se trabaje a presiones muy altas con las consiguientes dificultades de operación. Se usan H, He y dióxido de carbono.

El hidrógeno es el mejor extractor de calor y moderador, pero su alto riesgo de explosión lo hace inservible.

El helio es un buen refrigerante, inerte, estable a altas temperaturas y no se activa, y por ello se ha empleado en los reactores HTGR. El problema es su escasa disponibilidad.

El CO<sub>2</sub> es aceptable como refrigerante barato y fácil de conseguir, pero su transmisión del calor es baja y requiere altas presiones de operación. Es radiactivamente estable e inerte a la temperatura de operación, pero a temperaturas más altas reacciona con el grafito que le acompaña como moderador produciendo CO.

## 4. Metales líquidos

El mercurio y el galio tienen buenas propiedades térmicas, pero el mercurio tiene una alta sección eficaz de absorción y el galio es muy corrosivo.

## 5. Metales alcalinos fundidos

El sodio es buen transmisor del calor, tiene baja sección eficaz de absorción y no es corrosivo si se mantiene baja la concentración de oxígeno. Su gran desventaja es que reacciona violentamente con el agua, lo que complica el diseño de los intercambiadores de calor, y además presenta la activación de los isótopos Na-22 y Na-24.

El litio tiene mejores características térmicas y neutrónicas que el sodio, pero la alta sección eficaz del Li-6 obligaría a su eliminación con el consiguiente coste.

#### 6. Sales inorgánicas fundidas

Se han ensayado y desechado su uso por su inherente naturaleza corrosiva.

#### 7. Fluidos orgánicos. Difenilos

Tienen buenas características térmicas y nucleares, estabilidad térmica y fácil manejo. Se ha desistido de su uso por su alta inestabilidad frente a la irradiación neutrónica, los productos de su descomposición depositan en las placas del combustible, perjudicando la transmisión del calor.

### 2.4. Elementos de control

El control del reactor se consigue interfiriendo en la economía neutrónica para cambiar el factor de multiplicación efectivo. Para ello se emplean materiales absorbentes de neutrones combinados con el moderador o se modifican las características de fugas del reactor.

El método más extendido es el de la absorción parasitaria. Se emplea boro, cadmio, plata, indio en forma de barras que se pueden insertar aumentando o disminuyendo el factor de multiplicación; o bien añadir al refrigerante un soluto absorbente.

Otro es el método de la fuga, que se utiliza en reactores de moderador líquido ajustando el nivel del moderador en el núcleo (cuando baja el nivel las fugas aumentan).

Otro mecanismo de control es la presencia de material fértil o "blanket". El U-235 es el único isótopo natural fisionable y su proporción en el uranio natural es del 0.7%. Como el uranio natural es relativamente abundante se ha considerado de interés obtener otros isótopos fisionables como Pu-239 y U-233, que se originan a partir de U-238 y Th-232 respectivamente, materiales fértiles que se disponen convenientemente en algunos tipos de reactores. Los reactores que producen más material fisionable del que consumen se llaman reproductores. El material fértil se mezcla con el combustible por todo el núcleo o en capas en una zona exterior, que

además puede servir de reflector.

Colocar un reflector alrededor del núcleo es un método para disminuir la fuga neutrónica. El reflector refleja los neutrones que escaparían del núcleo y los devuelve a su interior. Debe tratarse de un material con alta sección eficaz de dispersión. Los buenos moderadores como grafito, berilio, agua ligera, etc.. son también buenos reflectores. La importancia del reflector radica además en que al reducir las pérdidas se permite que el núcleo sea crítico con un tamaño menor. Además mejora la potencia media que se extrae del reactor, pues incrementa el flujo neutrónico en las zonas exteriores al núcleo.

## **2.5. Elementos estructurales**

Son aquellos componentes, soportes, columnas, guías, elementos de fijación, etc... que proporcionan al núcleo su configuración adecuada. Su función es variada: revestimiento del combustible, dirección del refrigerante, etc...

Los requisitos para los materiales empleados son:

- Propiedades nucleares, tales como baja sección eficaz de absorción y baja radiactividad inducida.
- Resistencia mecánica y a la corrosión, estabilidad frente a la radiación y a la temperatura.
- Buenas propiedades térmicas, tales como elevado punto de fusión y alta conductividad.
- Fácil mecanización: forja y soldadura.

## **3. TIPOS DE REACTORES**

Hay cientos de combinaciones de combustible, moderador, refrigerante, etc.. pero sólo algunos se han utilizado, experimentalmente o para la producción masiva de energía.

### **3.1. Reactores de agua a presión (Pressurized Water Reactor)**

El combustible es dióxido de uranio cerámico ligeramente enriquecido (aprox. 3%). El moderador y refrigerante es agua ligera a una presión de unos 160 Kg/cm<sup>2</sup> para evitar la ebullición. El calor se transfiere del sistema primario al secundario mediante un cambiador de calor (generador de vapor), y por tanto genera vapor en el sistema secundario. El vapor producido en el generador de vapor, está a menor presión y temperatura que el refrigerante primario. En consecuencia, la parte secundaria del ciclo es semejante a la de una planta de combustibles fósiles de presión moderada.

La alta presión y temperatura en grandes caudales presenta problemas de

erosión y corrosión. Las altas densidades de energía logradas con el combustible permiten núcleos muy compactos. La alta presión exige una vasija muy costosa y a prueba de fugas. También son importantes los requisitos sobre la contención. Es el tipo de reactor más extendido actualmente.

### **3.2. Reactores de grafito-sodio**

El moderador es grafito. Se utiliza sodio metálico fundido como transmisor del calor hasta un circuito intermedio también de sodio, que lo transfiere a su vez a un circuito de producción de vapor. El alto punto de ebullición del metal evita la sobrepresión, por tanto, se relajan los requisitos sobre la contención. Además se minimizan los problemas de corrosión.

Por otro lado, las reacciones químicas violentas del sodio y su alta activación requieren un triple sistema de refrigeración y dos intercambiadores de calor.

### **3.3. Reactor reproductor rápido de metal líquido (Liquid Metal Fast Breeder Reactor LMFBR)**

El combustible es uranio altamente enriquecido (15-20%). No utiliza moderador. Emplea sodio como refrigerante y, a través de un circuito intermedio también de sodio, se transfiere el calor a un circuito generador de calor.

El reactor regenerador rápido deriva su nombre de su capacidad para regenerar, esto es, para crear más material fisionable del que consume, y del hecho de que sus neutrones viajan más rápido que los de un reactor térmico.

Los neutrones que escapan inciden en la zona fértil de U-238, que actúa para producir Pu-239. Se diseña para producir más fisionable del que consume. El flujo rápido es poco absorbido, esto facilita la elección de materiales estructurales. La baja absorción de neutrones por los productos de fisión permite un alto grado de frenado.

El núcleo pequeño con área mínima dificulta la transferencia de calor, y la vida corta de los neutrones dificulta el control. Son reactores de alta eficiencia.

### **3.4. Reactores de agua en ebullición (Boiling Water Reactor BWR)**

El sistema nuclear de reactor de agua en ebullición de ciclo directo, es un sistema generador de vapor consistente en un núcleo y en una estructura interna ensamblados dentro de un recipiente a presión, en sistemas auxiliares para satisfacer los requisitos operacionales y de seguridad del reactor nuclear, y en la instrumentación y control necesarios.

El combustible es dióxido de uranio cerámico ligeramente enriquecido (2-4%). Utilizan agua ligera como refrigerante y moderador, pero se permite la ebullición en la propia vasija. La presión de operación es de unos 70 Kg/cm<sup>2</sup>. La presión y temperatura del vapor son similares en toda la vasija. La eliminación de un circuito intermedio simplifica el diseño de la parte convencional (vapor conducido directamente a turbina-condensador). También la formación de huecos en caso de una excursión de potencia confiere a este reactor una importante característica de seguridad intrínseca.

El vapor proveniente del reactor de agua en ebullición es, por supuesto, radiactivo. La radiactividad es principalmente N-16, un isótopo de vida muy corta (7 segundos de vida media), de manera que la radiactividad del sistema de vapor sólo existe durante la generación de potencia. El arrastre de partículas radiactivas de vida larga del sistema primario al sistema turbina/agua de alimentación virtualmente no existe. Ello permite realizar el mantenimiento de los sistemas de condensado y agua de alimentación, y turbina-generator en una parada de forma prácticamente similar a las plantas operadas con combustibles fósiles. Es el segundo tipo de reactor más empleado.

### **3.5. Reactor acuoso homogéneo**

El núcleo lo constituye una masa crítica de disolución de combustible y moderador, y como refrigerante actúa una solución de combustible que se lleva a un circuito generador de vapor. Una zona fértil de Th-232 se utiliza para producir U-233.

El sistema posee un alto grado de estabilidad intrínseca, y no necesita barras de control mecánicas. Se eliminan continuamente los productos de fisión lo que permite quemados altos.

Por otra parte la solución de combustible es altamente radiactiva y corrosiva. Debe mantenerse a presión para evitarse ebullición. Se necesitan las máximas precauciones para impedir la acumulación de material y formación de masa crítica fuera de la vasija. Los requisitos de contención son exigentes puesto que circula material muy radiactivo por el primario y la zona fértil.

### **3.6. Reactores con moderador orgánico**

Se utilizan líquidos orgánicos como moderadores y refrigerantes a presiones moderadas o bajas. El vapor se genera en un circuito secundario a temperaturas más altas que en un PWR (aunque la presión no sea tan alta en el primario).

Los fluidos orgánicos se activan poco y tienen poco poder de corrosión, pero son peores transmisores del calor que el agua, y se descomponen por radiación

originando incrustaciones en el combustible.

### **3.7. Reactor refrigerado por gas**

Utiliza uranio natural metálico como combustible y grafito como moderador y  $\text{CO}_2$  como refrigerante, opera a presiones moderadas y temperaturas relativamente altas. Un circuito secundario de agua produce vapor a alta y baja presión. Los requisitos de contención son moderados y mínimos los problemas de corrosión. El núcleo es grande y baja la densidad de potencia, la recarga de combustible es continua. Las pobres características del  $\text{CO}_2$  como transmisor de calor requieren un alto bombeo, a cambio es barato, seguro y fácil de manejar.

Los reactores de gas avanzados utilizan como combustible  $\text{UO}_2$  de bajo enriquecimiento (1%). El núcleo es menor y mayor su eficiencia.

### **3.7. Reactor de gas de alta temperatura (High Temperature Gas-cooled Reactor HTGR)**

El combustible es uranio altamente enriquecido (20%). Se utiliza helio (siempre permanece en fase gaseosa) como refrigerante para producir vapor en un circuito secundario o alimentar directamente a la turbina. Se consigue alta eficiencia (aprox. 39%) con temperaturas relativamente bajas del gas (760 °C). Es posible un alto grado de quemado y la conversión de material fértil en combustible. Los problemas de corrosión son mínimos por el gas inerte.

En el caso de ciclo directo puede contaminarse la turbina, si falla el combustible. El diseño de elementos combustibles para una vida larga se complica con la alta temperatura de operación. Por otra parte la disponibilidad del helio es escasa.

### **3.7. Reactor de gas de alta temperatura**

Utilizan agua pesada como moderador. El reactor tipo CANDU, de diseño canadiense utiliza  $\text{UO}_2$  sin enriquecer como combustible y dos sistemas separador con agua pesada como moderador y refrigerante. Los tubos con combustible son horizontales, lo que facilita las recargas. Las barras de control son verticales. Todo el reactor está encerrado en una vasija a presión llamada calandria. El sistema en conjunto trabaja como un PWR.

También se ha combinado la moderación por agua pesada con la refrigeración con agua ligera y gas.

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

1. Tecnología de la Energía Nuclear (Redactado por 142 especialistas).  
Douglas M. Considine, editor. Publicaciones Marcombo. 1988.

#### **5. RELACIÓN CON OTROS TEMAS DE TEMARIO**

Este tema tiene relación directa con los siguientes temas de temario:

B-4, B-11, B-12, B-14.