

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

CARACTERISTICAS DE REACTORES DE ESPECTROS NEUTRONICOS
RAPIDOS Y TERMALES, ALIMENTADOS CON PLUTONIO PARA
UN PROGRAMA DE EXPANSION NUCLEAR EN LA
REPUBLICA ARGENTINA

Año 1966

② 85

R. BOIX

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

**CARACTERISTICAS DE REACTORES DE ESPECTROS NEUTRONICOS
RAPIDOS Y TERMALES, ALIMENTADOS CON PLUTONIO PARA
UN PROGRAMA DE EXPANSION NUCLEAR EN LA
REPUBLICA ARGENTINA**

Año 1966

T A B L A S

- TABLA 1 - Valores de $\bar{n} - 1$ en espectros rápidos y térmicos**
- TABLA 2 - Parámetros típicos de reactores rápidos en función del refrigerante**
- TABLA 3 - Características del reactor rápido de referencia**
- TABLA 4 - Características del reactor reproductor térmico eficiente de referencia**

I N D I C E

- 1. INTRODUCCION**
- 2. PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA UTILIZACION DEL PLUTONIO**
- 3. OBJETIVOS**
- 4. REACTORES RAPIDOS**
 - 4.1 Generalidades**
 - 4.2 Elección de los materiales de construcción**
 - 4.2.1 El combustible**
 - 4.2.2 El refrigerante**
 - 4.2.3 Otros componentes**
 - 4.3 Situaciones de compromiso que se presentan en el diseño de reactores rápidos de plutonio refrigerados con sodio**
 - 4.4 Características del reactor de referencia**
- 5. RECICLADOS CON PLUTONIO EN REACTORES TERMICOS**
- 6. REPRODUCTORES TERMICOS EFICIENTES**
 - 6.1 Introducción**
 - 6.2 Generalidades**
 - 6.3 Análisis y conclusiones de diversos estudios sobre reproductores térmicos eficientes**
 - 6.4 Características de los reproductores térmicos eficientes**
- 7. CONCLUSIONES, ALCANCES Y LIMITACIONES**
- 8. BIBLIOGRAFIA**

1. INTRODUCCION

gasolina, madera,

Las reservas mundiales de combustibles orgánicos, (petróleo y carbón) han sido estimadas por E.P. Wigner (1) en 57×10^9 MWh, de las cuales sólo 1/5 resultarían económicamente aprovechables. El consumo mundial anual de energía *el autor lo estima?* puede estimarse en 20×10^6 MWh aproximadamente. De no aumentar este consumo, las reservas de combustibles orgánicos explotables económicamente deberían agotarse en el término de unos 500 años. Por el contrario de perpetuarse la razón incremental del consumo actual, estas reservas no alcanzarían para cubrir el consumo de los próximos 80 años (2).

Este lapso puede prolongarse con el uso de la energía nuclear, sobre todo en la medida en que se realice un consumo racional del combustible nuclear.

X Sin necesidad de recurrir a cifras discutibles sobre las reservas estimadas de material escindible mundiales ^{del país}, que en todo caso son limitadas, un cálculo grosero puede darnos la pauta de que el consumo racional de combustible nuclear, a que nos referimos, debe estar basado en el uso de reactores de altas tasas de conversión. ?

Si llamamos b a la relación de conversión y M es en toneladas la reserva de material fisionable, en principio con el quemado de M podrán obtenerse $b \times M$ toneladas de nuevo material fisionable. Si suponemos que las propiedades nucleares de ambos materiales son similares, $b^2 \times M$ toneladas de nuevos materiales fisionables podrán ser obtenidas por una segunda generación y así sucesivamente.

En último análisis la cantidad de material fisionable disponible será :

$$M + bM + b^2M + b^3M \dots \dots \dots = M \frac{1}{1 - b} \quad \text{si } b \text{ es menor que } 1$$

Si adoptamos para la relación de conversión de reactores térmicos un

valor $\underline{b} = 0,9$, que es muy optimista, tendremos que: $M \frac{1}{1 - b} = 10 M$ y dado que M es aproximadamente 0,7% de las reservas de uranio natural, sólo el 7% de estas sería en principio aprovechable. Debido a las pérdidas en el proceso de separación y a las absorciones que no dan material escindible este 7% en la práctica se reduce al 2%. ?

Es inmediato que en la medida en que deseemos aprovechar al máximo las reservas de uranio natural debemos lograr relaciones de conversión mayores que 1.

Ahora bien, en una reacción en cadena del tipo de las que sobrevienen en un reactor, $\bar{n}$ es el número de neutrones que nacen por cada neutrón que desaparece y dado que es necesario un neutrón para sostener la reacción tendremos $\bar{n} - 1$ neutrones disponibles para los procesos de conversión o breeding.

Debido a las inevitables pérdidas y capturas improductivas de neutrones, sólo es dable esperar $\underline{b}$ mayores que 1 cuando $\bar{n} - 1$ resulte mayor que 1,1.

La tabla 1 da valores aproximados de $\bar{n} - 1$ evaluados para algunos núcleos fisionables en un espectro térmico típico (correspondiente a un reactor de U nat. grafito) y en un espectro rápido (correspondiente a 1 core de 600 litros) (3).

que
Vemos en principio/solamente los reactores térmicos con U^{233} tienen posibilidades de $\underline{b}$ mayor que 1. A su vez los reactores térmicos con Pu^{239} pueden dar valores de $\underline{b}$ interesantes. Pero sin lugar a dudas son los reactores rápidos los que resultan más promisorios en este sentido. Un efecto que no hemos tenido en cuenta y que es la contribución de fisiones rápidas en el U^{238} , contribuye a hacer más marcada esta diferencia a favor de los reactores rápidos.

En estos últimos años se ha tratado de estimar en forma más precisa, las reservas de uranio existentes en nuestro planeta. A la luz de la abundante literatura

tura publicada al respecto es dable afirmar que los reactores rápidos no constituyen la única e inevitable solución al problema de las reservas de uranio. En efecto, sólo si se piensa en utilizar el contenido de uranio del mar, las reservas podrían sostener por varias centurias el consumo de uranio de los reactores a instalarse en el mundo, prescindiendo de los Breeders rápidos y es lógico suponer que en ese lapso, resulten aprovechables otras fuentes de energía. Sin embargo en la medida en que pensemos en reservas económicamente explotables, los reactores rápidos o una combinación de rápidos y convertidores y/o reproductores térmicos eficientes constituyen hoy la solución más viable.

De estas consideraciones podemos obtener las siguientes conclusiones :

- a) Que la energía nuclear tiene un importante rol a cumplir en las próximas décadas : aliviar el consumo de combustibles orgánicos.
- b) Que si el precio del uranio, como parece lógico esperar, aumentara con el costo de explotación, y éste con el consumo, será conveniente realizar un consumo racional del uranio.
- c) Que este consumo racional señala la conveniencia de instalar reactores de altas tasas de conversión y que el plutonio, desde el punto de vista neutrónico, posee al respecto las características más relevantes.
- d) Que el empleo de estos reactores habrá de difundirse cuando resulten económicamente competitivos con los actuales u otras fuentes de energía. Entendiéndose que serán económicamente competitivos cuando igualen o reduzcan el precio del kWh resultante.

2. PERSPECTIVAS FUTURAS DE LA UTILIZACION DEL PLUTONIO

Se ve claramente de las consideraciones que anteceden que el plutonio tiene perspectivas de ser utilizado más racionalmente en los reactores rápidos que en los térmicos. Pero dada la disponibilidad actual del plutonio y el estado de desarrollo de la tecnología de reactores rápidos estos necesitan de los térmicos para su carga inicial y así resulta que desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía nuclear en grandes usinas, ambos tipos de reactores resultan complementarios y será necesaria la construcción de unos y otros.

Parece razonable entonces que los reactores de la primera generación que se instale en el país sean de tipo térmico y que el plutonio producido en ellos sea reservado para su uso posterior en reactores rápidos.

Planteando así el orden de los acontecimientos surge de inmediato la necesidad de analizar las posibilidades futuras de estos últimos y debemos plantear dos alternativas :

- a) Que el advenimiento de reactores rápidos de potencia económicamente competitivos con los térmicos se demore extremadamente.
- b) El caso inverso.

En el primer caso si la instalación de reactores térmicos sigue la ley de demanda de energía nuclear prevista, es dable esperar una acumulación de plutonio mayor que la necesaria y conveniente, en cuyo caso es interesante introducir reactores de agua pesada en la primera generación, dado que este tipo de reactor, además de quemar mejor el combustible que los de grafito-gas, son productores de plutonio más lentos y lo que parece más interesante, como se señala en recientes

trabajos, ofrecen la posibilidad de reciclar con plutonio en condiciones económicas satisfactorias.

En el segundo caso esta etapa de reactores térmicos de agua pesada, no será imprescindible en la primera generación de reactores. Por el contrario, resultaría conveniente disponer de las cargas iniciales para los Breeders rápidos lo antes posible y esto señala como mejor solución a los reactores de grafito. 7
1

No obstante como veremos luego los reactores rápidos que ofrecen posibilidades realmente económicas en cuanto al precio del kWh resultante, tienen en general tiempos de doblaje relativamente altos^y/desde este punto de vista parecería razonable compensar esta deficiencia con el aporte de material fisil producido en convertidores y/o reproductores térmicos eficientes a instalarse en la segunda generación de reactores.

3. OBJETIVOS

Las consideraciones precedentes nos permiten encuadrar este estudio preliminar en el margen de los siguientes tópicos :

- 1) Analizar el futuro de los reactores rápidos convertidores en cuanto a sus componentes y tratar de definir las características más probables de un reactor del futuro próximo.
- 2) Analizar las posibilidades de los convertidores y/o reproductores térmicos eficientes y del reciclado con plutonio en reactores de agua pesada.

Respecto al primer punto podemos decir hoy, a la luz de la abundante bibliografía de estos últimos años, que estamos en condiciones de hacer predicciones que satisfagan ampliamente nuestros objetivos. En cuanto al segundo nos limitaremos a hacer un análisis de los resultados obtenidos hasta el presente, arries-

gando futuras características de estos reactores que nos parecen razonables

4. REACTORES RAPIDOS

4.1 Generalidades

Los reactores rápidos deben su nombre a las elevadas energías medias de sus espectros de neutrones. En el rango de estas altas energías las acciones eficaces de fisión de la mayoría de los núcleos fisiles son mucho más pequeñas que en el rango de energías térmicas. Es lógico entonces que las masas críticas de estos reactores resulten muy superiores a las de sus equivalentes térmicos. Los reactores rápidos requieren así una cantidad de combustible altamente enriquecida muy superior a la requerida por los térmicos para llegar a criticidad. Este hecho y el precio actual de estos combustibles señalan desde el punto de vista económico la necesidad de obtener potencias específicas muy elevadas. (En la medida en que se desee competir económicamente con los reactores térmicos debe pensarse en potencias específicas superiores a los 500 MW/t de combustible fisil).

La mayoría de los problemas tecnológicos que presentan en la actualidad el diseño de reactores rápidos de potencia se originan en esta necesidad y las soluciones adoptadas o previstas hasta el momento condicionan el futuro desarrollo de este tipo de reactor. Por esta razón será útil mencionar alguno de los problemas más salientes :

- a) A fin de lograr grandes áreas de transferencias calorífica combustible-refrigerante, es necesario subdividir mucho al combustible. Las dimensiones tan pequeñas de los elementos combustibles complican y encarecen su elaboración.

- b) El refrigerante debe ser no moderante y de muy buenas propiedades de transferencia calorífica. Los metales líquidos llenan ambos requisitos pero engendran nuevos problemas de corrosión y transferencia de masas.
- c) Aún con elementos combustibles muy espigados, las temperaturas alcanzadas son elevadas y estos tienden a deformarse bajo la presión interna de los productos de fisión gaseosos acumulados. La obtención de elementos combustibles de alto burn-up es uno de los problemas que más preocupan.
- d) El material de las vainas debe ser compatible tanto con el combustible como con el refrigerante, cosa difícil de lograr a altas temperaturas.
- e) Al término de una irradiación de varios meses, el calor liberado en el decaimiento de los productos de fisión es suficiente para que sea necesario seguir refrigerando durante varios días después de parado el reactor. Una pérdida de refrigerante aún en estas circunstancias permitiría la fundición del núcleo y dado que el refrigerante ocupa la mitad del volumen del mismo podría pasarse a una disposición más compacta y por lo tanto supercrítica con las consecuencias previsibles. Es necesario entonces reducir al máximo la probabilidad de pérdida de refrigerante y adoptar otras soluciones tendientes a la estabilidad y seguridad del reactor.

4.2 Elección de los materiales de construcción

4.2.1 El combustible (4)

Por lo que hemos visto (5), el plutonio es el material fisil que produce más neutrones por fisión, por esta razón resulta ser el más interesante para los sistemas convertidores. Todos sus isótopos resultan fisionables en el rango rápido de energías y esto provee la ventaja adicional de que los reactores rápidos pueden di-

señarse para aceptar combustible producido con la irradiación que resulte conveniente en los reactores térmicos.

Dada^s las altas potencias específicas requeridas en los reactores rápidos la vida del núcleo puede resultar inconvenientemente corta. En este sentido es esencial prolongar el burn-up del combustible.

Con el propósito de evaluaciones económicas, a la cantidad de combustible necesaria para alimentar el reactor es menester sumarle la cantidad de com bustible inmovilizada durante el reprocesamiento y esta cantidad es función del tiempo requerido en el reprocesamiento.

Para procesar el combustible irradiado en los reactores térmicos es usual extraer los productos de fisión mediante el uso de solventes. Esto implica períodos largos de decaimiento previo, para evitar la descomposición radioactiva del solvente. En los reactores rápidos, dada las bajas secciones eficaces de captura de los demás componentes del combustible, es posible tolerar mayores actividades debidas a los productos de fisión y acortar así los tiempos de decaimiento previos al uso de solvente.

La posibilidad de eliminar el uso de solventes no es remota y varios métodos piro-metalúrgicos han sido ensayados con éxito para el plutonio.

El otro factor que prolonga la vida del núcleo, es el de conversión interna. A este respecto parecería lógico introducir en el núcleo tanto material fértil como sea posible y eliminar los materiales capturantes improductivos, sin embargo, veremos luego que por razones de estabilidad ésta constituye una situación de compromiso.

Nuestro primer propósito es definir las componentes más razonables para los primeros reactores rápidos de potencia que resulten económicos y las consideraciones precedentes nos llevan a elegir como combustible fisil al plutonio y como elementos fértil al uranio. En esta elección influye también el hecho de que nuestro país no está en condiciones de montar plantas de separación isotópica y que carecemos de información sobre reservas importantes de torio.

El tipo de elemento combustible es otro punto a analizar. Haremos una rápida revisión de sus posibles variantes.

a) Combustibles metálicos

Ellos ofrecen la posibilidad de lograr las mayores relaciones de conversión, dadas las altas concentraciones alcanzables. Desde el punto de vista de su estabilidad se justifican ciertas aleaciones. Por ejemplo el molibdeno mejora las propiedades termo-mecánicas del metal puro y puede ser retenido en la fase gamma en una ancha banda de temperatura. Esta aleación fué usada en el primer núcleo del E. F. F. B. R.. La principal desventaja de la aleación con molibdeno, es que disminuye la relación de conversión interna, respecto a la que brinda el metal puro.

El futuro desarrollo de los combustibles metálicos, parece encaminarse hacia sistemas de aleaciones ternarias, en búsqueda de mayor estabilidad.

Los materiales para el cladding podrán ser aleaciones en torno al neobio, molibdeno, y si progresa su técnica el tungsteno. Por el momento los problemas de estabilidad que presentan son bastante serios.

b) Combustibles cerámicos

Los óxidos y carburos de uranio y plutonio pueden ser sinterizados o compactados para formar elementos combustibles. Estos compuestos tienen excelentes propiedades de estabilidad. Las principales desventajas, son sus bajas densi-

dades y coeficientes de conductibilidad térmica. La consecuente dilución del núcleo, ocasiona una disminución en las relaciones de conversión interna. No obstante, desde el punto de vista económico, los óxidos presentan la ventaja de evitar la reducción en la cadena de reprocesamiento.

Actualmente son los que presentan menores dificultades técnicas de fabricación y tal vez, los más conocidos en cuanto a sus propiedades.

c) Cermets

Los cermets, como su nombre lo indica resultan de dispersiones de cerámicos en metálicos. Las propiedades resultantes constituyen un compromiso entre las de los precedentes. En la actualidad se trata de obtener información de su comportamiento en irradiaciones prolongadas.

d) Combustibles líquidos y disueltos

Se ha pensado, bajo el concepto de reactores homogéneos, en usar combustibles circulantes entre el núcleo y el intercambiador de calor. Se estudiaron sales fundidas, suspensiones en metales líquidos y aleaciones metálicas de bajo punto de fusión.

Sin embargo, aunque la idea ^{es} promisorio, está aún bastante lejos de ser una realidad.

Para nuestro propósito estimamos conveniente que nuestro reactor de referencia use combustibles cerámicos.

4.2.2 El refrigerante

Sin lugar a dudas, la opinión sobre el tipo de refrigerante más apto para los reactores de potencia rápido, está muy dividida. Mientras el sodio es usado en la mayoría de los prototipos construídos hasta el presente, las alternativas

de gas y vapor presentan algunas ventajas interesantes. Existe una abundante bibliografía en torno a estos tres tipos de refrigerante.

Los refrigerantes gaseosos (CO_2 y He) presentan entre otras las siguientes ventajas: alta relación de conversión, baja reactividad asociada y buena distribución de potencia. Consecuentemente es dable esperar tiempos de doblamiento corto, alto burn-up y coeficientes de reactividad por vacío, que aseguren una buena estabilidad del reactor. En adición, este tipo de refrigerantes, permitirá construir plantas más simples y limpias, y en el caso particular del CO_2 algunos países europeos tienen el sostén industrial bien constituido.

El vapor, por su parte, dado su coeficiente de reactividad por vacío negativo, asegura una buena estabilidad. Económicamente presenta la ventaja de que posiblemente pueda ser empleado en sistemas de ciclos directos, con alta eficiencia térmica.

Sin embargo, como sostiene el Dr. J.R. Dietrich de 'Combustion Engineering Inc. "solamente para el sodio, conocemos bien los problemas que pueden presentarse". En efecto, la experiencia acumulada durante los últimos años sobre reactores experimentales refrigerados con sodio, permite hacer proyecciones más realistas y mejor fundamentadas que con cualquier otro tipo de refrigerante.

La tabla 2 permite comparar valores esperables en los parámetros principales de reactores rápidos convertidores de 1.000 MWe. Estos valores (6) han sido obtenidos de los trabajos de P. FORTESCUE, RAYMOND SHANSTROM y HENRY FENECH (gas); M.C. EDLUND, J.H. McMILLAN y DE SCHLUEDERBERG (vapor); y de los estudios de diseño (7) de un reactor de 1.000 MWe de cuatro compañías estadounidenses.

Las consideraciones precedentes nos señalan la elección del sodio como refrigerante para nuestro reactor de referencia.

4.2.3 Otros componentes

Dado el objetivo de nuestro trabajo no se justifica el análisis de otros componentes del reactor.

4.3 Situaciones de compromiso que se presentan en el diseño de reactores rápidos de plutonio refrigerados con sodio

El aumento de la relación U^{238}/Pu^{239} contenidos en el núcleo del reactor redunda en las siguientes ventajas :

- a) Un aumento de la relación de conversión interna que prolonga la vida útil del núcleo.
- b) En cierto modo, contribuye a facilitar el control del reactor, puesto que aumenta la proporción de neutrones retardados [la proporción de neutrones retardados que provee el U^{238} (0,015) es muy superior a la del Pu^{239} (0,0021)].
- c) Disminuye el coeficiente de temperatura debido al efecto Doppler dado que en el U^{238} este coeficiente es negativo.

Todas estas ventajas, lamentablemente, están fuertemente contrarrestadas por el coeficiente de reactividad por vacío del sodio, que se hace positivo y cada vez mayor a medida que aumenta la proporción de U^{238} . No obstante, debido al efecto Doppler, este coeficiente puede ser compensado para relaciones de U^{238}/Pu^{239} debidamente optimizadas, en reactores experimentales.

La situación cambia para reactores de potencia y de los estudios de diseño realizados hasta el presente para reactores de 2.500 MW, se deduce que no es posible hacer negativo este coeficiente en todos los puntos del reactor mediante este procedimiento

El comportamiento del coeficiente de reactividad por vacío de refrigeran-

te en los reactores rápidos de sodio-óxidos, se debe a las siguientes causas :

- a) Cuando disminuye la densidad del refrigerante, disminuye su absorción de neutrones y esto ocasiona un aumento de reactividad.
- b) Cuando disminuye la densidad del refrigerante se endurece el espectro de energía neutrónica. Este hecho afecta a nuestro coeficiente con una magnitud y sentido que depende de las secciones eficaces de dispersión del refrigerante y de la dependencia energética de las capturas y relaciones fisión-captura de los materiales del núcleo. En nuestro caso (sodio-óxidos) este hecho aumenta el coeficiente de vacío.
- c) La disminución de la densidad del refrigerante reduce las secciones eficaces de transporte en el núcleo y esto disminuye la reactividad. Este efecto depende del gradiente del flujo y es nulo en el centro y máximo en los bordes del núcleo.

Una vez elegido el refrigerante, las posibilidades de diseño para hacer negativo al coeficiente de vacío se reducen a trabajar sobre las causas b) y c). Al respecto se abren una serie de caminos y es ésta la razón por la que nos detuvimos en analizar este punto.

La posibilidad de reemplazar el U^{238} por el menos fisiónable Th^{232} , que resulta interesante para pequeños núcleos metálicos, no resuelve el problema por sí sola en el caso de los reactores de potencia. En nuestro caso la descartamos por las razones ya expuestas con respecto al torio.

Otra forma de ablandar el espectro, la constituye la adición de moderadores en el núcleo. El uso de óxidos de berilio ha sido previsto en algunos diseños recientes. Sin embargo, su efecto sobre el coeficiente, sensible, en la medi-

da que reemplace material combustible. Esta solución no parece conveniente desde el punto de vista de las relaciones de conversión y de los tiempos de doblaje.

La solución que resulta más positiva, es la de trabajar sobre la geometría del diseño, a fin de aumentar el escape de neutrones del núcleo. Para aumentar la relación superficie/volumen en el núcleo, se han estudiado cilindros chatos, anillos y núcleos cruciformes. La posibilidad de varios anillos concéntricos de núcleo y blanket, es interesante, pero implica desacoplar el núcleo y obliga a un complicado control por zonas. Esta solución jerarquiza la misión de convertidor del blanket.

La adopción en mayor o menor escala de cada una de estas soluciones implica diseños particulares y por supuesto distintas performances del reactor.

Desde el punto de vista del rol que debe desempeñar un reactor rápido en el programa de expansión nuclear, existe la siguiente alternativa. Si se desea un reactor excelente como reactor, con tiempos de doblaje muy reducidos, debe sacrificarse el precio del kWh resultante en la planta. Nuestro objetivo es fijar las características de un reactor de referencia que sea competitivo con los reactores térmicos en cuanto a la generación de energía y cuyos tiempos de doblamiento resulten razonables.

4.4 Características del reactor de referencia

Para fijar las características de un reactor de referencia para nuestro estudio, existen dos criterios extremos: adoptar un diseño, factible en su totalidad, teniendo en cuenta el estado actual del desarrollo de las distintas técnicas involucradas; o tratar de extrapolar el futuro desarrollo de dichas técnicas, con el

objeto de predecir las características de un reactor del futuro. Entre ambos extremos está situado el criterio adoptado, es decir, se prevé la evolución de algunas técnicas, como la fabricación de elementos combustibles cerámicos de burn-up razonables, pero en todos los casos respecto a diseños probados en escala experimental.

Las características fijadas para nuestro reactor de referencia no significan en modo alguno un cálculo de diseño previo, más bien constituyen el resultado del análisis de varios diseños publicados en EE.UU. y Europa, realizado con miras a su aplicación en nuestro país.

En las características elegidas, se ha buscado más que su autocompatibilidad, el mejor ajuste a las de los primeros reactores de potencia que se fabriquen comercialmente. En este sentido y basados en los programas de expansión nuclear vigentes en el mundo, estimamos que este tipo de reactores saldrá al mercado alrededor de 1985 (3) (8).

Aún con estas limitaciones, la dispersión de las características futuras de estos reactores está tan condicionada a la solución de algunos problemas tecnológicos que hemos resuelto exponer los resultados del uso de dos temperamentos. En la Tabla 3 la columna de la izquierda corresponde a un criterio conservativo mientras que la columna de la derecha presenta datos más optimistas.

5. RECICLADOS CON PLUTONIO EN REACTORES TERMICOS

La posibilidad de reciclar con plutonio el combustible de reactores térmicos puesta de manifiesto en estos últimos años (9), ha desatado recientemente una oleada de investigaciones al respecto. Existen en principio dos tendencias :

- a) Adaptar los diseños de reactores térmicos con uranio enriquecido con el objeto

de poder reemplazar el U^{235} por Pu^{239} , sustentada por algunas firmas estadounidenses; y

- b) Diseñar reactores con un criterio completamente distinto y tendientes a aprovechar las ventajas y reducir los inconvenientes del Pu^{239} .

Desde el punto de vista de un programa nuclear de largo alcance, la tendencia señalada en primer término no permite augurar cambios trascendentales (11). Las características económicas y las cantidades de combustibles puestas en juego no varían fundamentalmente (12). No ocurre lo mismo con el diseño específico de reactores térmicos con plutonio y en especial en los de altas tasas de conversión. Por esta razón trataremos por separado este tipo de reactor.

6. REPRODUCTORES TERMICOS EFICIENTES

6.1 Introducción

La utilización del uranio natural como combustible en grandes reactores de potencia tiene sentido en la medida en que parte del U^{238} que se convierte en plutonio sea a su vez quemado.

Mientras que en los reactores rápidos de plutonio se obtienen tasas de conversión mayores que la unidad con relativa facilidad, hasta ahora los diseños de reactores térmicos con combustible plutonio presentan en general bajas relaciones de conversión.

Como ya hemos señalado el advenimiento de los reproductores rápidos en escala comercial es esperado a mediados de la década del 80. La producción de Pu debida a la operación continua de los reactores térmicos instalados y a instalar se en el mundo hasta esa fecha, sumada a las reservas bélicas creará en algunos

países problemas económicos de almacenamiento del plutonio producido. Este hecho no constituye en sí un inconveniente insalvable sin embargo la moderna tendencia de reciclar con plutonio que según se espera ha de ponerse en vigor a partir de 1970 traerá aparejada un aumento en la proporción de isótopos pesados en los stock de plutonio. La considerable radiactividad de estos isótopos y su poca estabilidad particularmente el Pu^{241} cuya vida media es de unos 13 años, hace que no puedan ser almacenados indefinidamente.

Esta situación ha promovido varios estudios tendientes a buscar condiciones de diseño favorables para obtener altas tasas de conversión en los reactores térmicos. Los resultados de estos estudios y en particular la confianza de algunos países en el futuro de los reactores que hemos llamado reproductores térmicos eficientes nos señalan la necesidad de considerarlos más detalladamente.

6.2 Generalidades

Desde el punto de vista de las relaciones de conversión la mayor desventaja del ciclo de combustible uranio-plutonio frente al torio- U^{233} en reactores térmicos es el reducido valor de $\bar{n} - 1$ (Ver tabla 1) de este ciclo, situación que empeora a medida que se endurece el espectro. Por el contrario la mayor ventaja dejando de lado las reservas cubicadas y el desarrollo de su tecnología, es el elevado factor de fisiones rápidas obtenible con el U^{238} comparado con el del torio.

Las fisiones rápidas en el U^{238} no solamente proveen una fuente económica de energía sino que también proveen neutrones de fisión que teóricamente aumentan el $\bar{n}$ efectivo del plutonio. Existen sin embargo algunas limitaciones prácticas. En la medida que decidimos aumentar el factor de fisiones rápidas

necesitamos diseñar elementos combustibles de gran diámetro con alto contenido de U^{238} y en sistema submoderado, pero desgraciadamente estas son las condiciones que disminuyen el $\bar{n}$ del plutonio. En adición y en contraste con los reactores de torio - U^{233} , donde pueden alcanzarse altas relaciones de conversión prácticamente con cualquier moderador, solamente el agua pesada parece dar a nuestro ciclo relaciones de conversión mayores de la unidad.

No obstante y como ya hemos señalado las reservas naturales de torio y de U^{238} en nuestro país nos señalan por ahora como más conveniente el ciclo con plutonio.

La necesidad en este caso de evitar el endurecimiento del espectro nos obliga a mantener frío al moderador y esto sugiere aislar al refrigerante mediante el sistema de tubos de presión. Este hecho abre para el refrigerante distintas posibilidades, agua, vapor o gas.

En la actualidad hay varios reactores con este principio en estado de investigación y desarrollo.

6.3 Análisis y conclusiones de diversos estudios sobre reproductores térmicos eficientes

Las relaciones de conversión en los reactores térmicos alimentados con plutonio están gobernadas fundamentalmente por el valor de $\bar{n}$ efectivo alcanzable promediado en el espectro neutrónico del reactor.

Los estudios realizados en cuanto a esos valores señalan sin lugar a duda al agua pesada como el moderador más apto para alcanzar altas tasas de conversión. Estas tasas de conversión disminuyen marcadamente con el endurecimiento del espectro (aumento de temperatura y capturas del medio moderador) y con-

secuente resulta conveniente obtener sistemas bien moderados y mantener al moderador a bajas temperaturas. Como ya lo señalamos este concepto del moderador frío puede lograrse en sistemas heterogéneos con diseños de tubos de presión.

También hemos señalado la necesidad de aprovechar al máximo las fisiones rápidas del U^{238} . Estas fisiones se favorecen en la medida en que el espectro neutrónico tenga una componente rápida considerable y la concentración de U^{238} en el combustible sea elevada. Estas necesidades resultan de hecho incompatibles con las precedentes, sin embargo es posible reconciliarlas agrupando el combustible en racimos muy compactos y de grandes diámetros y mediante el uso de combustibles metálicos. Ya hemos señalado en el caso de los reactores rápidos, los problemas que aún subsisten con los combustibles metálicos. En adición estos diseños exigen la construcción de tubos de presión de grandes diámetros que limitan la potencia específica.

Siguiendo las normas señaladas se han obtenido radios de conversión próximos a la unidad mientras que con el uso de combustibles metálicos se han obtenido factores de fisión rápida del orden de 1.10.

Si se disminuyen las capturas parásitas adoptando para tubos de presión y cladding mejores materiales pueden asegurarse radios de conversión inicial superiores a la unidad. El uso del berilio para los tubos de presión ha permitido aumentar estos radios hasta un 8% y un aumento adicional del 5% pudo obtenerse en sistemas refrigerados con helio y cladding de berilio (13). Sin embargo las potencias específicas alcanzables con helio son inferiores a las del agua y solamente se hacen comparables para clusters de grandes diámetros y presio-

nes muy elevadas.

El vapor ya sea pesado o liviano desde el punto de vista de la potencia específica exige altas presiones y velocidades de circulación muy bajas (para mantener el consumo de las bombas dentro de un límite razonable). Aún así su comportamiento no supera al del helio. Sin embargo los estudios realizados con vapor son los que arrojan relaciones de conversión más elevadas.

En cuanto a las dificultades técnicas de construcción de estos reactores si bien no entraremos en detalle, diremos que son considerables. No obstante se espera alcanzar niveles de potencia para centrales comerciales en la próxima década.

6.4 Características de los reproductores térmicos eficientes

Si bien se cuenta en la actualidad con algunas verificaciones experimentales la mayoría de los datos disponibles sobre características de estos reactores derivan de estudios teóricos y por lo tanto afectados de la imprecisión de los datos de secciones eficaces usadas. Existen algunas incongruencias entre los $\bar{n}$ calculados para el Pu^{239} en base a secciones de eficaces medidas y a su medición directa.

Asimismo los datos disponibles sobre secciones eficaces en el espectro ^{epiternal}son incompletos. Estas circunstancias afectan los resultados en sólo algunos por cientos.

Asimismo en los datos que damos consignados en la Tabla 4 como posibles para reactores de este tipo a partir del año 1975, no se tienen en cuenta mayormente los efectos del escape de neutrones, y capturas en los elementos de control. En reactores de agua pesada de grandes dimensiones, el escape es en general reducido y puede hacerse despreciable mediante el uso de blankets bien diseñados. En cuanto a los elementos de control pueden ensayarse soluciones como el uso de gaps de aire y desplazamientos del U^{238} . De esta forma las capturas en los ele-

mentos de control pueden reducirse considerablemente.

Si bien se prevé una considerable evolución de este tipo de reactores en las próximas décadas la misma está más limitada intrínsecamente que las de los reactores convertidores rápidos.

Las características que damos en la tabla 4 no responden a un criterio conservativo.

Nuestros elementos de juicio son en este caso más limitados que en el caso de los rápidos, no obstante los valores expuestos pueden dar una idea optimista de las posibilidades de este tipo de reactor.

7. CONCLUSIONES, ALCANCES Y LIMITACIONES

Las conclusiones de este estudio están sintetizadas en las características de los reactores de referencia dadas en las tablas 3 y 4.

Este trabajo tiene el propósito de definir las características más razonables esperables de los reactores que pueda incorporar el país en las próximas décadas.

El problema de la posibilidad de desarrollo de dichos reactores en el país no se ha analizado, y hemos tomado como base para el estudio el estado actual de la tecnología universal en torno a estos reactores.

El criterio adoptado para decidir el tipo de reactor que puede resultar más conveniente al país, gira en torno a la economía del combustible. Esta adopción se justifica por el hecho de que nos referimos a reactores del futuro y en este sentido resultan más importantes las posibilidades de evolución que desde el punto de vista teórico tiene un determinado tipo de reactor que las conquistas circunstanciales debidas a la optimización de un diseño determinado. Concretamente y para dar un

ejemplo creemos que si bien ningún diseño factible en la actualidad de un reactor reproductor rápido puede competir económicamente con un grafito-gas esta situación debe cambiar en el futuro porque la economía del combustible desde el punto de vista teórico favorece a los reactores rápidos. En este sentido son reveladoras las palabras de M. Tanguy (14) respecto al futuro de la energía atómica en Francia :

" Hoy grafito-gas, mañana reproductores rápidos, pero en el interín pueden presentarse diversas soluciones circunstanciales". Nosotros hemos fijado "el mañana" basado en diversos planes de expansión como más próximo a partir de 1985 y dimos características de los reactores rápidos para esa fecha. En la creencia de que en el interín los reactores térmicos con altas tasas de conversión pueden constituir una alternativa interesante , analizamos sus posibilidades y arriesgamos algunas cifras que constituyen órdenes de magnitud.

La época en que un determinado tipo de reactor comienza a difundirse , depende de sus posibilidades económicas y en ellas es factor preponderante el estado de desarrollo de su tecnología. Por esa razón hemos realizado una rápida revista al estado actual de las diversas técnicas involucradas y hemos previsto futuros desarrollos . Negar la posibilidad de avances positivos es ser injustos con el esfuerzo tecnológico que se realiza en nuestros días , por el contrario la creencia de que todos los problemas actuales pueden ser solucionados completamente , puede llevarnos a equívocos considerables. Nuestra adopción de un criterio intermedio parece así bastante subjetiva y se ha tratado de justificarla a la luz de la información disponible. No obstante, debe aclararse que la validez de los resultados expuestos es perentoria y deberán ser actualizados a medida que avance la tecnología implicada.

BIBLIOGRAFIA

- (1) WIGNER E. P. - Science and Engineering . Vol.6 , pp 420-432.
KUHN O. W. et al., "Energy from Uranium and Coal Reserves"- TID-8307 (1960).
- (2) PALMER R. G. y PLATT , "Fast Reactor" - Temple Press.
- (3) BUSSAC, et al. , "Utilisation du Plutonium dans les Reacteurs a Neutrons Thermiques et dans les Reacteurs a Neutrons Rapides" - EUR-1841 J.
- (4) "Proceedings Commercial Fabrication of Pu Fuel" - HW-82400.
- (5) CROUTHAMEL Carl E. et al., "Capture to Fission Ratios of U^{233} , U^{235} , U^{238} and Pu^{239} in E BR-1 Mark III" - Nuclear Science and Engineering- Vol.21 (1965).
- (6) DIETRICH J. R., FORTESCUE P., EDLUND M. C. et al., "Evaluating coolants for Fast-Breeders Reactors" - Nucleonics - Vol.23 No.5 (Mayo 1965).
- (7) ALLIS-CHALMERS Co. - ACNP 64503 .
GENERAL ELECTRIC Co. - GEAP 4418.
WESTINGHOUSE ELECTRIC Corp. - WC AP 3251.1
COMBUSTION ENG. INC. - CEND 200 .
- (8) WRIGHT J. H. , "Fast Breeder Programs" - ANL 6792
USAEC - "Fast Breeder Reactor Program" (Julio 1963).
"The European Community Activities in the Fast Breeder Field" - VIII Congresso Nucleare, Roma (1963).
"German Work on Fast Reactors" - Nuclear Energy - (Febrero 1966).
LAITHWAITE J. M., "The U. K. Fast Reactor Programme", "VIII Cong. Nuc. Roma (1963)
- (9) "Plutonium Fuel for Thermal Reactors" - Conferencia de GAST Paul F. en la ANS Chicago, (21 enero 1965).
- (10) "Prospects for Plutonium Recycle" - Nucleonics (mayo 1966).
- (11) STOLLEN S. M. , "Plutonium Recycling" - Nuclear Energy, (Enero 1966).
- (12) BAKER A. R. y ROSS R. W., "Comparison of the value of Pu and U isotopes in Fast Reactors" - ANL 6792.
- (13) SRIKANTIAH G. y CHERNICK J. "Plutonium Fueled Thermal Reactor with High Conversion Ratios" - Nuclear Science and Engineering Vol.21 (1965).
- (14) TANGUY PIERRE, Directeur Adj. de la Direction Piles Atomiques Sanclay.

TABLA 1

Isótopo	U ²³³		U ²³⁵		U ²³⁸		Pu ²³⁹		Pu ²⁴⁰		Pu ²⁴¹	
Espectro	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R
$\bar{n} - 1$	1.19	1.31	1.05	1.00	-	0.37-1	0.87	1.47	-	0.62	1.18	1.55

TABLA 2

Refrigerante		Combustible	Conversión total	Tiempo de doblamiento años	Potencia específica MW _t /kg fisil	Densidad de potencia MW _t /l
Gas		Oxido	1.5	10	0.7	0.2
		Carburo	1.6	4.5	1.75	0.65
Vapor	H ₂ O	+ -	1.1	17	0.9	0.9
	D ₂ O	- -	1.3	16	0.9	0.9
Sodio	A	Oxido	1.3	18.5	0.6	0.3
	B	Oxido	1.3	14	0.9	0.3
	C	Carburo	1.5	11	0.4	-
	D	Carburo	1.5	5	1.7	0.7

TABLA 3

REACTOR	REPR. RAPIDO	REPR. RAPIDO
Combustible	$\text{PuO}_2\text{-UO}_2$	PuC-UC
Refrigerante	Na	Na
Blanket	U empobrecido	U empobrecido
Potencia térmica	2.500 MW_t	2.500 MW_t
Potencia eléctrica	1.000 MW	1.000 MW
Potencia específica	0,35 MW/kg fisil	0,5 MW/kg fisil
Burn-up	50.000 $\text{MW}_t \text{ d/t}$	60.000 $\text{MW}_t \text{ d/t}$
Tiempo de doblaje	14 años	6 años
B. R. {		
Interno	1,025	1,32
Externo	0,315	0,30
Total	1,34	1,61
CARGA INICIAL		
Comb. {		
Pu	3,59 t	2,64 t
Pu fisil	2,85 t	2,11 t
U	21,56 t	19,30 t
Pu^{239}	76,7 %	76,7 %
Pu^{240}	20,1 %	20,1 %
Pu^{241}	2,8 %	2,8 %
Pu^{242}	0,4 %	0,4 %
Blanket	122 t	103 t
PRODUCCION (anual)		
Pu	303,6 kg	440 kg
Pu fisil	203,5 kg	295 kg
Pu^{239}	62 %	62 %
Pu^{240}	31 %	31 %
Pu^{241}	5 %	5 %
Pu^{242}	2 %	2 %
NUCLEOS PESADOS (a procesar por año)		
Combustible	15 t	14 t
Blanket	48 t	42 t

TABLA 4

REACTOR	REPR. TERMICO	REPR. TERMICO
Combustible	U empob. -Pu ²³⁹ aleación (1,3%)	U empob. -Pu ²³⁹ aleación (1,5%)
Refrigerante	H ₂ O	Helio
Moderador	D ₂ O	D ₂ O
Material del cladding y tubos de presión	Zirconio	Berilio
Blanket	U empobrecido	U empobrecido
Potencia térmica	2.500 MW	2.500 MW
Potencia eléctrica	1.000 MW	1.000 MW
Potencia específica	1,2 MW/kg Pu	0,9 MW/kg Pu
Burn-up	25.000 MWd/t	25.000 MWd/t
Tiempo de doblaje	22 años	14 años
B. R. {		
Interno	0,97	1,12
Externo	0,11	0,12
Total	1,08	1,24
CARGA INICIAL		
Comb. {		
Pu ²³⁹	850 kg	1.100 kg
U	66 t	75 t
D ₂ O	80 t	85 t
Blanket	70 t	60 t
PRODUCCION (anual)		
Pu ²³⁹	42 kg	97 kg
NUCLEOS PESADOS (a procesar por año)		
Combustible	16 t	15 t
Blanket	14 t	12 t