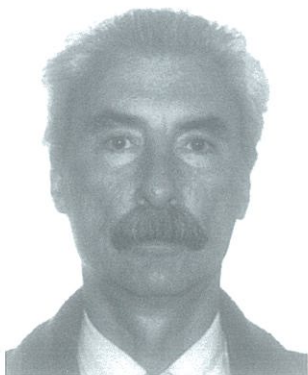




José Ramón LEÓN SANZ
Ingeniero Industrial por la ETSII de Madrid (1973). Diplomado en Ingeniería Nuclear por la JEN (1974).
En 1974 se incorpora a C.N. Almaraz donde en la actualidad desempeña el cargo de Jefe de la Sección de Estudios Nucleares dentro de la Subdirección Técnica, controlando las funciones relativas al combustible nuclear.



Alberto PÉREZ NAVAS
Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona (1973). Diplomado en Ingeniería Nuclear por la JEN (1974). Master en Ingeniería Nuclear por el MIT (1977).
En 1974 se incorpora al proyecto de C.N. Ascó estando en la actualidad desempeñando el puesto de Jefe de Ingeniería del Núcleo dentro de la Dirección Técnica, siendo responsable del aprovisionamiento, la gestión de combustible y la modelización termohidráulica de planta.



José María FILELLA FARGAS
Ingeniero Industrial por la ETSII de Barcelona (1975). Ingénieur en Génie Atomique por Saclay (1977).
En 1982 se incorpora a C.N. Vandellós. Desde 1986 ocupa el cargo de Jefe del Grupo de Combustible y Análisis Nuclear dentro de la Dirección Técnica, realizando funciones de gestión de combustible y coordinación de análisis neutrónicos y termohidráulicos.

ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE COMBUSTIBLE

J. R. LEÓN - A. PÉREZ - J. M. FILELLA

INTRODUCCIÓN

La generación de energía en las centrales nucleares debe ajustarse a necesidades de diferentes entidades o grupos, como por ejemplo:

- Empresas propietarias de las centrales, que deben coordinar a través de sus Comités de Gestión, los intereses particulares de cada una de ellas en los temas relativos a la producción de energía.
- La entidad responsable de la red eléctrica nacional (REEEA), que controla la producción en función de los periodos punta y valle de la demanda eléctrica.
- Organismo regulador (CSN), que con su normativa de seguridad, puede requerir inspecciones o revisiones que pueden impactar en la producción de las centrales nucleares.

Las centrales nucleares operan en Base justificándose por su bajo coste variable de producción, su no excesivamente alta potencia instalada (7.000 MW), así como la alta fiabilidad de suministro. Estas características de la red nacional, condicionan el que la mayor parte de los reactores nucleares, operen en ciclos de duración superior a 1 año (típicamente de 18 meses), a pesar del ligero encarecimiento del coste del combustible nuclear, ya que este modo de operación, maximiza la utilización nuclear dada la reducción del número de paradas para recarga.

No obstante lo anteriormente mencionado, la duración del ciclo de combustible no puede sobrepasar un cierto límite, debido por una parte a razones técnico-económicas y, por otra, a requisitos de vigilancia periódica impuestos por el CSN.

DISEÑO DE ELEMENTOS DE COMBUSTIBLE

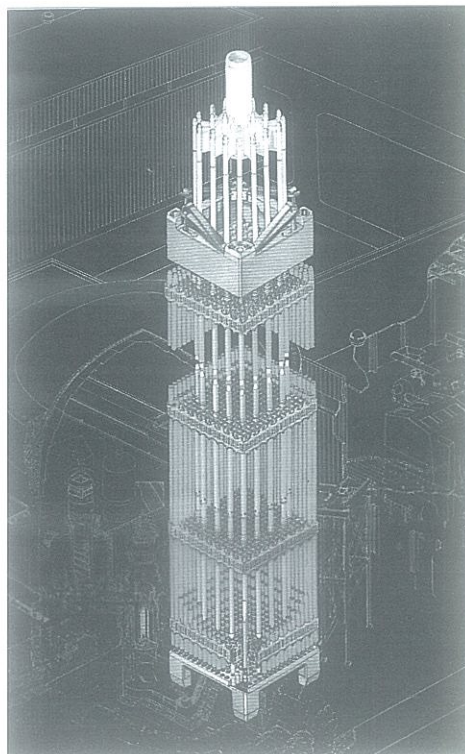
Descripción del Elemento

El combustible utilizado en las centrales PWR españolas (Figura 1), está for-

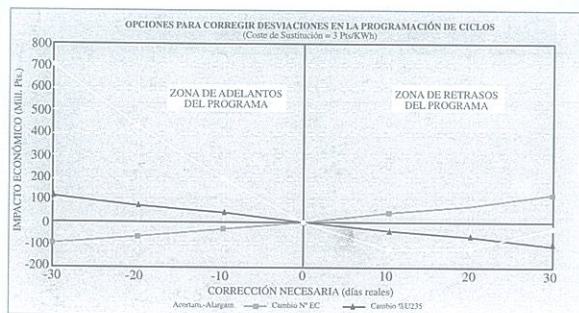
mado por pastillas cerámicas cilíndricas de óxido uranio enriquecido hasta el 5% de 8,192 mm de diámetro y 9,83 mm de altura, no estando contemplado el uso de óxidos mixtos. Las pastillas están dispuestas en columnas dentro de vainas de zircaloy formando barras de combustible, las cuales a su vez se disponen en elementos combustibles dispuestos en haces.

El espaciado entre las barras se mantiene por medio de rejillas dispuestas a lo largo de la longitud del elemento. Las rejillas están unidas a los tubos guía, que unidos a los cabezales superior e inferior forman el esqueleto del elemento combustible. Las rejillas, en

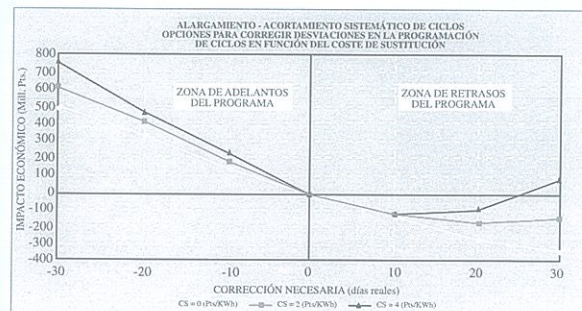
FI



CORRECCIÓN (días reales)	Ajuste-Along. (M.d.Ps.)	Nº F.C. (M.d.Ps.)	% E2M (M.d.Ps.)
-30	699	-92	129
-20	531	-72	74
-10	242	-41	33
0	0	0	0
10	-132	26	-32
20	-429	74	-67
30	-84	148	-196



CORRECCIÓN (días reales)	CS=0 (Ps./KWh) (M.d.Ps.)	CS=2 (Ps./KWh) (M.d.Ps.)	CS=4 (Ps./KWh) (M.d.Ps.)
-30	513	582	760
-20	344	410	461
-10	166	192	225
0	0	0	0
10	-146	-150	-125
20	-264	-177	-86
30	-317	-146	64



F II

F III

la longitud activa, y los tubos guía son de zircaloy para minimizar la absorción de neutrones, mientras que las rejillas superior e inferior son del tipo antienganche de inconel. Los tubos guía están destinados a la inserción de las arañas de las barras de control, en aquellos elementos que las alojan. En lo restantes elementos se insertan tapones de flujo o conjuntos de venenos consumibles. El tubo guía central de cada elemento puede alojar las cámaras de fisión de la instrumentación intranuclear que se utilizan para realizar periódicamente mapas de flujo.

Los cabezales, que son desmontables, son de acero inoxidable. El cabezal inferior es de tipo filtro para retener las partículas que podrían dañar a las vainas. Con esta disposición del combustible pueden alcanzarse quemados por elemento superiores a 45.000 MWd/tU, pudiendo llegar hasta quemados por barra de orden de 60.000 MWd/tU conservando la integridad de las vainas. Para poder mejorar la economía neutrónica usando ciclos de bajas fugas y para compensar el exceso de reactividad en ciclos largos, se utilizan venenos consumibles en forma de pastillas anulares de carburo de boro dispuestas en barras de venenos consumibles, con vaina de zircaloy. Esta barras se disponen en forma de haces de venenos y se alojan en los tubos guía.

Mejoras del Diseño Básico del Elemento

a) Rejillas Intermedias Mezcladoras de Flujo.

Para hacer el flujo más turbulento y mejorar la transferencia de calor, se utilizan en algunas Centrales rejillas intermedias de zircaloy, las cuales tienen como misión favorecer la mezcla y permitir aumentar la extracción de calor sin superar el límite de ebullición nucleada, lo que se traduce en un aumento de márgenes para el diseño nuclear.

b) Venenos Integrados.

Está en fase de licenciamiento el uso como venenos integrados de pastillas

de una mezcla de óxido de gadolinio hasta el 8% con óxido de uranio ligeramente enriquecido en algunas de las barras, con lo que se consigue un efecto similar a las barras de venenos consumibles, pero sin generar el residuo adicional del conjunto de venenos consumibles. Este sistema permitirá en un próximo futuro ubicar venenos en cualquier posición del núcleo con lo que se gana en flexibilidad para el diseño aunque se pierde en flexibilidad de gestión ya que el veneno residual continúa en el elemento en futuros ciclos.

c) Mantos Axiales.

Para mejorar la economía neutrónica y el coste del ciclo de combustible, está en estudio la utilización de reflectores axiales, lo que supondría una disminución del enriquecimiento en las zonas superior e inferior del núcleo. El efecto es un ahorro en el enriquecimiento medio necesario para una determinada producción, si bien el enriquecimiento máximo y la fluencia máxima debe aumentar, lo cual presenta un problema para las centrales que se hallen cerca de los límites de diseño.

d) Materiales de Vaina Mejorados.

Se han desarrollado nuevos materiales de vaina más resistentes a la corrosión, particularmente el Zirloy, que pueden permitir, en un próximo futuro, aumentar los quemados de descarga alcanzables hasta 55.000 MWd/tU por elemento, lo cual será necesario para acometer con garantías ciclos más energéticos y para poder, a su vez, efectuar aumentos de la potencia nuclear sin aumentar el tamaño de las recargas.

e) Rejillas Antidebris.

Los elementos actualmente en uso poseen ya un cabezal inferior con filtro antipartículas, sin embargo éste no retiene al 100% los posibles débris. Para aumentar su eficacia, se ha diseñado una nueva rejilla adicional al objeto de aumentar la retención del filtro. Esto es debido, a que la gran mayoría de defectos detectados en el combustible en las centrales nucleares españolas, han sido causados por partículas que han

perforado las vainas en la zona entre el cabezal inferior y la rejilla más próxima.

f) Nuevo Diseño de Rejillas.

El diseñador del combustible está probando un nuevo diseño de rejilla que permitirá, en un próximo futuro, mejorar la transferencia de calor al refrigerante sin necesidad de utilizar rejillas mezcladoras de flujo. Esto evitará pérdidas de carga adicionales permitiendo un aumento de los márgenes de diseño nuclear.

g) Otras Mejoras en Estudio.

Se consideran continuamente mejoras en la forma de las pastillas, tamaño del grano, diseño de las rejillas y cabezales, tratamientos térmicos, forma de los muelles, materiales de vaina, geometría del huelgo, etc., que permiten asegurar, que además de las mejoras explicitadas anteriormente, el producto sufre una evolución positiva de forma continua.

PLANIFICACIÓN DE CICLOS. GESTIÓN EXTRANUCLEAR

Una vez definido el tipo de ciclo que se va a operar debe realizarse una primera evaluación de las necesidades de combustible, tanto en lo referente al tamaño de la recarga como al grado de enriquecimiento promedio del uranio contenido en el mismo, estableciéndose una planificación preliminar de ciclos.

Con la planificación indicada, así como con las previsiones de indisponibilidad (tanto en operación como en recarga), y a partir de una fecha de referencia, se debe comprobar la concordancia entre las fechas de parada que resultan de la generación de ciclos sucesivos (esquema de multiciclos), y las fechas de parada que las empresas propietarias indican en sus planes de producción eléctrica a medio plazo. Estas últimas pueden venir condicionadas por diferentes requerimientos de la Administración (REESA, CSN), o por otras razones técnico-económicas.

Debido a variaciones en la disponibilidad de la planta respecto a las previsiones, ó como consecuencia de la

actividad de definición de la configuración del núcleo que típicamente se efectúa ciclo a ciclo, con un mayor grado de detalle que el aplicado en la definición del esquema de multiciclos, pueden producirse desviaciones entre las fechas de parada derivadas del análisis de ciclos y las indicadas por las empresas propietarias. Una actividad permanente debe ser por lo tanto la comparación y ajuste de los programas mencionados. Esto se consigue, básicamente, de dos maneras generales:

- Modificando los parámetros de las recargas afectadas, ya sea el número de elementos de combustible o el enriquecimiento de todos o alguno de los mismos.
- Modificando la duración de alguno o algunos de los ciclos afectados, es decir acortando o alargando la duración nominal del mismo. Un alargamiento de ciclo puede conseguirse bien disminuyendo la temperatura media del moderador o, mas comúnmente en los reactores de agua a presión, disminuyendo la potencia térmica del núcleo "coastdown".

La primera de estas actuaciones esta condicionada por preavisos contractuales, por lo que requiere un mayor plazo en su decisión que la segunda que puede decidirse durante la operación del ciclo implicado, aunque controlando las condiciones de la Evaluación de Seguridad del mismo (quemados de descarga, ventanas de quemado, etc). En general, si la indisponibilidad real de la planta es mayor que la prevista al desarrollar el esquema de multiciclos, se hará necesario adelantar la programación de ciclos para hacerla coincidir con la de referencia. Esta desviación puede corregirse acortando la duración de alguno o algunos ciclos, disminuyendo el número de elementos combustibles o disminuyendo el enriquecimiento de futuras recargas. Al contrario, si la indisponibilidad real de la planta fuese menor que la estimada al desarrollar el esquema de multiciclos de referencia, se haría necesario retrasar el programa de ciclos para corregir dicha desviación. Esto puede conseguirse alargando la duración de alguno o algunos ciclos, aumentando el número de elementos combustibles o aumentando el enriquecimiento de futuras recargas. En la Figura II se recoge el impacto económico de cada una de estas opciones en función de la corrección necesaria.

De dicha figura se deduce que para desviaciones que hicieran necesario adelantar la programación de ciclos, la mejor opción sería la reducción del número de elementos combustibles de la recarga, mientras que para desviaciones que hicieran necesario retrasar la programación de ciclos, la opción del alargamiento sería la más idónea para cortos retrasos, siendo el aumento del enriquecimiento en el combustible la más idónea para retrasos largos. En general cualquier opción que tienda a

incrementar el quemado de descarga del combustible reduciría el coste del mismo y a la inversa.

Una estrategia de operación que se considera importante y que flexibiliza la corrección de desviaciones en la programación de ciclos, es el alargamiento sistemático o alargamiento contemplado en el diseño de los mismos. La importancia de este concepto puede comprenderse mejor con el siguiente ejemplo. Si no se ha programado alargamiento en el diseño específico de un ciclo y si se diera la circunstancia de que la indisponibilidad de la planta fuese mayor que la prevista, el cumplimiento de la fecha de parada exigiría necesariamente acortar la duración nominal del ciclo.

La curva correspondiente a Acortamientos - Alargamientos de la Figura II ilustra también este comentario. Sería más idóneo diseñar el ciclo en el "plateau" de dicha curva, es decir incluyendo un cierto alargamiento programado (coste optimo y zona de estabilidad para absorber cambios), que hacerlo en el origen de coordenadas, es decir sin incluir alargamiento programado, donde además de incurrir en un mayor coste existe mucha mayor sensibilidad a cualquier cambio no previsto en la programación.

Adicionalmente a la flexibilidad mencionada para mantener fechas de parada, el alargamiento sistemático tiene otros aspectos que deben ser evaluados para su posible aplicación. Por un lado se consiguen los requisitos de duración del ciclo con un menor enriquecimiento, traduciéndose en un ahorro de combustible nuclear. Por otro lado, la operación a potencia térmica reducida durante el periodo de alargamiento, introduce una pérdida de disponibilidad programada y de rendimiento eléctrico, que en función del coste de la energía de sustitución, tendrá un extracoste de combustible convencional. En la Figura III se recoge en función del coste de sustitución el efecto económico global que tendrían estas dos componentes sobre un alargamiento de ciclo, incluyéndose también como referencia el impacto económico de un acortamiento de ciclo.

Existen adicionalmente una serie de ventajas técnicas derivadas de la operación con alargamiento sistemático, como son:

El quemado nominal del ciclo es inferior al que se obtendría sin alargamiento sistemático (menor reactividad inicial), por lo que se gana margen en parámetros que pueden ser críticos a comienzo del ciclo, principalmente si se operan ciclos largos como coeficiente de temperatura del moderador, concentraciones de boro, etc.

Al conseguirse los requisitos de duración del ciclo con un menor enriquecimiento, se gana margen a criticidad en las instalaciones de almacenamiento, resultando de importancia principalmente cuando se manejan altos enriquecimientos.

Los quemados de descarga del combustible se reducen ligeramente. Adicionalmente, cuando se efectúa el alargamiento por "coastdown" de potencia, dichos quemados en su "tramo" final se alcanzan con potencias reducidas, ganándose margen a los límites de diseño mecánico.

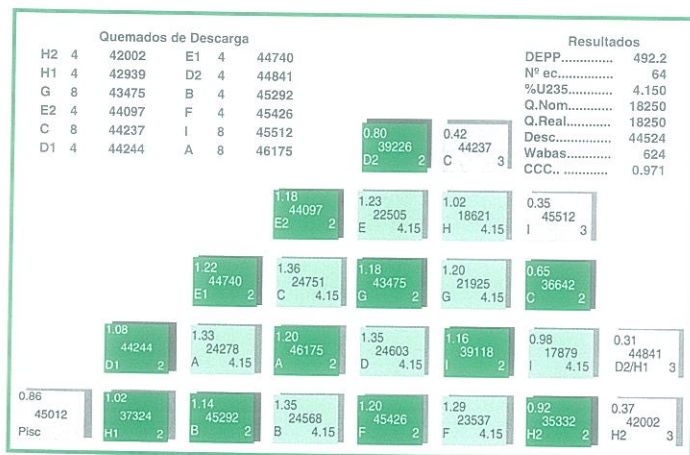
DISEÑO DE NUCLEOS. GESTION INTRANUCLEAR

Cualquiera que sea la solución en principio adoptada para el ajuste en las fechas de parada para recarga, debe llevarse a cabo una labor más relacionada con la configuración del núcleo del reactor (Figura IV) con el fin de determinar la energía total extraíble y las condiciones en que va a ser cedida por todos y cada uno de los elementos de combustible en un proceso de optimización de la generación de la energía.

Dicho proceso consiste en la modelización neutrónica del reactor en el que se incluye: el total de elementos de combustible disponibles (es decir, los no irradiados constituyentes de la nueva recarga así como el conjunto de elementos ya irradiados en ciclos anteriores) que deberán completar las posiciones del núcleo, el moderador neutrónico, boro disuelto (en reactores PWR), materiales estructurales, barras de control, los efectos de presión y temperatura, etc.

No existe una técnica universal e infalible para definir la ubicación de los elementos combustibles en un núcleo que proporcione un esquema viable, entendiéndose por tal aquel que cumpla nuestras necesidades energéticas del ciclo actual manteniendo los márgenes de seguridad tanto durante la operación normal como en posibles escenarios de incidentes o accidentes predefinidos y sin poner en entredicho el diseño del siguiente ciclo. Hay, sin embargo, unas normas generales cuyo seguimiento ayuda a desestimar configuraciones totalmente inútiles. Es conveniente, por ejemplo, diseñar el núcleo manteniendo unos ejes de simetría que nos permitan trabajar con un cuarto o un octavo de núcleo (caso de los reactores de agua a presión): se consigue, entre otras ventajas, una mayor velocidad en el cálculo de las distribuciones neutrónicas así como minimizar los efectos negativos que, una vez en operación, puedan resultar de la detección de un desequilibrio en algún cuadrante del núcleo. Otra precaución a tomar es no ubicar excesivamente juntos todos los elementos no irradiados a fin de no provocar un pico de potencia en su zona a principio del ciclo o, por el contrario, no abusar de los venenos consumibles pues podrían ocasionar problemas de picos hacia la segunda mitad del ciclo en cuestión que inutilizarían también el esquema analizado.

Una primera conclusión es, pues, que



F IV

mucho mas importante que la bondad de las herramientas de diseño neutrónico con las que se trabaje es la formación y experiencia de un diseñador quien debe realizar un análisis detallado tanto de las pruebas de arranque del ciclo en cuestión como de los datos del seguimiento del ciclo.

Por otra parte, debido a las mejores técnicas en las herramientas de modelización neutrónica (códigos de diseño de núcleo) actualmente disponibles, a la utilización de procedimientos estadísticos para el tratamiento de los diferentes tipos de incertidumbres considerados en la evaluación de la seguridad

cremento en el limite de los factores de pico, es el diseño de "núcleos de bajas fugas" así llamados porque la distribución de elementos permite una drástica disminución en la población neutrónica de la periferia del núcleo y la consiguiente fuga hacia las estructuras circundantes y, en definitiva, a la vasija con lo que se consigue un sustancial ahorro de neutrones y el consiguiente incremento energético del ciclo.

El desarrollo de mas sofisticados códigos de diseño aplicados a reactores PWR, ha posibilitado, entre otras cosas, la utilización de venenos consumibles con distribución asimétrica dentro

de los esquemas de carga y, en general a las mejoras que se introducen en la adquisición y tratamiento de medidas en el núcleo, ha sido posible el licenciamiento de límites superiores de los factores de pico con lo que se han podido desarrollar ciertos procedimientos que han ayudado a incrementar la energía extraíble de una recarga dada. Una de estas técnicas, posibilitada por el in-

de cada elemento combustible, con lo que el gradiente de quemado que se produce radialmente en un elemento de combustible pasa de ser un "dolor de cabeza" para el diseñador a convertirse en un sofisticado método de ajuste de picos en combinación con los "giros" de los elementos (se utiliza la expresión "giro" en vez de "ubicación en un cuadrante u octante simétrico"). También es ya posible la utilización en reactores PWR, como se indica mas arriba, de elementos de combustible con una distribución axialmente variable de uranio enriquecido o de absorbentes neutrónicos integrados en la matriz de las pastillas de óxido de uranio. Estas dos características, llamadas reflectores axiales y venenos consumibles integrados de longitud parcial, permitirán en un futuro próximo disminuir las necesidades de enriquecimiento de las recargas manteniendo las mismas expectativas de generación energética al coste, eso si, de una mayor complicación en el diseño de los núcleos.

Finalmente, las mejoras en materiales y procedimientos de fabricación permiten a los fabricantes de combustible incrementar los quemados de garantía de sus productos con lo que el diseñador dispone de una nueva posibilidad de incrementar el rendimiento energético de los diseños o, alternativamente, disminuir las necesidades de uranio para las recargas.

Viene de la pág. 19

Los estudios realizados hasta el momento indican que los mismos requisitos en días de operación a plena potencia y para una potencia térmica de 2900 MW se alcanzan cargando exactamente el mismo número de elementos frescos mediante el aumento en el quemado de descarga hasta 48000 MWd/tU. Este aumento es significativo y tiene un impacto muy positivo en los costes de fabricación. Al mismo tiempo resalta

la importancia de considerar materiales de vaina y estructurales más avanzados, capaces de permitir la operación satisfactoria del combustible a esos elevados grados de quemado.

Se ha realizado un estudio de comparación equivalente al de condiciones "pre-uprate" entre el producto actual y el avanzado utilizando mantos axiales y gadolinio, para los mismos requisitos energéticos, es decir 490 DEPP y 2900 MW térmicos, con la misma metodología y el mismo nivel de detalle en grado de optimización del esquema de recarga y de modelación del ciclo de equilibrio.

Para el producto actual con WABA's como absorbente, se alcanzan los requisitos energéticos del ciclo con enriquecimiento medio de 4,4436% obtenido con un enriquecimiento central de 4,64% y mantos axiales de 2,6%.

Se concluye por tanto un ahorro en enriquecimiento medio de 0,0564% y un enriquecimiento central 0,14% superior al

caso de los WABA's y que no plantea problemas especiales, siendo de hecho inferior al utilizado en varios reactores norteamericanos para operar con ciclos de 24 meses.

La evaluación económica de estos resultados indica un ahorro económico en el coste de la primera parte del ciclo de combustible de 115 Mpta. por ciclo con el uso del producto avanzado. Esto supone un ahorro relativo del 1,2% respecto a los costes totales.

EXPERIENCIA EN OTROS PAISES

El gadolinio es el absorbente neutrónico dominante en los mercados europeo y japonés. Su presencia en el mercado PWR norteamericano es en cambio más reducida.

ENUSA está actualmente fabricando elementos combustibles para la central belga de Doel Unidad 4 con 8 barras de gadolinio por elemento combustible y con una concentración del 8% por elemento. El resto de las centrales belgas que operan en ciclos de 18 meses emplean tambien gadolinio.

En el mercado francés el único absorbente consumible utilizado es el gadolinio, requerido para la nueva estrategia de operación en ciclos de 18 meses de las grandes unidades de 1300-1400 MW. Para el mercado sueco, ENUSA fabrica elementos combustibles conteniendo ocho barras con 5% de gadolinio

destinados a la Unidad 2 de Ringhals. En el mercado japonés, la central de Ohi ha sido la pionera en el ensayo de elementos conteniendo un 10% de gadolinio y éste es el único absorbente consumible empleado en este mercado.

Como se ha indicado antes, los mantos axiales están en uso en todos los reactores BWR. En los PWR y para el mercado norteamericano, la experiencia de Westinghouse en mantos axiales es significativa, con aproximadamente un centenar de regiones de recarga entregadas hasta 1994.

CONCLUSIONES

El producto avanzado PWR constituye un salto tecnológico en la consecución de mejoras significativas en la disponibilidad y en el coste variable total de generación nuclear.

Destacan las ventajas en flexibilidad de diseño, ganancia en días de operación del ciclo, solución de problemas en los componentes internos del núcleo, reducción de tiempos perdidos y dosis al personal por desaparición de residuos, etc.

En términos puramente cuantitativos del combustible, los estudios detallados con el estado del arte en metodología demuestran que el producto avanzado obtiene un ahorro en enriquecimiento de 0,06%, con un impacto económico de 100 a 115 Mpta. por ciclo para la primera parte del ciclo de combustible.