



Claude MILDUM es Ingeniero de Diseño Nuclear con títulos de "Bachelor and Master of Science" en Física e Ingeniería Nuclear, respectivamente, por el "Georgia Institute of Technology". Desde 1974 a 1991 prestó sus servicios en la "Nuclear Fuel Division" de "Westinghouse Electric Corporation" en las áreas de Diseño Nuclear BWR (8 años) y PWR (9 años). Su trabajo estaba relacionado con el desarrollo de nuevos productos de combustible, desarrollo y cualificación de códigos y métodos nucleares y apoyo técnico a la comercialización y licenciamiento de dichos códigos y métodos. Actualmente desarrolla su labor profesional en ENUSA, en el área de Diseño Nuclear del Departamento de Proyectos Especiales.

EL GADOLINIO COMO VENENO INTEGRAL PARA EL COMBUSTIBLE PWR

C.M. MILDUM - F. TARÍN - F. MERINO



Francisco TARIN GARCIA es Licenciado en Ciencias Físicas (Especialidad Física Teórica) por la Universidad de Valencia (1981) y Diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares (1983). Comenzó su actividad profesional en el Departamento de Seguridad Nuclear, Garantía de Calidad y Protección Física del CIEMAT (antigua JEN). En 1984 se incorporó a ENUSA y desde entonces ha prestado sus servicios en el área de Diseño Nuclear PWR en los Departamentos de Diseño Nuclear, Proyectos Especiales y actualmente en el Departamento de Ingeniería del Núcleo. Su experiencia profesional también incluye diversas estancias de trabajo en la "Nuclear Fuel Division" de Westinghouse (EEUU).

INTRODUCCIÓN

La necesidad de maximizar la utilización del combustible nuclear en el actual entorno del ciclo del combustible abierto, de extender la vida de la vasija de presión, y de disminuir el tamaño de la recarga, ha llevado a la industria nuclear a concentrarse en ciertas mejoras en la utilización del combustible. Entre éstas se encuentran la extensión de la longitud de los ciclos de operación (a 18 meses o mayores), el aumento de los quema-

dos de descarga y la adopción de esquemas de recarga más eficientes (bajas fugas, ultra bajas fugas,...). Estos cambios en las estrategias de uso del combustible y del núcleo hacen aun más necesario el uso de venenos consumibles. ENUSA actualmente ofrece el diseño WABA ("Wet Annular Burnable Absorber") para el combustible tipo PWR. Este diseño, que es del tipo discreto con las barras absorbentes insertadas en ciertas posiciones de los tubos-guía del elemento, ha probado su eficacia para cumplir las necesidades de utilización del combustible y gestión del núcleo de nuestros Clientes. Previendo mayores quemados de descarga, ciclos más largos, y estrategias de carga del núcleo más agresivas y eficientes, ENUSA ofrece ahora un diseño de veneno integrado con gadolinio.

Los objetivos principales de este artículo son los de resumir las ventajas del gadolinio, describir la metodología de diseño nuclear que es usada en ENUSA para modelar el comportamiento del combustible con gadolinio, resumir la cualificación de esta metodología que asegura su bondad y fiabilidad, y comprobar la factibilidad del uso del gadolinio en las recargas PWR, comparando las implicaciones neutrónicas.

ENUSA tiene la capacidad completa para modelar y analizar el gadolinio en el combustible PWR en todas las áreas de diseño afectadas. La metodología de diseño y los códigos de cálculo aplicables están rigurosamente cualificados y su precisión y fiabilidad



Fernando MERINO BLANCO es Ingeniero Industrial (Especialidad Técnicas Energéticas) por la ETSIIM (1989) y Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid (1993). Durante cuatro años, trabajó en el Instituto de Fusión Nuclear de la UPM en el desarrollo de modelos para la simulación de la dinámica de núcleos PWR. En 1993 se incorpora a ENUSA donde se integra en el Grupo de Métodos del Departamento de Proyectos Especiales.

han sido ampliamente demostradas. Se están completando todas las actividades para establecer en la fábrica de Juzbado (Salamanca) la plena capacidad de fabricar regiones de recarga completas de elementos PWR con gadolinio de forma continuada, a partir del año 1995.

Además, está en marcha un programa de introducción de elementos combustibles PWR precursores con gadolinio en la central española de Ascó II. Como parte de este programa, ya se han cargado (Abril 94) ocho elementos combustibles con gadolinio, cada uno de ellos con ocho barras combustibles con gadolinio al 6 % en peso de Gd_2O_3 . Los datos tomados por la instrumentación de planta serán usados para confirmar la bondad de la metodología de diseño nuclear para modelar correctamente el comportamiento del quemado del gadolinio. También se realizarán inspecciones visuales para demostrar el comportamiento satisfactorio del combustible en el núcleo.

BENEFICIOS DEL GADOLINIO

El gadolinio dispersado en el combustible ofrece unas ciertas ventajas como veneno consumible. La tecnología del combustible con gadolinio es bien conocida y probada ya que se ha usado durante muchos años en los reactores de agua ligera (BWR y PWR). El combustible con gadolinio ofrece las ventajas inherentes a un veneno integrado. Estas incluyen la eliminación del manejo separado, almacenamiento, y requisitos de contabilidad de las barras de veneno. Los elementos combustibles que contienen gadolinio pueden ser colocados en las posiciones más adecuadas en el núcleo mientras que los venenos discretos, como el WABA, no pueden colocarse en posiciones de barras de control y fuentes secundarias. Sin ninguna restricción, el combustible con gadolinio permite esquemas de recarga más eficientes y por tanto un incremento en la producción de energía y una disminución de los costes del ciclo del combustible.

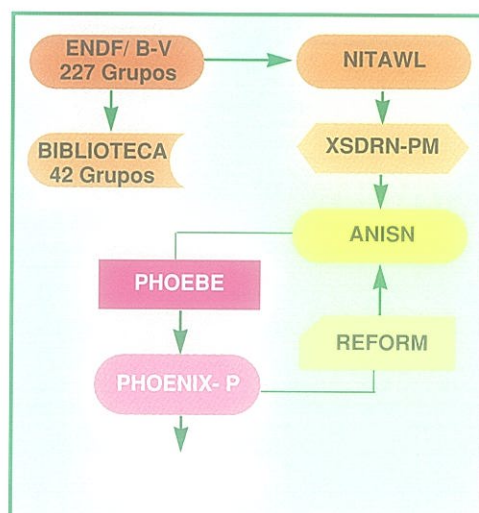
El gadolinio integrado tampoco interfiere con la capacidad del combustible para alcanzar altos quemados de descarga puesto que la adición de este veneno no afecta de forma negativa a las propiedades que son más preocupantes cuando se incrementa el quemado de descarga, como la estabilidad dimensional del elemento combustible durante su irradiación, cantidad de gases de fisión liberados en la barra de combustible, crecimiento por irradiación de las barras y del elemento, etc. Además, el combustible con gadolinio es totalmente compatible con la tecnología del reprocesado.

ENUSA tiene una gran experiencia en el tratamiento del gadolinio como veneno integral consumible ya que lo lleva utili-

zando para su combustible BWR durante años. Ahora ofrece también el gadolinio en forma de veneno integral como parte de su línea de productos PWR.

METODOLOGÍA DE DISEÑO NUCLEAR CON GADOLINIO

En este apartado se incluye un breve resumen de la metodología empleada para el diseño de combustible PWR con gadolinio. El diagrama que se muestra a continuación señala el flujo de cálculos y los códigos que se emplean en la modelación neutrónica del gadolinio.



El sistema de códigos representado en el diagrama es el actualmente utilizado por ENUSA y Westinghouse para los cálculos de diseño del núcleo. Este sistema ha sido aprobado tanto por la U.S. NRC como por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). Los dos códigos principales son PHOENIX-P y ANC. Para el análisis del combustible con gadolinio, Westinghouse y ENUSA continúan usando la metodología de diseño PHOENIX-P/ANC. El gadolinio es un veneno muy absorbente y por lo tanto requiere un tratamiento particular para modelar con precisión el flujo muy deprimido dentro de la pastilla de $UO_2-Gd_2O_3$ y el quemado de los isótopos del gadolinio dentro de la misma. Por lo cual, la generación de las secciones eficaces en la pastilla de combustible con gadolinio, que necesita PHOENIX-P, requiere la utilización de una serie de códigos que se describen a continuación.

Las secciones eficaces del gadolinio se obtienen en 227 grupos energéticos a partir de la librería de secciones eficaces ENDF/B-V del sistema AMPX (Ref. 1). Las integrales de resonancia se calculan con el código NITAWL-S (Ref. 2), basado en el método de la Colisión Integral de Nordheim. Las secciones eficaces microscópicas del gadolinio se colapsan a la estructura estándar de 42 grupos energéticos del código de ele-

mento PHOENIX-P, usando XSDRN-PM (código unidimensional de transporte en ordenadas discretas) (Ref. 3). Estas secciones eficaces colapsadas se emplean con una versión especial del código ANISN (Ref. 4), también un código unidimensional de transporte en ordenadas discretas, para quemar la cadena completa del gadolinio, desde el Gd^{154} hasta el Gd^{158} , así como el Gd^{152} y Gd^{160} . ANISN quema los isótopos del gadolinio en la barra combustible y genera secciones eficaces microscópicas medias de pastilla en 42 grupos en función de la fracción quemada de los principales isótopos absorbentes, Gd^{155} y Gd^{157} . Estas secciones eficaces se usan en el código de transporte bidimensional PHOENIX-P (Ref. 5) que modela el elemento combustible PWR completo y quema, en 42 grupos de energía, los isótopos individuales del gadolinio en cada barra combustible. PHOENIX-P genera las secciones eficaces del elemento homogeneizadas a dos grupos, así como otras constantes físicas que necesita para modelar el elemento combustible a nivel de núcleo el siguiente código, el Código Nodal Avanzado (ANC). El código ANC (Ref. 6) es un simulador tridimensional del núcleo que usa los métodos nodales más modernos, incluyendo el Método de Expansión Nodal, Teoría de Equivalencia para la homogeneización de secciones eficaces, y un modelo de reconstrucción de potencia por barrita combustible.

CUALIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

La metodología de diseño nuclear aplicada al combustible con gadolinio ha sido cualificada respecto a experimentos críticos y datos operacionales de planta. La cualificación respecto a experimentos críticos incluye comparaciones hechas con los experimentos críticos TCA del JAERI, así como con los experimentos críticos de Babcock & Wilcox patrocinados por el Departamento de Energía (DOE) de los EE.UU.

La metodología de diseño nuclear fue cualificada contra una serie de experimentos críticos denominados experimentos críticos TCA ("Tank-type Critical Assembly"), patrocinados por el Instituto de Investigación de Energía Atómica del Japón (JAERI). Los experimentos críticos TCA consistieron en un elemento de barras combustibles de matriz 21×21 , rodeado por un gran reflector de agua y el propio tanque. Estos experimentos medían el valor en reactividad de una gran variedad de configuraciones de barras de gadolinio en un conjunto de 21×21 barras de combustible para un rango de concentraciones de gadolinio de hasta un 3 % en peso de Gd_2O_3 . Los esquemas de barras de gadolinio seleccionados, fueron escogidos con el objeto de estudiar los efectos de interacción entre barras de gadolinio, tanto adyacentes cara-a-cara o en diagonal, como

dispersadas de forma uniforme en la matriz del combustible. Las comparaciones demostraron un buen acuerdo entre los valores de reactividad medidos y predichos de las barras de gadolinio.

Las series de experimentos críticos de Babcock & Wilcox consistían en 18 configuraciones críticas variando el número y la colocación de tubos de agua y de gadolinio en una configuración básica de 4.808 barras de combustible y 153 tubos de agua que simulaban las posiciones de los tubos guía y tubos de instrumentación. La zona central se asimilaba a un conjunto de 9 elementos de un diseño similar al del elemento PWR 15x15 de Westinghouse. Los experimentos emplearon una única concentración de gadolinio de 4.0 % en peso de Gd_2O_3 . Algunos de los experimentos incluían un conjunto de haces de barras de control presente, ya sea de Ag-In-Cd o de B_4C como material absorbente. En ambas series de experimentos se predecían correctamente tanto la potencia por barra en los elementos combustibles con gadolinio como la reactividad de cada uno de ellos. También fue bien predicha la reactividad de las barras de gadolinio. Así mismo se reprodujo correctamente el valor de la araña de barras de control en presencia del gadolinio.

Se han hecho también comparaciones con datos operacionales de planta de dos núcleos PWR de cuatro lazos, cada uno de los cuales contenía 532 barras de gadolinio al 6 % en peso de Gd_2O_3 . Las comparaciones físicas realizadas incluyeron comparaciones con las medidas realizadas en las pruebas de arranque: concentraciones de boro, coeficientes isotérmicos, valores de bancos de control y mapas de flujo intranucleares. También se han hecho comparaciones de la curva de boro crítico y de los mapas de flujo durante la operación de los ciclos. Todas estas comparaciones respecto a las medidas en planta y los experimentos críticos demostraron un muy buen acuerdo, afirmando así que la metodología de diseño modela correctamente el gadolinio.

CARACTERÍSTICAS NEUTRÓNICAS DE NÚCLEOS PWR CON GADOLINIO

Introducción

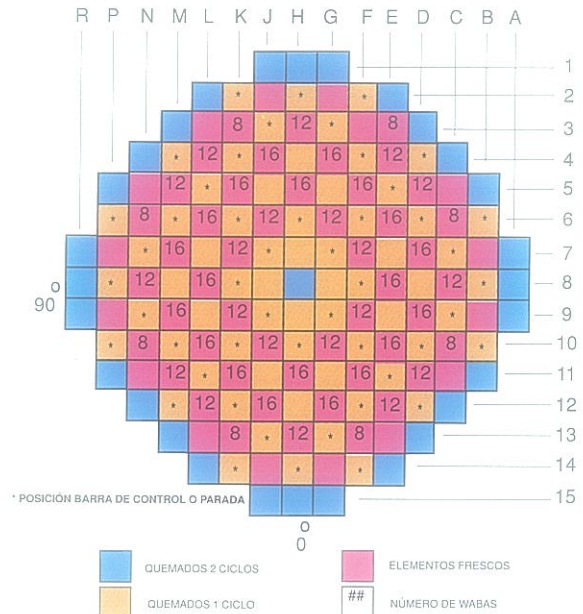
Se han realizado estudios con núcleos PWR que demuestran que el combustible con gadolinio ofrece las mismas buenas características neutrónicas en el núcleo que los venenos discretos como el WABA. Con el combustible con gadolinio se pueden conseguir ciclos anuales y de 18 meses que dan distribuciones de potencia y factores de pico nucleares equiparables a los de diseños con WABA's. También son equivalentes las características de control (coeficientes de reactividad, valores de bancos de control, parámetros cinéticos, comportamiento transitorio del xenon, etc.). Se ha

visto que el gadolinio tiene una penalización residual a final de ciclo comparable a la de los núcleos que usan WABA's (para un ciclo en equilibrio). Esta penalización está asociada a la absorción de los isótopos pares del gadolinio.

Con gadolinio es relativamente fácil variar radialmente y/o axialmente el contenido de absorbente en el núcleo para conseguir la distribución de potencia del núcleo más deseable y controlar efectivamente los factores de pico nucleares, F_{DH} y F_{DO} . Las concentraciones de gadolinio usadas van de 4 a 6 % en peso de Gd_2O_3 para ciclos anuales y hasta 8 % para ciclos de 18 meses. El número de barras de combustible con gadolinio es el necesario para cumplir con los requisitos iniciales de reactividad y con los límites del coeficiente de temperatura del moderador (CTM) y de los factores de pico. La concentración de Gd_2O_3 que se selecciona es aquella que da una tasa de quemado adecuada y unos factores de pico del núcleo aceptables. La alta sección eficaz de absorción térmica que caracteriza al gadolinio asegura un completo quemado del veneno al final del ciclo. En cada elemento se usa una única concentración de gadolinio.

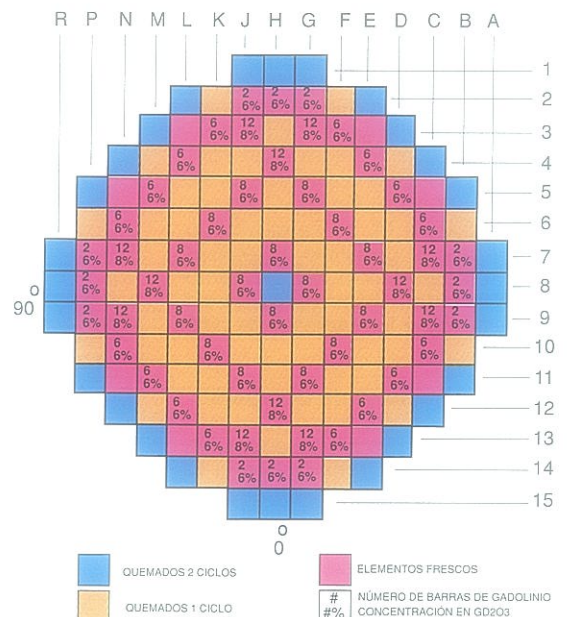
Aun siendo la carga de gadolinio homogénea axialmente dentro del elemento combustible, el absorbente podría no ser usado en las partes superior e inferior del elemento. Esto daría lugar a una reducción significativa de los factores de pico axiales y minimizaría la penalización residual a final de ciclo debido al absorbente.

CICLO DE EQUILIBRIO DE 18 MESES CON WABAS ESQUEMA DE RECARGA DE REFERENCIA



FI y FII

CICLO DE EQUILIBRIO DE 18 MESES CON GADOLINIO ESQUEMA DE RECARGA DE REFERENCIA



La adición de gadolinio al combustible disminuye la conductividad térmica de la pastilla y también ligeramente la temperatura de fusión del combustible. Para compensar dichas penalizaciones, el enriquecimiento del combustible en U^{235} , se reduce aproximadamente un 5% por cada % en peso de Gd_2O_3 . De esta forma,

se limita intrínsecamente la potencia de las barras con gadolinio y se compensa la disminución de la conductividad térmica.

La eliminación de la restricción que impide colocar WABA's en los lugares ocupados por bancos de control o parada permite, usando el gadolinio, ampliar los esquemas de recarga posibles. Por ejemplo, de esta forma se puede agrupar los elementos frescos en los llamados "anillos de fuego" incluso en posiciones más interiores consiguiendo un perfil de potencia radial más plano con lo cual se ahorran venenos y se consigue un diseño más reactivo y con menos pérdidas de neutrones. Compárese la Figura I típica "ajedrezada" usando WABA's con la Figura II en "anillos", posible si se usa gadolinio.

A continuación se compara el comportamiento neutrónico del gadolinio frente al de los WABA's para recargas con un ciclo de equilibrio de 18 meses de duración, una generación aproximada de energía de 18.2 GWd/tU, y un quemado de descarga medio de región de 44-45 GWd/tU. El enriquecimiento medio de los núcleos con WABA's y gadolinio ha sido seleccionado de manera que la carga inicial de U^{235} sea idéntica en ambos.

En las Figuras I y II se muestran los esquemas del núcleo de equilibrio correspondiente a los casos de WABA's y gadolinio, respectivamente. El esquema con WABA's utiliza 624 barras de veneno y el de gadolinio 392. En la Figura III se recogen las distintas configuraciones de barras de gadolinio empleadas. Típicamente se usan en el núcleo dos concentraciones de Gd_2O_3 , tanto para controlar más efectivamente los picos de potencia como para minimizar la carga de absorbente y la penalización residual a final de ciclo. En este caso concreto, se han utilizado concentraciones de 6 y 8 % en peso de Gd_2O_3 . Como se ilustra en la Figura III, se cargan tanto configuraciones de gadolinio simétricas como asimétricas dentro del elemento para minimizar los picos de potencia dentro del mismo y los factores de pico del núcleo.

Parámetros Nominales de Operación

Algunos de los parámetros de operación de interés se comparan en la Figura IV para la recarga con gadolinio y de WABA's a lo largo del ciclo. En la Figura IV(a), se muestran los valores que toma la concentración crítica de boro C_B [ppm]. La Figura IV(b) presenta la evolución con el quemado de los factores nucleares de canal caliente ($F_{\Delta H}$) y local para el flujo calorífico (F_Q). La Figura IV(c) corresponde a la evolución del pico axial y asimetría axial de potencia del núcleo a lo largo del quemado, y por último, en la Figura IV(d) están representadas las distribuciones axiales de potencia del núcleo correspondientes a principio (BOC), mitad (MOC) y fin del ciclo (EOC). Estos resultados demues-

tran que el comportamiento de la recarga con gadolinio es muy parecido al del diseño con WABA's.

Coefficientes de Reactividad

En la Figura IV(e) se representa el coeficiente de temperatura del moderador (CTM) en función del quemado desde el principio hasta el final del ciclo, en condiciones de plena potencia y Xenon en equilibrio. El CTM del gadolinio es ligeramente superior al comienzo del ciclo pero se va aproximando al de WABA's al aumentar el quemado del ciclo. En la Figura IV(e) se muestra también la comparación para el valor diferencial del boro soluble en el refrigerante a lo largo del ciclo. La diferencia que se observa

entre las recargas con WABA's y gadolinio es mínima y mucho menor que la variación que tiene lugar en este parámetro como consecuencia del quemado del ciclo. En la Figura IV(f) se recogen los resultados de los cálculos relativos al coeficiente Doppler de potencia en función de la potencia a principio y a fin de vida para las recargas que emplean gadolinio y WABA's. Se observa que las diferencias en el coeficiente Doppler son mínimas. Aunque no se incluye, lo mismo se puede concluir respecto al coeficiente total de potencia.

Bancos de Control y Margen de Parada

En la Tabla I se recogen los valores de

T I'
Resumen de los Valores de los Bancos de Control y Margen de Parada (% Δp) Entre los Núcleos de Gadolinio y WABA'S

Núcleo con Gadolinio

BANCOS INSERTADOS	BOC HZP (Indi./Acum.)	BOC HFP (Indi./Acum.)	EOC HFP (Indi./Acum.)	EOC HZP (Indi./Acum.)
D	1.11 / 1.11	1.23 / 1.23	1.42 / 1.42	1.20 / 1.20
D+C	0.89 / 2.00	1.01 / 2.24	1.24 / 2.66	0.94 / 2.14
D+C+B	1.67 / 3.67			1.77 / 3.91
D+C+B+A	0.54 / 4.21			0.73 / 4.64
D+C+B+A+S	2.98 / 7.19			3.46 / 8.10

Núcleo con WABA's

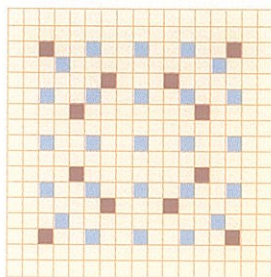
BANCOS INSERTADOS	BOC HZP (Indi./Acum.)	BOC HFP (Indi./Acum.)	EOC HFP (Indi./Acum.)	EOC HZP (Indi./Acum.)
D	1.03 / 1.03	1.13 / 1.13	1.30 / 1.30	1.10 / 1.10
D+C	0.80 / 1.83	0.95 / 2.08	1.23 / 2.53	0.95 / 2.05
D+C+B	1.72 / 3.55			1.91 / 3.96
D+C+B+A	0.51 / 4.06			0.63 / 4.59
D+C+B+A+S	2.98 / 7.04			3.13 / 7.72

Comparación de los Requisitos de Control y Margen de Parada entre los Núcleos con Gadolinio y WABA's

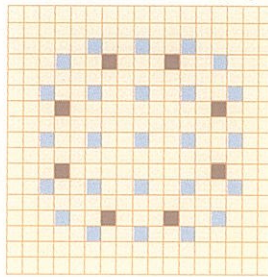
	Principio del Ciclo		Principio del Ciclo	
	Gadolinio	WABA's	Gadolinio	WABA's
Valor de Todas las Barras Insertadas Menos la Peor Barra Trabajada (% Δr) (reducida por un factor de conservadurismo)	5.87	5.73	6.37	6.22
Requisitos de Control (% Δr) (Defectos Doppler, Moderador, Redistribución y Asignación por Inserción de Barras - RIA).	2.16	2.27	3.90	3.95
Margen de Parada Calculado (% Δr)	3.71	3.46	2.47	2.27
Margen de Parada Requerido (% Δr)	1.77	1.77	1.77	1.77

'NOTA : BOC y EOC denotan principio y fin de ciclo, respectivamente. HZP y HFP denotan cero y plena potencia, respectivamente.

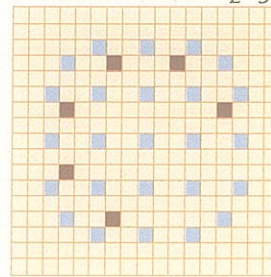
12 Barras de 8 w/o Gd_2O_3



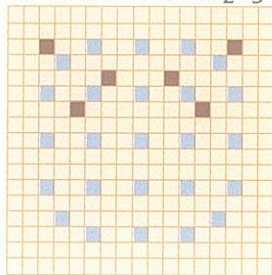
8 Barras de 6 w/o Gd_2O_3



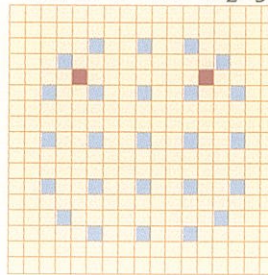
6 Barras de 6 w/o Gd_2O_3



6 Barras de 6 w/o Gd_2O_3



2 Barras de 6 w/o Gd_2O_3



F III Esquemas de barras de Gadolinio en el Elemento para el ciclo de equilibrio de 18 meses.

los bancos de control en la inserción sucesiva de los mismos a cero y plena potencia, al principio y fin del ciclo para los casos de núcleos con gadolinio y con WABA's. Aunque hay diferencias en los valores de los bancos individuales, debido en gran parte al hecho que los esquemas de recarga son distintos para los dos núcleos, el valor acumulado de todos los bancos de control es similar en ambos núcleos. La Tabla I también contrasta los requisitos de control y margen de parada entre las recargas con gadolinio y WABA's, no apreciándose diferencias significativas entre las dos. Como resumen y conclusión de las comparaciones anteriores, se puede afirmar que el uso del gadolinio no afecta a los parámetros de diseño nuclear de forma significativa, no introduciendo cambios mayores que los observados para el caso de recargas diferentes. Las mismas conclusiones se aplican a ciclos anuales y en los ciclos de transición de WABA's a los de gadolinio.

CONCLUSIONES

La necesidad de maximizar la utilización del combustible nuclear en el actual entorno del ciclo del combustible abierto, de extender la vida de la vasija de presión, y de disminuir el tamaño de la recarga, ha llevado a la industria nuclear a concentrarse en ciertas mejoras en el uso del combustible. Estas mejoras incluyen ciclos más largos, mayores quemados de descarga y esquemas de recarga más eficientes. Anticipándose a dichas necesidades, ENUSA ofrece ahora el gadolinio, en forma de veneno integrado en el combustible, además del diseño de veneno discreto tipo WABA como parte de su línea de productos

PWR.

La tecnología del combustible con gadolinio está bien establecida y probada. ENUSA tiene a punto la capacidad completa para modelar y analizar el gadolinio en todas las áreas de diseño del combustible PWR. La metodología de diseño nuclear usada tanto por Westinghouse como por ENUSA para modelar el gadolinio en el combustible PWR está basada en métodos rigurosos. Dicha metodología de diseño y los códigos que la soportan están bien cualificados y su precisión y fiabilidad para modelar el combustible con gadolinio demostrados con suficiencia. Además está en marcha un programa de introducción de elementos precursores con gadolinio en la central española PWR de Ascó II que ayudará a demostrar la precisión y fiabilidad de la metodología de diseño y el correcto comportamiento de dicho combustible en el núcleo. Se han llevado a cabo estudios del núcleo que demuestran que el diseño del gadolinio como veneno integrado en el combustible ofrece las mismas buenas características neutrónicas que los venenos discretos, como los WABA's. Se pueden conseguir ciclos anuales y de 18 meses que dan distribuciones de potencia similares y los mismos márgenes de diseño de los factores de pico, y las mismas características de control que las dadas por los WABA's. Puesto que el veneno está integrado en el combustible, el gadolinio no tiene la restricción del WABA de no poderse cargar en posiciones de barras de control. Esto permite obtener esquemas de recarga más agresivos y eficientes en el uso del combustible y así reducir los costes del ciclo del combustible, controlar más efectivamente los picos de potencia y minimizar las fugas de neutrones del núcleo y au-

mentando la vida de la vasija de presión por disminución del daño neutrónico.

REFERENCIAS

- 1) W.E. Ford III, et al., "CSRL-V: Processed ENDF/B-V 227 Neutron Group and Point-Wise Cross-Section Libraries for Criticality Safety, Reactor and Shielding Studies", NUREG/CR-2306, ORNL/CSD/TM-160, June 1982.
 - 2) R.M. Westfall, et al., "NITAWL-S: Scale System Module for Performing Resonance Shielding and Working Library Production", NUREG/CR-0200 Vol.2 Sect. F2, ORNL/NUREG/CSD-2/Vol.2, October 1981.
 - 3) N.M. Greene et al., "AMPX: A Modular Code System for Generating Coupled Multi-Group Neutron-Gamma Libraries from ENDF/B", ORNL/TM-3706, March 1976.
 - 4) W.W. Engle Jr., "A User's Manual for ANISN: A One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code With Anisotropic Scattering", Union Carbide Corporation Report K-1693 (1967).
- (Este documento no incluye las modificaciones para el gadolinio que son propiedad de Westinghouse Electric Corporation).
- 5) T.Q. Nguyen et al., "Qualification of the PHOENIX-P/ANC Nuclear Design System for Pressurized Water Reactor Cores", WCAP-11597-A, Westinghouse Electric Corporation (November 1987).
 - 6) Y.S. Liu et al., "ANC: A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code", WCAP-10966, Westinghouse Electric Corporation (December 1985).

Figura 4(a) - Comparación de la Concentración del Boro Crítico Entre los Núcleos con WABA's y Gadolinio

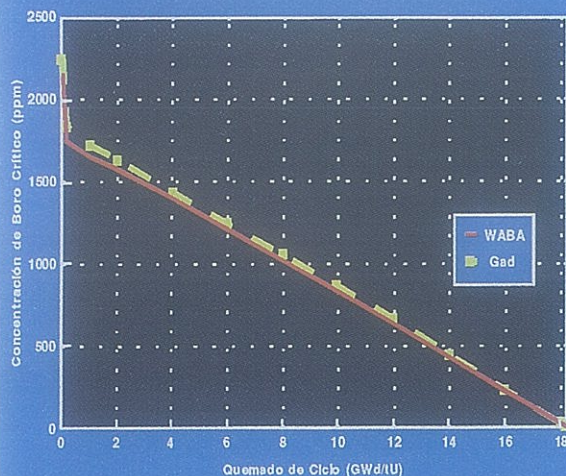


Figura 4(b) - Comparación de los Factores de Pico Nuclear - Canal Caliente (Fdh) y Local Para el Flujo Calorífico (Fq) Entre las Recargas con WABA's y Gadolinio

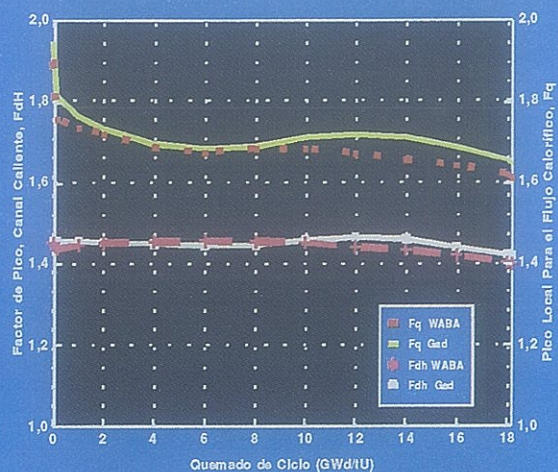


Figura 4(c) - Comparación del Factor de Pico Axial (Fz) y Asimetría Axial de Potencia (AO) del Núcleo Entre las Recargas con WABA's y Gadolinio

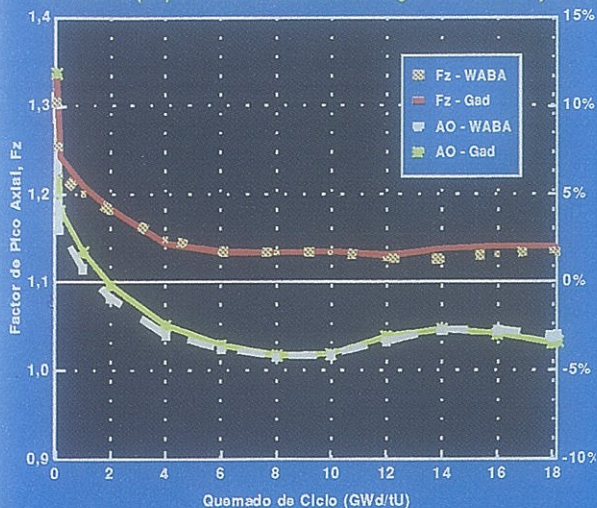


Figura 4(d) - Comparación de los Perfiles Axiales de Potencia del Núcleo Entre los Núcleos con WABA's y Gadolinio

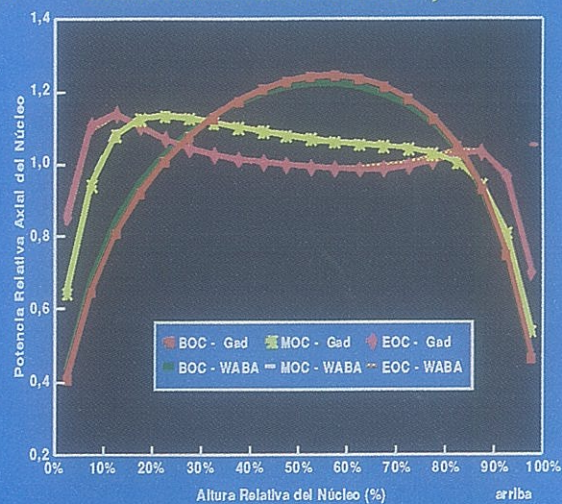


Figura 4(e) - Comparación del Coeficiente de Temperatura del Moderador (CTM) a Plena Potencia y del Valor Diferencial del Boro (VDB) con el Quemado

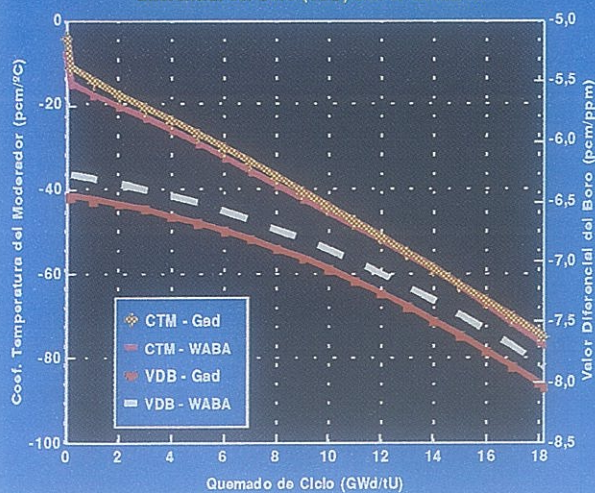


Figura 4(f) - Comparación del Coeficiente de Potencia, Solo Doppler, (DPC) con el Nivel de Potencia al Principio (BOC) y Fin del Ciclo (EOC) Entre las Recargas con WABA's y Gadolinio

