



Juan José PEÑA AGUADO, ingeniero industrial, es especialista en técnicas energéticas por la UAM en 1982. En septiembre de 1982 se incorpora al Instituto de Fusión Nuclear de la UAM, donde participa en el desarrollo de códigos TH para el análisis de combustible. En noviembre de 1984 se incorpora al Dpto. de Termohidráulica y Seguridad de ENUSA, participando por tres años en los análisis de los experimentos OECD-LOFT. En el período 87-89 se especializa en el análisis de accidentes con pérdida de refrigerante en reactores de agua ligera. Desde septiembre de 1989 dirige el Grupo de Diseño y Análisis de Seguridad de Recargas BWR de la División de Combustible de ENUSA.

OPERACION DE UN REACTOR BWR SEGUN LA ESTRATEGIA DE SPECTRAL SHIFT

J. J. PEÑA - M. PRIETO - J. HACES



Mariano PRIETO CORCOBA es ingeniero industrial por la Universidad Nacional de Buenos Aires y diplomado en ingeniería nuclear por la JEN. En 1983 se incorpora al Departamento de Seguridad de la JEN, donde participa en temas de licenciamiento y seguridad. En 1985 ingresa en INYPSA, trabajando en actividades de protección radiológica, planes de emergencia y seguridad. En 1986 ingresa en el Grupo de Diseño BWR de la Dirección de Combustible de ENUSA, habiendo participado desde entonces en el diseño de recargas y análisis de seguridad; así como en diversos trabajos de colaboración con General Electric en San José.



Javier HACES MENDEZ es licenciado en 1988 en Ciencias Físicas por la UAM (especialidad de Estado Sólido). Se incorpora a ENUSA en 1990 en el Grupo BWR del Departamento de Ingeniería del Núcleo. Actualmente participa en un programa de desarrollo conjunto con General Electric para la mejora de la metodología de análisis de seguridad en reactores BWR.

INTRODUCCION

La idea esencial de la estrategia de operación con "spectral shift" (SS) consiste en conseguir una forma axial de potencia tan desplazada hacia la zona inferior del núcleo como sea posible, durante la primera parte del ciclo. Al desplazarse la potencia al tercio inferior se favorece la generación de huecos en el moderador.

Con esto se consigue incrementar la generación de plutonio fisil en la zona superior del núcleo, como consecuencia del endurecimiento del espectro neutrónico, resultante de la mayor fracción de huecos en el núcleo; de ahí la denominación de "spectral shift" o desplazamiento espectral.

Para conseguir distribuciones de potencia "picadas" en el tercio inferior del núcleo se puede proceder de dos maneras distintas. La más directa consiste en reducir el caudal del núcleo, con lo que se consigue un mayor salto entálpico en el mismo y, en consecuencia, un aumento inmediato de la calidad del vapor (Flow Control Spectral Shift —FCSS—). Otro método más refinado consiste en desarrollar unos esquemas de barras de control tales que provoquen el desplazamiento axial de la potencia (Burnup Shape Optimization —BSO—). En la operación real de la planta se combinan adecuadamente ambas estrategias de forma que se maximiza el desplazamiento de la potencia hacia la zona inferior del núcleo, y por ende, la energía del ciclo. Por último, en las etapas finales del ciclo, se quema el Pu antes generado, mediante el desplazamiento hacia arriba de la potencia. Esto se consigue con el aumento progresivo del caudal del núcleo y extrayendo todas las barras de control. Para maximizar el aprovechamiento del Pu producido a lo largo del ciclo es necesario aumentar el caudal del núcleo por encima del valor nominal de la planta, hasta el valor máximo licenciado. Esto se conoce como operación con "Increased Core Flow" (ICF).

OPERACION CON SPECTRAL SHIFT

CARACTERISTICAS

La experiencia acumulada por ENUSA en el diseño de recargas de reactores BWR que operan siguiendo la estrategia de "spectral shift" pone de relieve una serie de características y limitaciones de esta estrategia, que se resumen brevemente a continuación.

En primer lugar, y como característica más importante, tenemos que la operación con "spectral shift" resulta un beneficio neto a largo plazo en la economía del ciclo de combustible. Al producirse simultáneamente un mejor aprovechamiento del U-235 cargado inicialmente y un aumento en el Pu-239 producido, se puede conseguir una reducción en la fracción de recarga necesaria para producir una energía determinada.

El efecto de desplazamiento axial de la potencia se ve favorecido por el empleo de combustibles de diseño avanzado, que tengan variación axial de gadolinio y enriquecimiento (GE8, GE9, GE10...).

Desde el punto de vista del diseño de recargas y gestión del ciclo se produce un aumento en la complejidad y cantidad de trabajo, que puede mitigarse mediante un diseño adecuado de los elementos combustibles a cargar. Esto último se traduce en una fuerte interrelación entre las actividades de diseño del elemento, de diseño de la recarga y gestión del ciclo. El diseño final del elemento combustible óptimo ha de hacerse "a la medida" para cada ciclo. Por ejemplo, se observa un empeoramiento del margen de parada en los ciclos posteriores a los operados con la estrategia del "spectral shift", lo que puede requerir la introducción de una zona de control de margen de parada (SDZ) en el diseño de bundle del ciclo siguiente y un control de la forma axial de quemado del ciclo actual.

Entre las limitaciones cabe destacar que la respuesta del núcleo a los transitorios de sobrepresión empeora tanto más cuanto más severo sea el SS. Esto es consecuencia del incremento de potencia en la zona superior del núcleo al final del ciclo.

RESULTADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE OPERACION ESTUDIADAS

El resultado que más claramente caracteriza la bondad de una gestión del ciclo es la evolución de la forma axial de potencia a lo largo de la vida del núcleo. Esta forma de potencia no debe presentar dobles picos, debiendo ser más picada

T I						
RESULTADO DE LAS ALTERNATIVAS DE OPERACION ESTUDIADAS						
Caso	Caudal Mínimo	Caudal Máximo	Tipo de Barras Empleadas			Variación de energía respecto de la de referencia
			Deep	Shallow	Intermedias	
1.(SHAL)	100%	105%	SI	SI	NO	+15
2.(.90)	90%	105%	SI	NO	NO	+608
3.(100)	100%	105%	SI	NO	NO	+505
4.(MID)	100%	105%	NO	NO	SI	-593
5.(KK100)	100%	105%	SI	SI	NO	+311
6.(HAL90)	90%	105%	CALCULO HALING			+158
7.(HAL100)	100%	105%	CALCULO HALING			(REFERENCIA) 8.200 MWd/st

(*) Energía obtenida a plena potencia, que incluye el aumento del caudal del núcleo hasta su valor máximo permitido.

hacia abajo que la forma Haling, utilizada habitualmente como referencia en la primera parte del ciclo. A medida que nos aproximemos al final del ciclo, la potencia debe ir desplazándose naturalmente hacia arriba; finalmente, con el aumento de caudal (ICF), el núcleo se quema esencialmente en la parte superior.

Para el estudio que nos ocupa se ha simulado el quemado de un ciclo de un reactor BWR operando según diferentes condiciones de caudal y con distintas combinaciones de barras de control profundas ("deep"), poco introducidas ("shallow") e intermedias tal como se resume en la tabla I.

La operación con "spectral shift" se ve favorecida por el empleo exclusivo de barras profundas, que son las que producen la mejor forma de potencia.

Es deseable no utilizar barras poco insertadas puesto que tienden a desplazar la potencia hacia arriba. Del mismo modo, es recomendable no utilizar barras intermedias puesto que suelen crear dobles picos de potencia en las zonas inferior y superior del núcleo y una depresión de potencia en la zona media (ver figura I).

Energía obtenida

Las diferentes alternativas de gestión estudiadas suponen quemar el mismo núcleo inicial de distinta manera. En cada caso se ha simulado detalladamente el quemado del núcleo en pasos de 750 MWd/st; en cada punto de quemado se han ajustado las posiciones de las barras de control para llevar el núcleo a la condición de criticidad, así como para dar cumplimiento a los valores de diseño de los límites térmicos (MFLPD, CPRAT y MAPRAT).

En la tabla I se muestran los quemados finales obtenidos como resultado del

quemado detallado del ciclo con barras de control, seguido del aumento del caudal de operación hasta el máximo permitido.

Los casos 2 y 3 suponen los mejores esquemas de barras de control obtenidos para operaciones al 90% y 100% de caudal nominal de operación, respectivamente.

Se observa que los resultados de los casos 2 y 3 son comparables, pese a operar a diferentes caudales. En cambio hay grandes diferencias entre los casos, 1, 3, 4 y 5 que operan al mismo caudal, pero distintos esquemas de barras. En particular, los casos 1 y 5 muestran una apreciable variación en la energía pese a operar con barras de tipo similar.

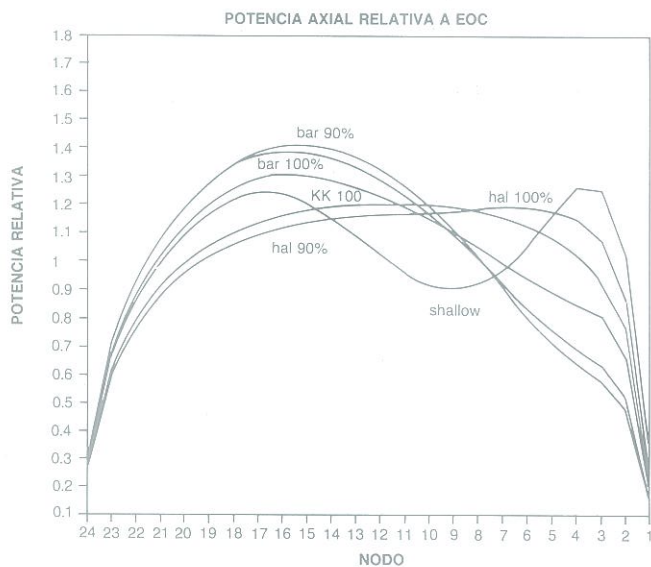
Las diferencias en la producción de energía mencionadas en el párrafo anterior se explican en función de la bondad del esquema de barras de control elegido para la operación.

De todo ello se concluye que, desde el punto de vista energético, la operación con BSO o SS con barras es más efectiva que la operación con FCSS o SS con caudal.

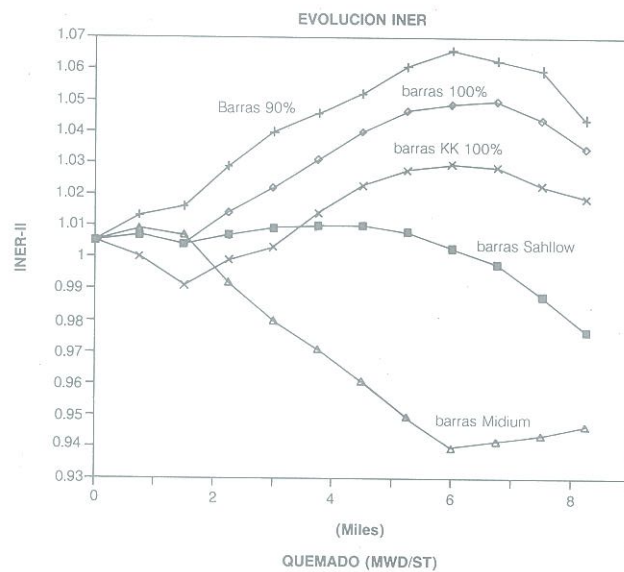
Indice de quemado INER-II

Para comparar las formas de quemado de las distintas alternativas de operación estudiadas se emplea el índice INER-II. Este número representa la relación entre el quemado relativo del tercio inferior del núcleo para un punto de quemado del ciclo determinado, en relación con la misma magnitud para su valor de referencia, es decir:

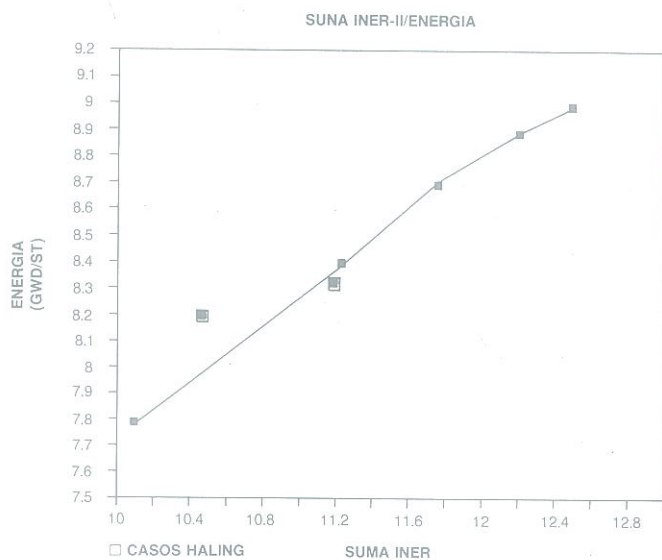
$$\text{INER-II} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{KF} \text{Quemado}(i) \right] / \left[\sum_{i=1}^{KMAX} \text{Quemado}(i) \right]_{\text{actual}}}{\left[\sum_{i=1}^{KF} \text{Quemado}(i) \right] / \left[\sum_{i=1}^{KMAX} \text{Quemado}(i) \right]_{\text{referencia}}}$$



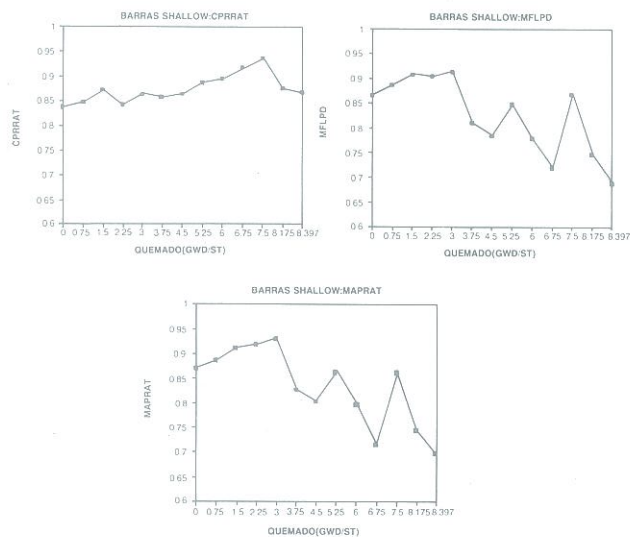
F I Formas axiales de potencia a EOC para las diferentes alternativas de gestión.



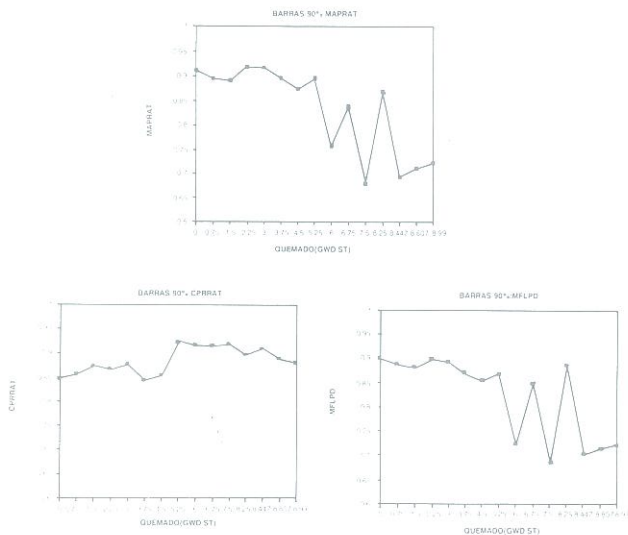
F II Evolución del INER en función del quemado a lo largo del ciclo.



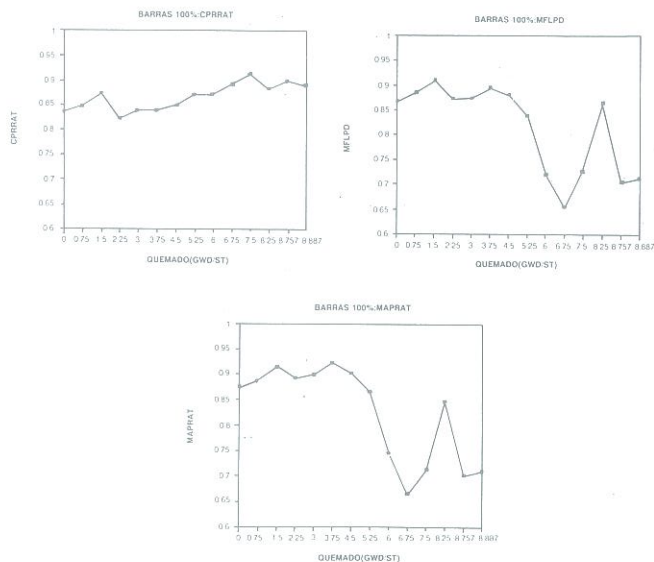
F III Correlación entre la integral del INER a lo largo del ciclo y la energía obtenida.



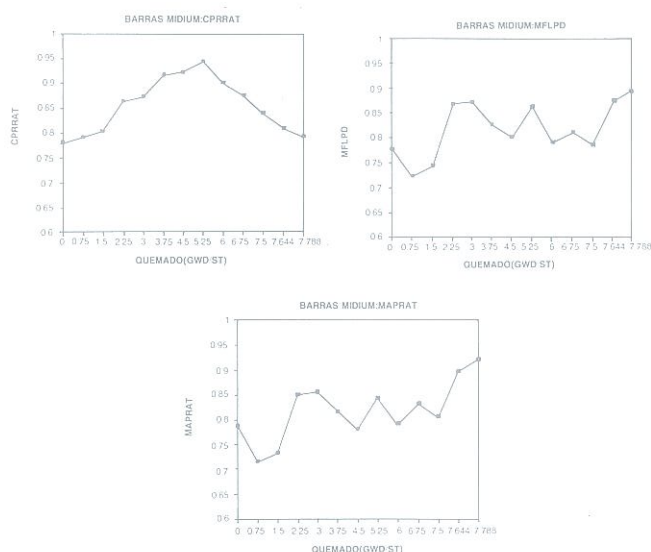
F IV Evolución límites térmicos. Caso Shallow.



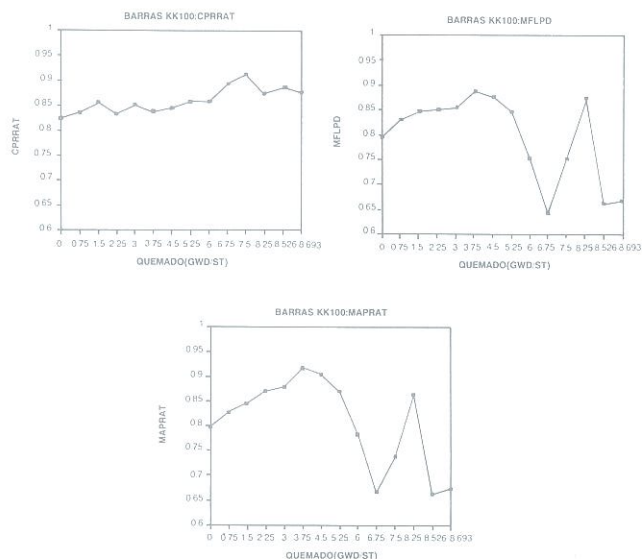
F V Evolución límites térmicos. Caso barras al 90%.



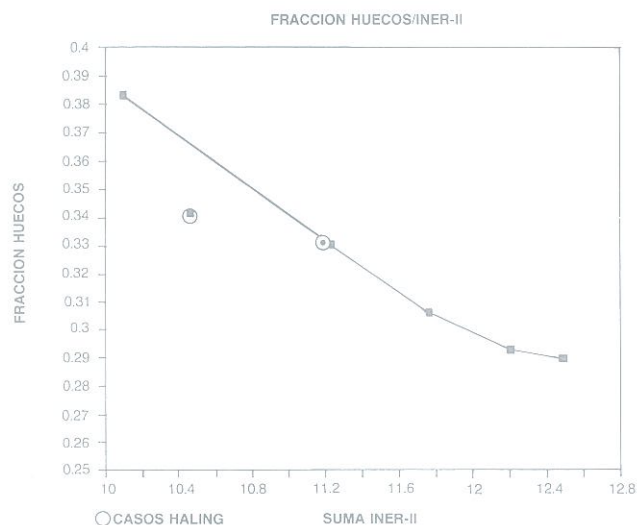
F VI Evolución límites térmicos. Caso barras al 100%.



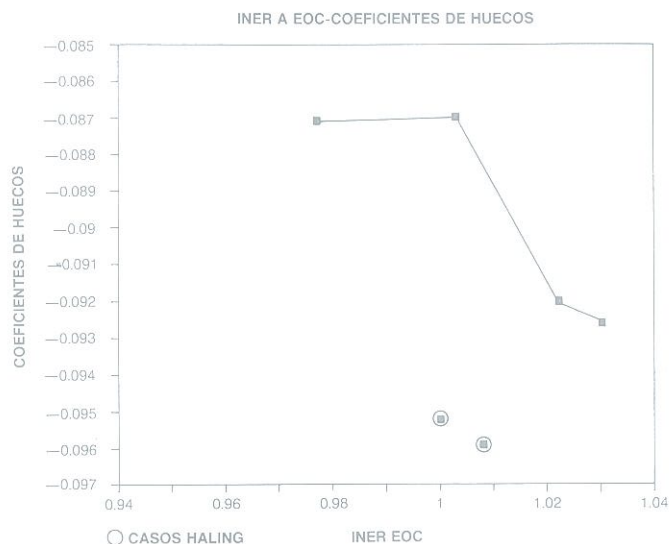
F VII Evolución límites térmicos. Caso barras medias.



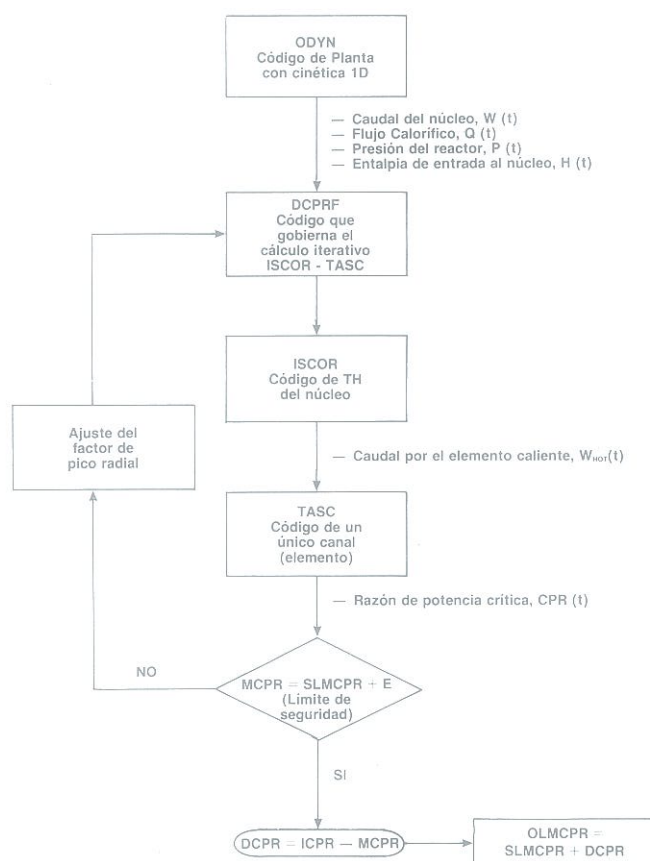
F VIII Evolución límites térmicos. Caso barras al 100% con introducción barras shallow y medias.



F IX Fracción de huecos a EOC en función de la integral del INER.



F XI Variación del coeficiente de huecos, ρ_v , con el INER a EOC.



F X Esquema de cálculo seguido para la determinación del límite de operación de MCPR (OLMCPR).

KF = 0.33 KMAX KMAX = 24 ó 25

Como caso de referencia generalmente se elige una simulación Haling; ésta consiste en calcular una situación de final de ciclo para la cual la forma de potencia es la misma que la utilizada para acumular el quemado a lo largo del ciclo.

Esta distribución de potencia es la que resulta en los mínimos factores de pico con todas las barras de control extraídas.

De manera rutinaria el índice INER-II se ha venido utilizando para comprobar la validez de los cálculos de licencia. Un valor del índice INER-II mayor a la unidad indica que el núcleo se ha quemado más hacia abajo que en el caso de referencia.

Para cuantificar la bondad de la gestión en los diferentes casos estudiados se ha empleado el índice INER-II.

En la figura II se representa la evolución del índice INER-II para los cinco primeros casos estudiados junto a los casos Haling.

Es posible correlacionar linealmente la energía obtenida en el ciclo con el valor integral de la curva de INER-II a lo largo del ciclo, tal como se muestra en la figura III. De esta gráfica se concluye que el índice INER-II es un buen indicador de la calidad de la gestión de un ciclo de un reactor BWR, ya que la variación del quemado con la integral del INER es una función casi-lineal.

Límites térmicos

Tal como se mencionó anteriormente, en todos los casos estudiados se han ajustado los esquemas de barras de control para dar cumplimiento a los valores de diseño de los límites térmicos MFLPD, CPRAT y MAPRAT.

En las figuras IV a VIII se muestra la evolución de los límites térmicos para los diferentes casos estudiados.

Fracción de huecos

Otro parámetro característico de la calidad de una gestión de ciclo es la fracción de huecos al final de ciclo. A iguales condiciones de potencia y caudal y sin barras de control, la fracción de huecos, media del núcleo viene determinada por la distribución axial de potencia, por tanto, por el INER.

Esta distribución de potencia a final de ciclo viene condicionada por la historia de quemado del ciclo, resultado directo de la gestión de barras de control empleadas.

En la figura IX se muestra la relación entre la fracción de huecos media del núcleo a fin de ciclo con la integral del INER-II, observándose una dependencia casi-lineal.

ANÁLISIS DE LOS TRANSITORIOS PARA LOS DIFERENTES ESTRATEGIAS DE OPERACION

Dada la fuerte dependencia de los transitorios en BWR's con la forma axial de potencia y con la distribución axial de huecos en el reactor es preciso emplear un código con cinética unidimensional y una nodalización axial detallada de la vasija, capaz de modelar en detalle los cambios de reactividad que se producen durante el transitorio. La metodología empleada por ENUSA para el análisis de transitorios es la desarrollada por GE, conocida con el nombre de GEMINI. Se trata de una metodología realista o "bestestimate", cuyo proceso de cálculo se presenta esquemáticamente en la figura X.

La severidad de un transitorio de sobrepresión depende fundamentalmente del perfil axial de potencia (Q) de la fracción de huecos (α) en el reactor y el coeficiente de reactividad del moderador, o coeficiente de huecos (ρ_m).

Las distintas alternativas de gestión del ciclo analizadas en el apartado 2 conducen a formas axiales de potencia, fracciones de huecos y reactividad muy diferentes, cuando el núcleo llega a la

condición de todas las barras fuera al final del ciclo a plena potencia (EOFPC, o, para simplificar EOC). Como se observa en la figura I, la forma axial es tanto más desplazada hacia la parte superior del núcleo cuanto más duro es el "spectral-shift" —mayor INER a EOC—, alcanzando factores de pico de hasta 1.41 (ver tabla 3.1) en nodos 15 y 16 de un total de 24 nodos axiales en que se ha dividido el núcleo. Así mismo, en la tabla X y en la figura IX se observa como la fracción de huecos a EOC disminuye cuando el perfil axial de potencia se haya desplazado —"picado"— hacia la zona superior.

Otro parámetro fundamental en la evaluación de los transitorios es el coeficiente dinámico de huecos (ρ_m). Como se observa igualmente en la tabla II y en la figura XI el valor absoluto de coeficiente de huecos tiende a aumentar con la operación con SS. Si bien se observa un comportamiento atípico de los cálculos Haling, ya que proporciona valores de ρ_m considerablemente más alto que los cálculos con barras.

El resultado final de un transitorio de sobrepresión es un compromiso entre la reactividad positiva introducida por el colapsamiento de huecos y la antireactividad debida al "scram". El transitorio será tanto más limitante cuanto más hacia arriba se desplace la potencia; puesto que las barras de control tardarán más tiempo en alcanzar la zona de alta densidad de potencia, degradándose el coeficiente de reactividad de scram.

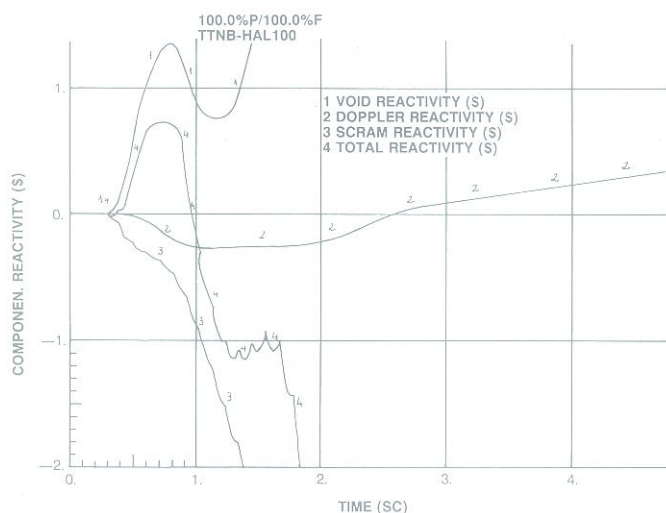
En las figuras XII y XIII se muestran las reactividades del núcleo en el caso Haling de referencia y en el de SS más severo (barras al 90% de caudal), respectivamente.

En principio se podría pensar que el transitorio debería ser más severo al aumentar la fracción de huecos; ya que al existir más huecos por colapsar, el aumento de reactividad en el núcleo, por huecos, será mayor (mayor producto $\rho_m X \alpha$). Sin embargo, este razonamiento es sólo aparente, ya que como se muestra en la tabla II, los resultados del transitorio empeoran cuando disminuye

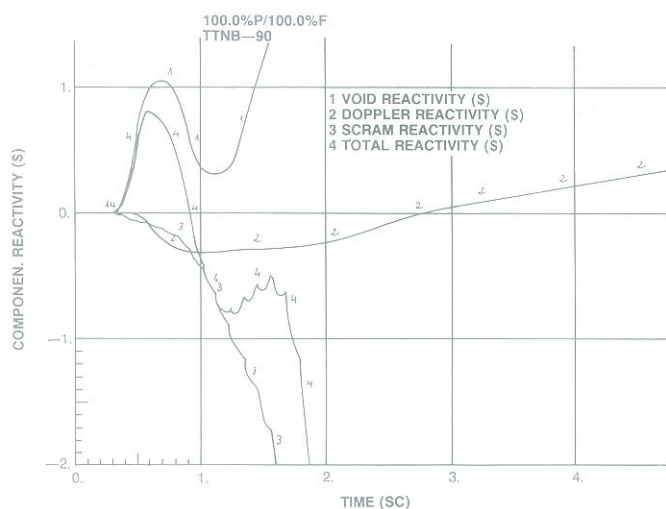
T II

RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS Y GETAB

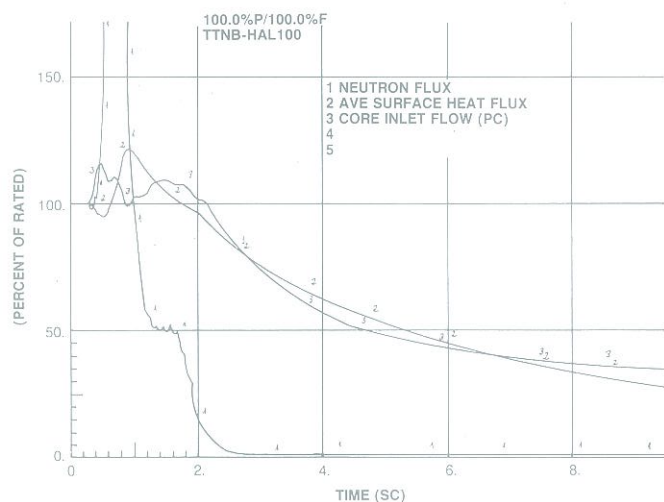
Caso	INER-EOC	Nodo	Factor de pico axial	α	ρ_m	$\rho_m X \alpha$	$Omáx, \%$ (t)	$Qmáx, \%$ (t)	ΔCPR
SHAL	0.977		1.27	0.33	—8.71E-2	0.029	406.8 (0.76)	119.1 (0.93)	0.164
90	1.03	15	1.41	0.289	—9.26E-2	0.0 27	578.7 (0.60)	127.5 (0.88)	0.241
100	1.022	16	1.39	0.292	—9.02E-2	0.027	552.0 (0.60)	127.0 (0.89)	0.238
KK100	1.003	16	1.3	0.307	—8.70E-2	0.027	489.6 (0.67)	126.1 (0.90)	0.222
HAL90	1.008	11	1.2	0.331	—9.59E-2	0.032	477.0 (0.70)	124.9 (0.91)	0.20
HAL100	1.000	7	1.19	0.341	—9.52E-2	0.0325	456.4 (0.70)	122.2 (0.92)	0.184



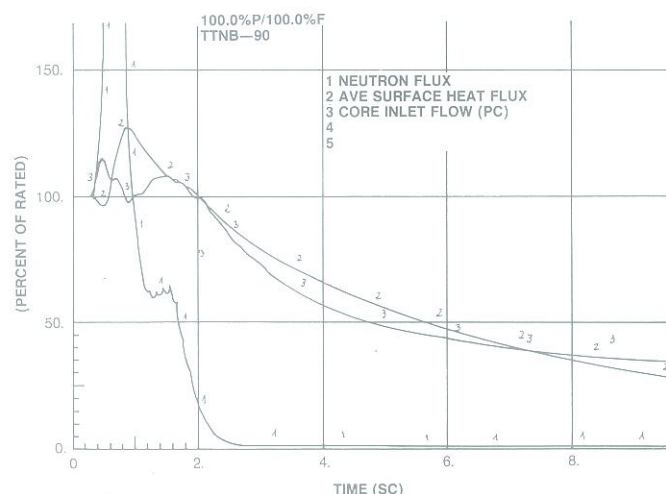
F XII Coeficiente de reactividad para el cálculo haling de referencia (transitorio de disparo de turbina sin bypass-TTNB).



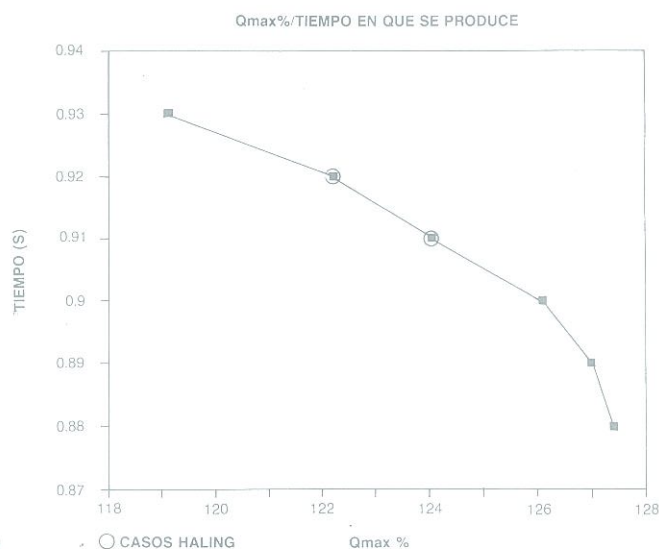
F XIII Coeficiente de reactividad para el caso de operación con "spectral-shift" más severo (transitorio de disparo de turbina sin bypass-TTNB).



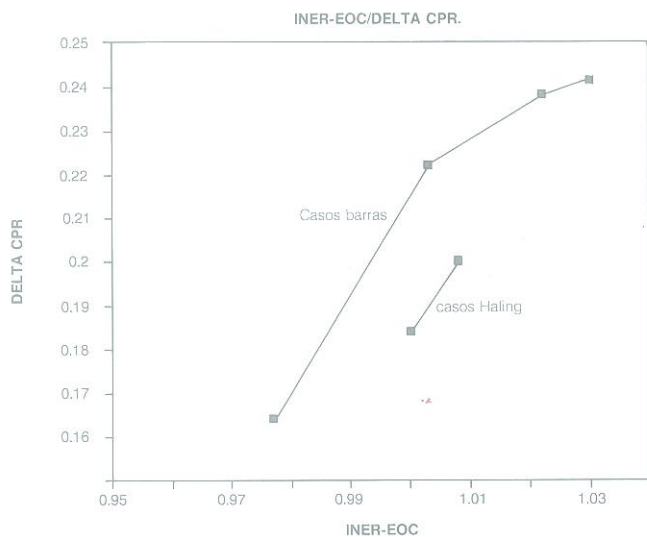
F XIV Evolución de los parámetros más importantes del transitorio para el cálculo haling de referencia (transitorio de disparo de turbina sin bypass-TTNB).



F XV Evolución de los parámetros más importantes del transitorio para el caso de operación con SS más severo (transitorio de disparo de turbina sin bypass-TTNB).



F XVI Tiempo el que se produce el máximo de flujo calorífico, frente a la magnitud de este máximo.



F XVII Variación del Δ CPR calculado para el transitorio de disparo de turbina sin bypass (TTNB) en función del INER o EOC.

la fracción de huecos. El motivo no es otro que la antireactividad de scram es más importante para el transitorio que la reactividad por huecos; de forma que el balance total de reactividades en el núcleo (ver figuras XII y XIII) es más desfavorable en caso de potencias altas en la zona superior del núcleo.

Finalmente, la excursión del flujo neutrónico y, por consiguiente, del flujo calorífico es máxima en el caso de máximo INER-EOC (barras-90), tal y como se observa al comparar las figuras XIV y XV. Esto se pone de manifiesto muy claramente en el instante en el que se produce el flujo calorífico máximo, que será tanto más rápido cuanto más lento sea el scram (ver figura XVI).

Como resumen del impacto de la operación con SS en los transitorios, en la figura XVII se muestra la evolución de DCPR con el INER-EOC. Se presentan 2 series de resultados, una para las simulaciones con barras y otras para cálculos Haling. En ambas series se concluye que a medida que aumenta el valor del INER se penaliza el DCPR de los transitorios. De ahí que para cada gestión de ciclo se deba imponer un límite máximo al INER-EOC, ya que de lo contrario el límite de operación de MCPR (OLMCPR) establecido en la Evaluación de Seguridad de la Recarga correspondiente podría resultar ser no conservador.

Otro resultado evidente que se desprende

de esta figura es que los cálculos Haling no son adecuados "a priori" para establecer el OLMCPR, cuando se opera con SS. Los motivos fundamentales son las notables diferencias en las formas axiales de potencia, factores de pico axial, fracciones de huecos y coeficientes de reactividad que se obtienen en las simulaciones Haling's, y que se han puesto de manifiesto muy claramente en esta ponencia (ver tabla II).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que para evaluar la capacidad real de quemado de un núcleo que opera con "spectral shift" no puede esperarse demasiada precisión de las estimaciones Haling, debiéndose simular la operación con barras de control.

Del estudio realizado resulta que la evolución del índice INER-II es un buen indicador de cuan bien se está quemando el ciclo, siendo muy útil para elegir qué combinaciones de secuencias de barras de control y caudales de operación son más recomendables desde el punto de vista de la producción de energía. Se comprueba la dependencia lineal de la energía total producida con el valor integral del índice INER-II a lo largo del ciclo.

Mediante el empleo del índice INER se ha podido comprobar cómo, desde el

punto de vista de la economía del ciclo de combustible, la operación de SS con barras (BSO) es más eficiente que con el caudal del núcleo (FCSS).

En centrales que operan con SS, la experiencia de ENUSA demuestra la necesidad de una fuerte interrelación entre el diseño del elemento combustible, el diseño de la recarga y la gestión del ciclo.

Para la evaluación de los transitorios es necesario disponer de un código que, mediante la utilización de cinética unidimensional, sea capaz de considerar las variaciones axiales de reactividad debidas a la operación con barras de control. Los resultados demuestran que la operación con "spectral shift" penaliza los límites térmicos y que debe garantizarse que el valor del INER a EOC no supere un máximo, para no invalidar los cálculos de licencia. De esto se concluye que existe un compromiso entre la optimización de la gestión del ciclo y la penalización en los límites térmicos.

Adicionalmente se comprueba cómo para la determinación de los límites térmicos en centrales que operan con SS, no se deben emplear, en principio, las características dinámicas deducidas mediante una simulación Haling. Esto es así, ya que la simulación Haling se aleja notablemente de la situación real de operación, produciendo resultados que pueden ser no conservadores.