

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

ALGUNOS ASPECTOS DEL DISEÑO FISICO
DE LA CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

Ing. Roberto Solanilla

Gerencia de Energía - CNEA

Apuntes de curso

Buenos Aires-Argentina

- 1973 -

COEFICIENTE DE REACTIVIDAD

La definición de las reglas de operación de un reactor nuclear, como así también el diseño de los elementos de control de la reactividad y el análisis de los accidentes y sus consecuencias requiere un conocimiento preciso del comportamiento dinámico del reactor (y de la planta en general), el cual dependerá de la forma en que varía la reactividad a los cambios de las características físicas y o geométricas del reactor.

Un coeficiente de reactividad es una cantidad diferencial, la que a su vez es un resultado de contribuciones positivas y negativas debido a cambios de los parámetros físicos. Su determinación segura requiere, entonces, un refinamiento mayor que lo usual en los métodos de cálculo.

En un reactor a uranio natural, moderador y refrigerante agua pesada a presión separados físicamente por un tubo o canal se pueden definir varios coeficientes :

- Coeficiente por variación de la temperatura del combustible
 $= \frac{\Delta \rho}{\Delta T_f}$
- Coeficiente por variación de la temperatura del refrigerante
 $= \frac{\Delta \rho}{\Delta T_r}$
- Coeficiente por variación de la temperatura del moderador
 $= \frac{\Delta \rho}{\Delta T_m}$
- Coeficiente por vaciado de un canal (pérdida de refrigerante)
 $= \frac{\Delta \rho}{\Delta P.R.}$
- Coeficiente por envenenamiento uniforme del moderador
 $= \frac{\Delta \rho}{\Delta ppm.}$
- Coeficiente por variación de la pureza del D₂O
 $= \frac{\Delta \rho}{\Delta \% D_2O}$
- Coeficiente por desplazamiento del banco de barras de control
 $= \frac{\Delta \rho}{\Delta b}$ (b : penetración del banco)

Definido un diseño nuclear (relación de concentraciones U²³⁸ y U²³⁵ respecto al volumen de moderador y refrigerante; heterogeneidades locales dada por la relación entre superficie y masa de uranio; heterogeneidad global definida por la relación entre volumen de manójo y moderador; excesos de reactividad controladas por absorbedores térmicos; tamaño del núcleo y fracción de escape, etc.) estos coeficientes variaron con la irradiación del núcleo y el estado del reactor (nivel de potencia).

A continuación se describirá brevemente la naturaleza de los cambios en los balances neutrónicos:

- 1) $\frac{\Delta \rho}{\Delta T_f}$: valores negativos, tendiendo a cambiar de signo con la irradiación.

La principal componente es la debida al efecto Doppler, que se manifiesta cuando hay un cambio en la temperatura del combustible produciéndose un ensanchamiento o acortamiento de la sección eficaz de resonancia. Debido a que el combustible está disperso (configuración manojo) la captura resonante variará con la temperatura, de forma que, por ejemplo, incrementando la temperatura se produce un ensanchamiento de la sección eficaz de resonancia y una disminución del autoblindaje, haciendo esto último, aumentar la captura resonante efectiva por la mayor penetración del neutrón en la barrita de uranio.

La principal contribución viene del U-238 por su gran concentración y es un efecto estabilizante.

Para los isótopos fisionables (U-235-Pu.239) el efecto con la temperatura es menor y actúa sobre la captura (estabilizante) y fisión (desestabilizante).

En el caso de la CNA el efecto Doppler provee un coeficiente del orden de $-1 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ y es casi constante con la irradiación, debido a la pequeña contribución del Plutonio formado.

Sin embargo el coeficiente total por variación de la temperatura del combustible, puede llegar a anularse o aún, tomar valores positivos para irradiación alta. La razón es que en los reactores de agua pesada hay una componente debida a la captura térmica que pasa de ser insignificante para baja irradiación a tomar valores iguales en valor absoluto pero de signo contrario para alta irradiación. En efecto, con la aparición de los productos de fisión y nuevos isótopos fisionable, la captura neutrónica aumenta y se produce un endurecimiento del espectro térmico (menor proporción de neutrones de baja energía) de forma que la importancia del Pu-239 aumenta (este tiene una resonancia en 0.3ev).

De esa forma cuando la temperatura del combustible aumenta se endurece aún más el espectro térmico y la fisión aumenta más que la captura total suministrando así una componente positiva.

Esta componente pasa de un valor casi nulo ($-0.3 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$) a tomar un valor igual que el del efecto Doppler, pero con signo opuesto ($+1 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$), para la irradiación del núcleo en condición de equilibrio (3500 Mwd/tu U).

El nivel de potencia influye primeramente y directamente en la temperatura del combustible de forma que la disminución de potencia influye haciendo más negativo el coeficiente total.

$$2) \quad \frac{\Delta P}{\Delta T_r} : \text{valores positivos y crecientes con la irradiación.}$$

La variación de la temperatura del refrigerante se manifiesta de dos formas : Cambio de las secciones eficaces térmicas con $(T_r)^{-\frac{1}{2}}$ y variación de la densidad del líquido tanto más cuanto mayor es la temperatura del refrigerante.

La primera componente es negativa para irradiaciones bajas y cambia de signo con la irradiación debido a la formación del Plutonio.

La disminución de la densidad del refrigerante a temperatura constante es un efecto destabilizante pero cualquier grado de irradiación debido fundamentalmente al incremento de las fisiones en el U-238 y disminución de la captura resonante relativa en el manejo: en efecto la disminución de la densidad del refrigerante actúa haciendo aumentar la posibilidad de no interacción del neutrón y su energía.

El efecto total es finalmente positivo y creciente con el que mado para altas temperaturas del refrigerante.

Las variaciones de potencia no producen grandes cambios en la temperatura media del refrigerante.

$$3) \quad \frac{\Delta P}{\Delta T_m} : \text{-valores negativos, menos negativos con la irradiación y con la concentración de boro en el moderador.}$$

Igualmente dos efectos diferentes se producen cuando cambia la temperatura del moderador: alteración de las secciones eficaces y de la densidad del moderador.

Mientras que la primera componente se comporta como en el caso anterior, la disminución de la densidad del moderador produce un efecto netamente contrario en la reactividad; es decir con la disminución de la densidad se produce: un aumento del libre camino medio en el moderador (y de esa forma un aplanamiento del flujo térmico), aumento de las fugas (escape) y disminución de la captura resonante relativa debido a la menor moderación.

Esos dos efectos prevalecen sobre el que produce el aplanamiento sobre la captura térmica, éste último juntamente con el efecto de temperatura, aumenta su importancia con el quemado del combustible.

Así es como el coeficiente total pasa de alrededor $-17 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ a sólo $-5 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ para el estado de equilibrio.

La disminución de la temperatura del moderador actúa sobre el coeficiente al igual que el agregado de boro en el moderador.

En el primer caso el coeficiente aumenta su valor absoluto es decir se hace más negativo, cuando la temperatura media del moderador aumenta, mientras que el agregado del boro actúa sobre las capturas térmicas, aumentando las debidas al moderador ("envenenado") y de esa forma, amplificando el efecto sobre las capturas térmicas que tiene el aplanamiento del flujo térmico del moderador respecto al del manajo por cambio de la densidad del moderador.

El coeficiente pasa de $-17 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ para $T_m=180^{\circ}\text{C}$ sin boro y núcleo fresco a $-21 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ con $T_m=210^{\circ}\text{C}$, sin boro y núcleo fresco.

Agregando 10 ppm de boro 10 el coeficiente cambia de $-17 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$ a $-7 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$.

4) $\frac{\Delta \rho}{\Delta P.R.}$: valores positivos decrecientes con el quemado y creciente con la concentración de boro en el moderador.

El efecto de la pérdida del refrigerante es similar al producido por la disminución de la densidad del refrigerante.

Además de los efectos mencionados anteriormente se agrega la disminución de las capturas térmicas en el volumen del manajo del combustible producido por la desaparición del refrigerante, lo que se acompaña además con un relevamiento del flujo térmico en el manajo respecto al moderador.

El agregado de boro en el moderador hace más pequeña aún la diferencia entre ambos flujos explicando así el crecimiento del coeficiente del valor de 1500 pcm para núcleo fresco sin boro a 2000 pcm para cuando la concentración del boro es del orden de 10 ppm.

Cuando la irradiación aumenta el coeficiente toma valores menores que los indicados más arriba debido al endurecimiento del espectro térmico, el que produce un efecto contrario al que se describió anteriormente.

5) $\frac{\Delta \rho}{\Delta T_{\text{mod}}}$: negativo y menos negativo con el incremento de la temperatura del moderador.

Agregando un absorbente térmico en el moderador la reactividad disminuye. La menor efectividad del boro con el incremento de la temperatura del moderador o la irradiación del combustible, proviene de la disminución del factor de desventaja del moderador (o relevamiento relativo del flujo térmico en el moderador), cuando la temperatura del moderador aumenta de forma que la absorción efectiva del boro disuelto es menor.

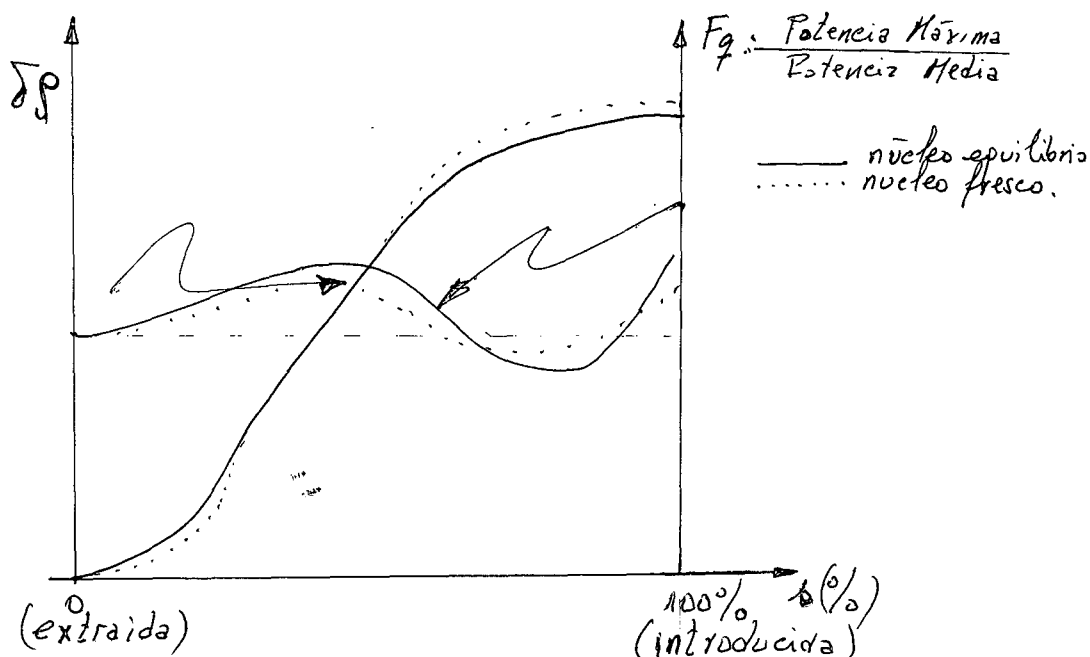
6) $\frac{\Delta \rho}{\Delta \% D_2O}$: Positivo

La disminución del H_2O contenido ó el aumento de la concentración del D_2O produce un efecto positivo en la reactividad debido a la disminución de las capturas adicionales en H_2O (la sección eficaz de absorción del H_2O es casi 500 veces más grande que las del D_2O).

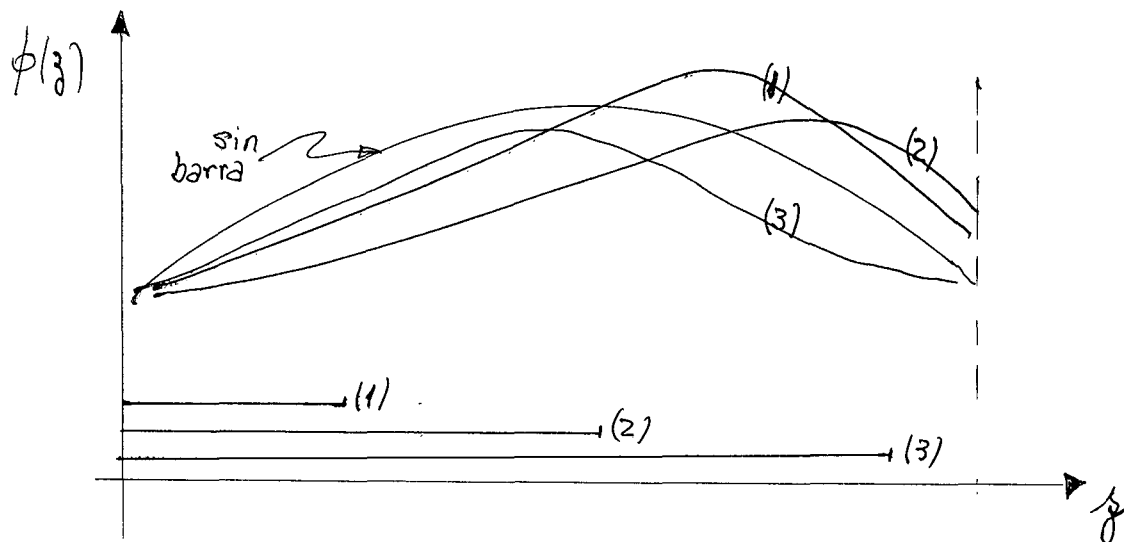
Por ejemplo, solamente el pasaje de una pureza de 99,75% a 99,85% en el refrigerante incrementa la reactividad en casi 200 pcm.

7) $\frac{\Delta \rho}{\Delta \beta}$: Negativo

Las curvas de efectividad de las barras de control y del factor de forma son del tipo



La variación de F_q es debida a que las barras al descender comienzan por desplazar hacia abajo el máximo de potencia hasta que, cuando éstas están por la mitad aproximadamente del núcleo y debido a la gran efectividad diferencial, producen un aplanamiento axial el que dejará de ser efectivo cuando la barra pierde eficacia diferencial.



El quemado produce una leve disminución de la eficiencia y más acentuada variación del F_q . Estas curvas dependen de la temperatura del moderador. Cuando esta temperatura aumenta el aplanamiento del flujo del moderador hace aumentar la absorción efectiva en las barras de control.

En el Reactor de CNA hay continuamente introducidos dos bancos diferentes de barras de control : el correspondiente a las barras de Hf ("Negras") para control del nivel de potencia, con una inserción de $1/3$ aproximadamente y las barras de acero (grises) para compensar las reactividades inducidas por el Xenon, introducidas casi totalmente ($\approx 80\%$).

La eficiencia de cada banco y el comportamiento de F_q con la inserción no es igual al que resulta para cada una independientemente.

El valor del banco negro, a igualdad de inserción, es tanto más chico cuanto más extraído está el banco de barra grises.

Los diagramas para bancos mixtos son elocuentes de las limitaciones en las posiciones de los bancos.

CUADRO SINOPTICO

Coeficiente de reactividad (por) Estado	Moderador $\frac{\Delta C}{\Delta T_m}$	Refrigerante $\frac{\Delta C}{\Delta T_r}$	Combustible $\frac{\Delta C}{\Delta T_f}$	Potencia $\frac{\Delta P}{\Delta \% P}$	Envenenamiento $\frac{\Delta P}{\Delta PPM}$	Barra de control $\int \frac{\Delta P}{\Delta \lambda} \cdot d\lambda$	título $\frac{D_{2O}}{\Delta P} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta \% D_{2O}}$
(1) "normal" y combustible fresco	negativo	positivo	negativo	negativo	negativo	negativo	positivo
(2) igual que (1) pero combustible irradiado	menos negativo	más positivo	casi nulo	levemente positivo	menos negativo	menos negativo	
(3) igual que (1) pero con boro	menos negativo	más positivo	insensible	menos negativo	-	insensible	
(4) igual que (1) pero potencia menor	menos * negativo	insensible	más negativo	más negativo	más * negativo	menos * negativo	

* Acá se refiere a una temperatura del moderador menor que la correspondiente al estado "normal".

Estado normal se refiere al 100% de potencia con $T_m = 180^{\circ}C$ y combustible que incluye el xenon (que correspondería a ~ 40 horas de funcionamiento).

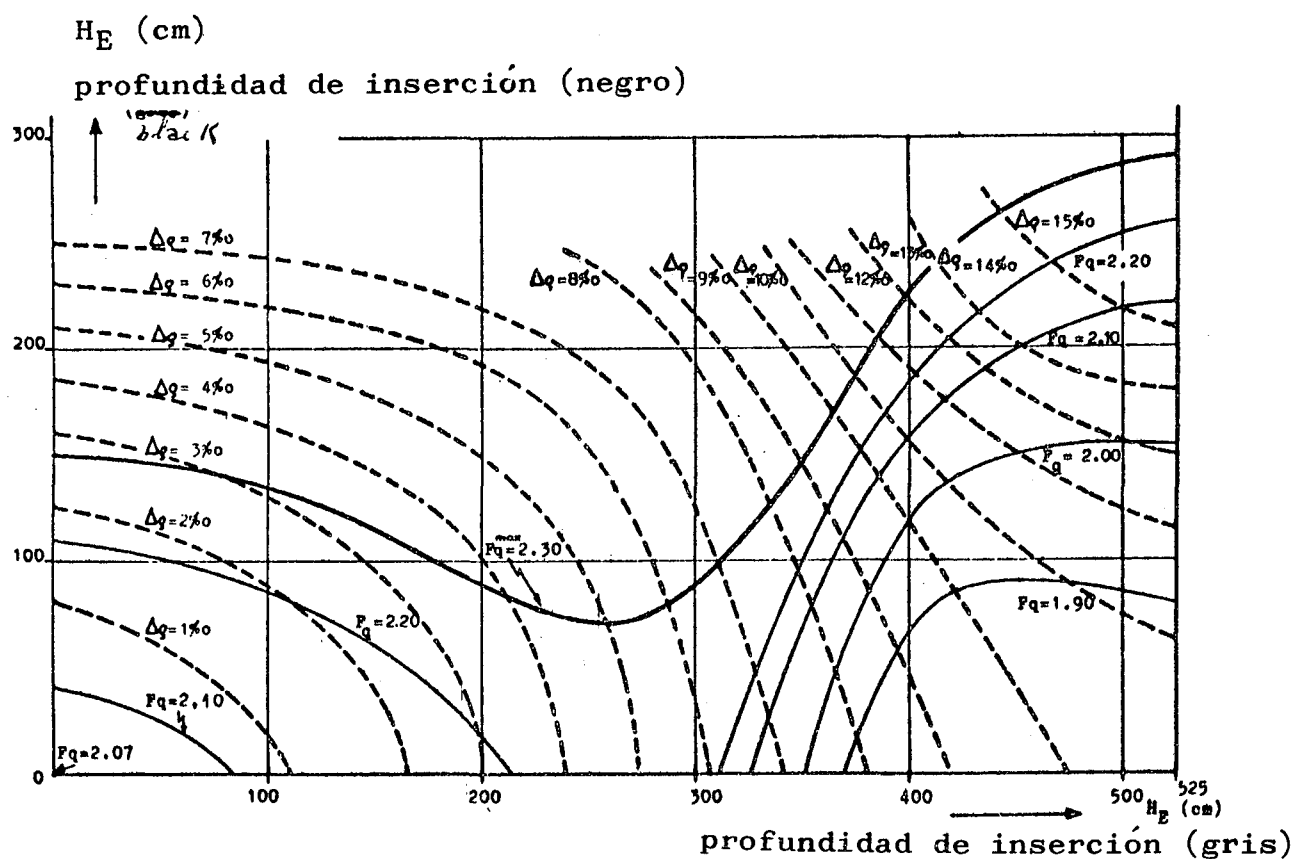


Fig. 1

Efectividad y perturbación de la densidad de potencia de las barras de control diagonales (negra y gris)

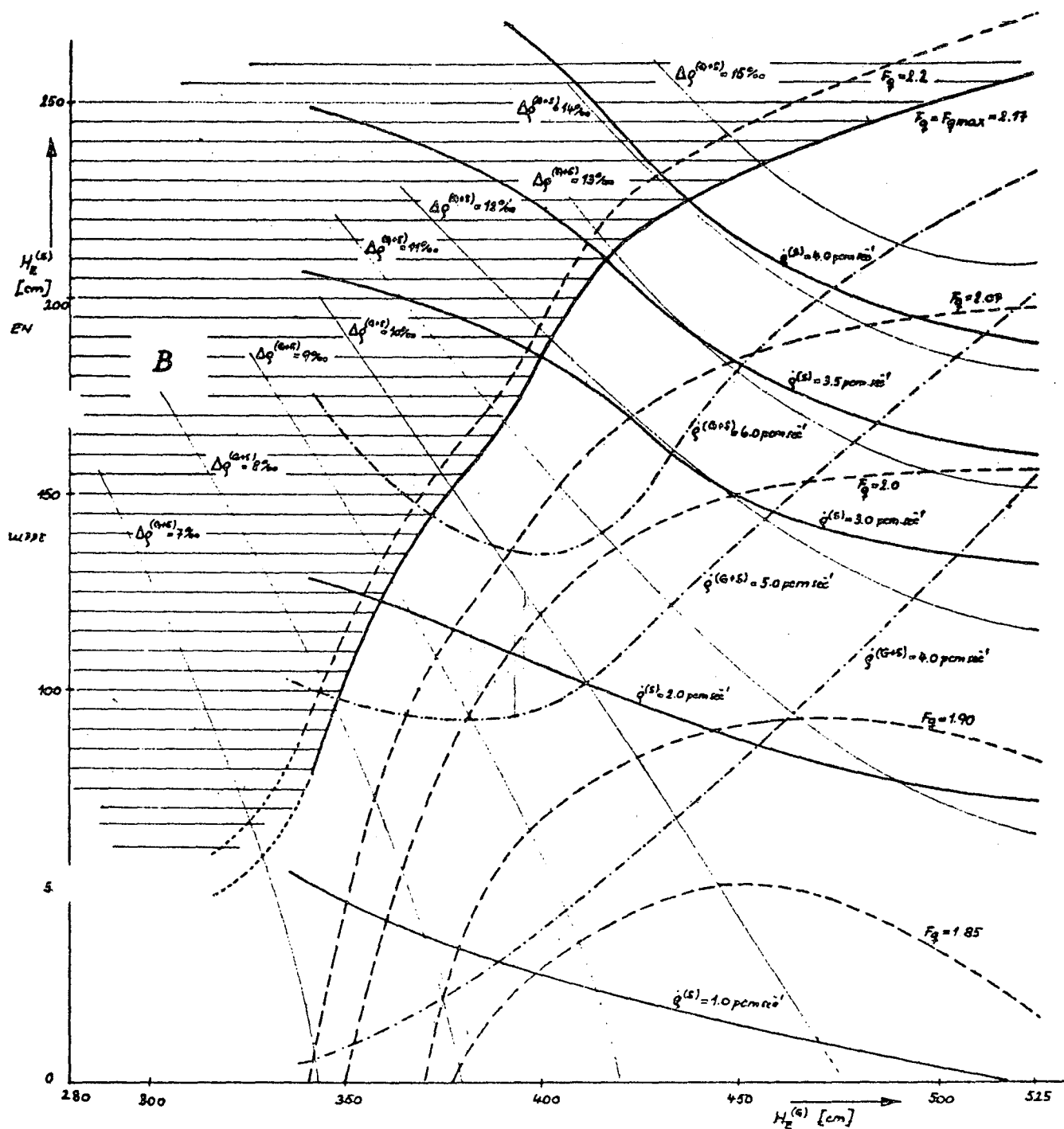


Fig. 2

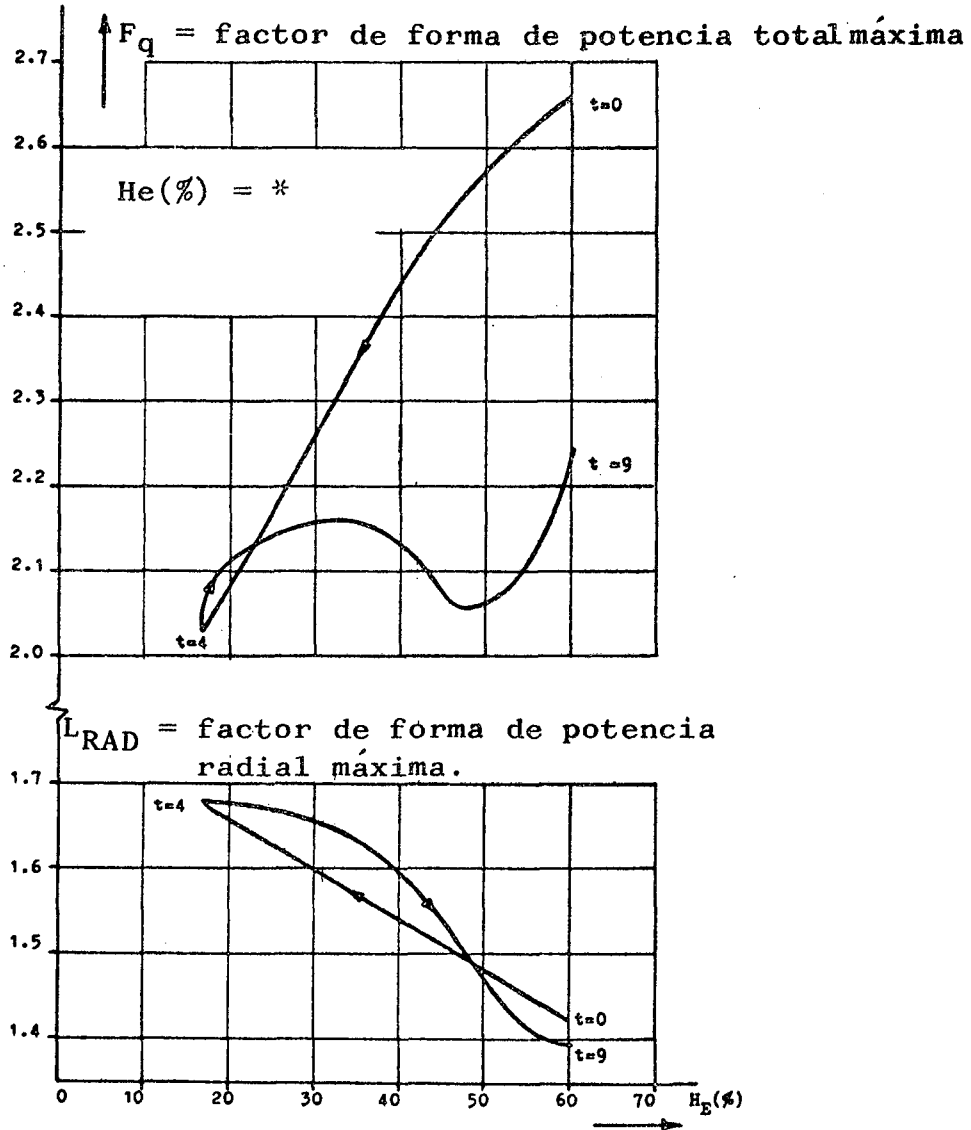


Fig. 3

Perturbación dependiente del X_e durante la variación de potencia (mayor valor de $\Delta \rho$)

* $He(\%)$ = profundidad de inserción de las barras de control usadas para la búsqueda de criticidad (% del total de la altura del núcleo)

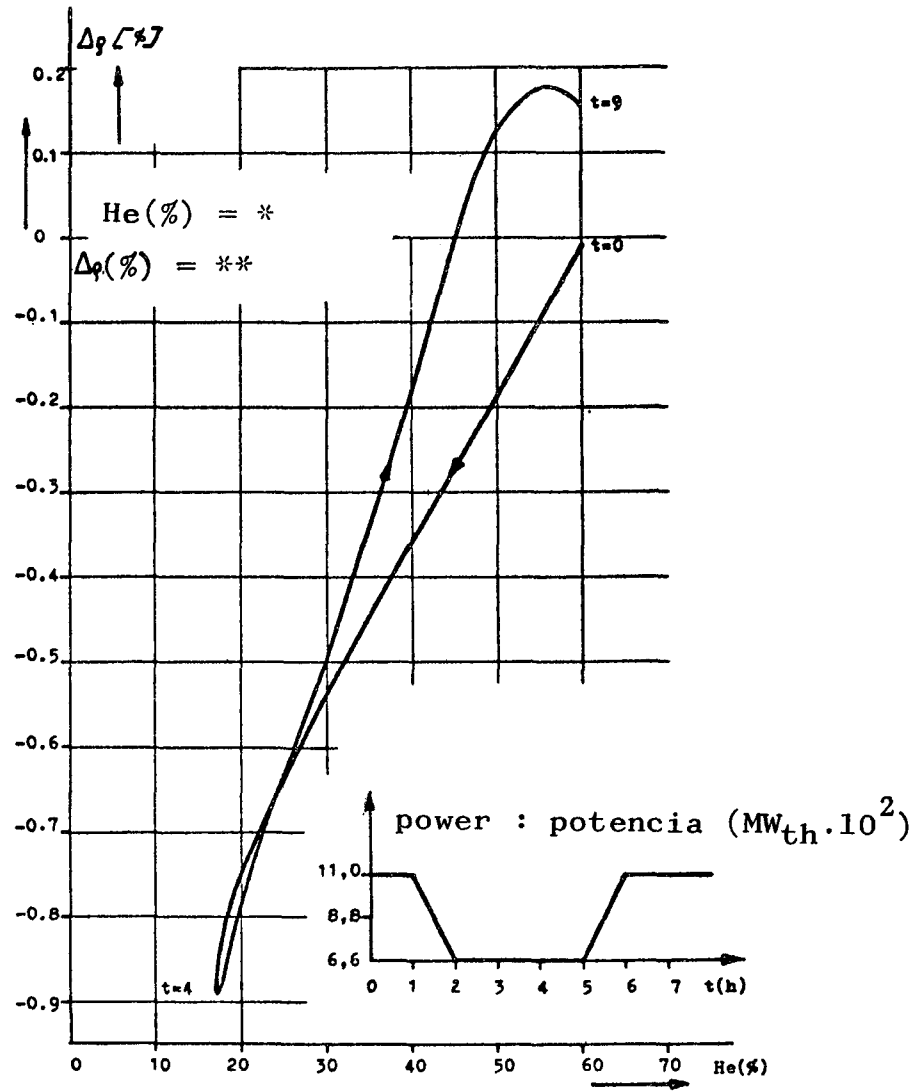


Fig. 4

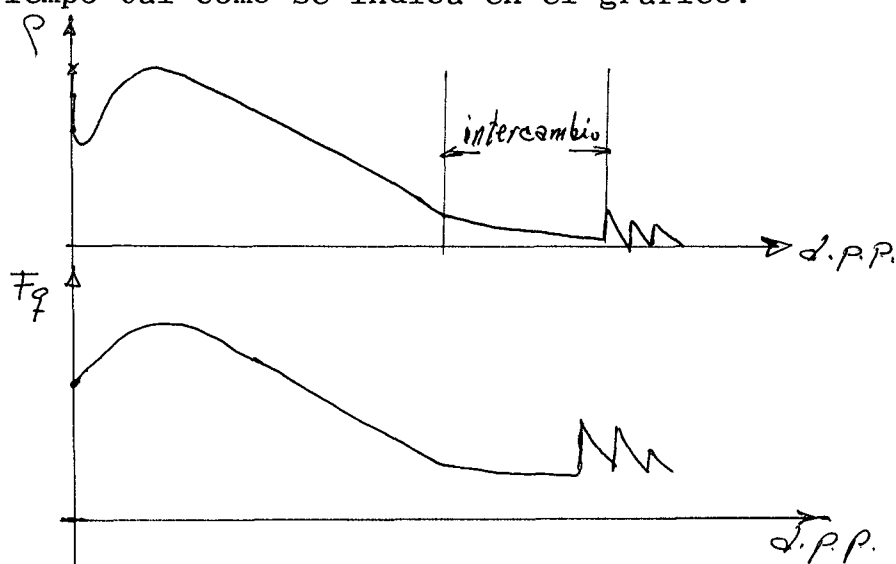
Efectividad dependiente del X_e durante la variación de potencia.

* $\text{He}(\%)$ = profundidad de inserción de las barras de control usadas para la búsqueda de criticidad.

** $\Delta \rho(\%)$ = efectividad de las barras de control.

Pasaje del estado inicial al correspondiente a la condición de equilibrio en la velocidad de extracción del combustible del reactor.

La reactividad y el factor de forma presentan una variación con el tiempo tal como se indica en el gráfico.

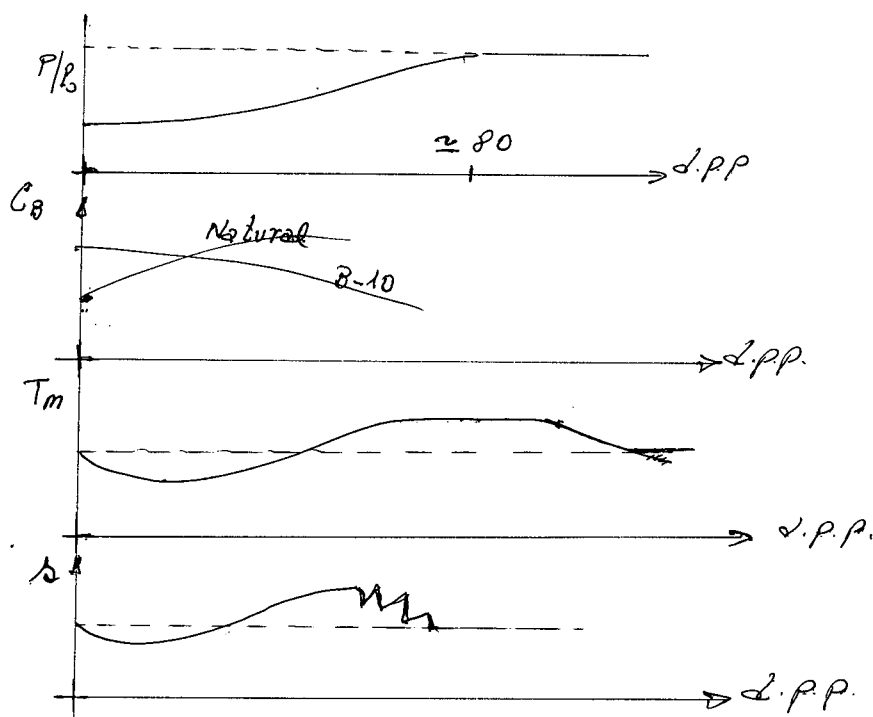


La distribución de potencia inicial es bastante diferente a la de diseño para la condición de equilibrio, pero esta última corresponde a una dada distribución de combustible irradiado, mientras que inicialmente todo el combustible tiene una irradiación nula o muy pequeña.

El incremento que F_q experimenta al principio es debida como en el caso de reactividad, al mayor aumento de la producción que de la absorción de neutrones, efecto, por otro lado, que tiene una importancia mayor en el centro del reactor. Posteriormente empieza a predominar la absorción, actuando como efecto "aplanador" de la distribución de potencia.

Esta característica que presenta el comportamiento del reactor de la CNA para los primeros 80 días obliga a disponer de mecanismos de compensación de reactividades, solamente para ese período, y a bajar la potencia neta del reactor para no superar los valores límites en densidad de flujo calórico (600 w/cm o 7.1MW por canal).

Combinando el agregado de boro natural, el calentamiento-enfriamiento del moderador y el grado de inserción de las barras de control, es posible mantener en todo momento el sistema crítico, a pesar que para los 20-30 días la reactividad del reactor es un 20% superior que la inicial.



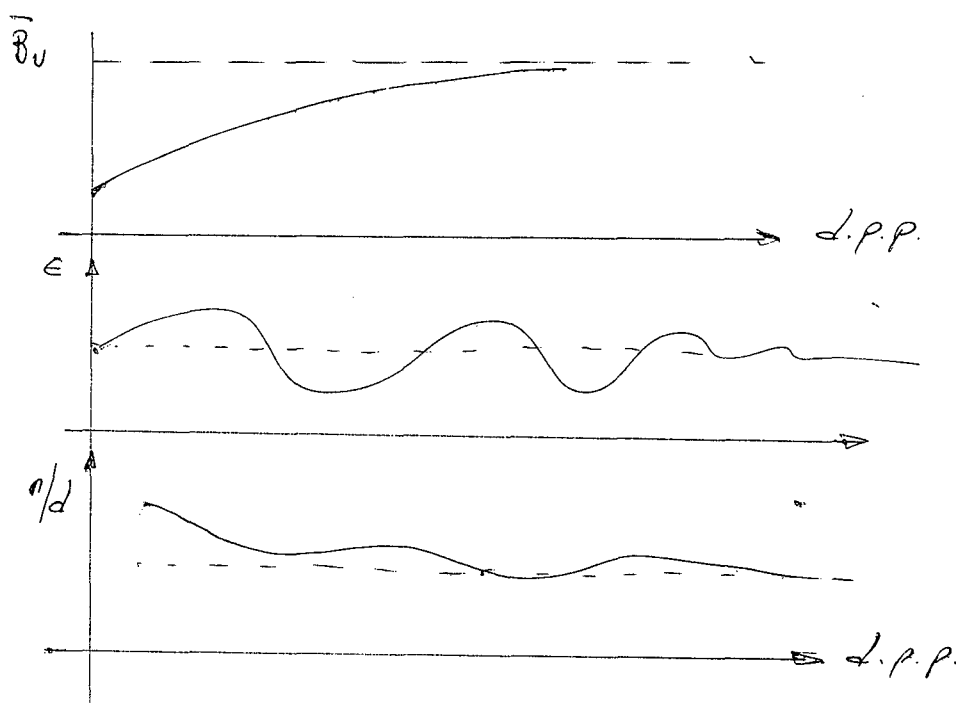
Así es como se llega a los 80 dpp en donde la reactividad del sistema es aproximadamente nula (+ 1% del exceso sirve para compensar los materiales de estructura e instrumentos internos) y el factor de forma menor que el de diseño. Acá caben tres posibilidades : empezar a introducir combustible fresco o intercambiar combustible del reactor más quemado (en el centro/por otro de menor quemado-periférico-). Si esto último es lo que se adopta (y así será finalmente el temperamento de Siemens) la reactividad varía en la forma indicada, permitiendo desplazar en casi 15 a 20 días(plena potencia), el momento de introducir el combustible fresco. Además este procedimiento permite contar con una distribución de quemado del núcleo al inicio de las operaciones de recarga del combustible más parecida a la correspondiente del "estado de equilibrio", en donde existen dos zonas (la central y periférica) de extracción y los dos intermedios, de introducción; y por lo tanto dos "camino"s posibles que recorre el combustible en el reactor.

Desde el momento que se inició la 1^{era}. operación de recarga del combustible fresco hasta que se alcanza la denominada "condición de equilibrio" (condición de diseño) pasa un tiempo que puede ser más o menos largo dependiendo de como se realizan las operaciones.

Esta etapa se caracteriza por un quemado de extracción (o tiempo de residencia del combustible) menor que el de "diseño", una velocidad de extracción mayor, una secuencia de visitas de la máquina y una secuencia del empleo del camino 1 o 2 no periódico, una dispersión, alrededor del quemado medio, del quemado de extracción variable, etc.

Todas estas características no son las de un régimen teórico estacionario o "en equilibrio".

A título de ejemplo, la variación previsible del quemado medio de extracción, dispersión alrededor de ese quemado del combustible extraído y número de elemento extraídos por unidad de tiempo es del tipo:



Este período de transición exige un cuidadoso seguimiento de la distribución de potencia y factor F_2 , pues el ingreso de combustible de baja irradiación en la zona central (que es el que por otro lado provee más reactividad) desmejora la distribución de potencia.

Es de prever en esta etapa que el movimiento del combustible se separe del esquema de la "condición de equilibrio" de dos caminos y se acerque al de "tres caminos" o tres movimientos por combustible. De esa forma se aumentará el número de visitas de la máquina de recambio pero permitirá un pasaje más gradual de zonas de menor densidad de potencia a mayor densidad.

La empresa Siemens ha previsto un contacto regular entre la operación real de la planta y la predicción-correlación del movimiento del combustible en el reactor. (~~Brendi~~ → TRISIE)

El objetivo del operador o explotador de la Central debe ser el de extraer la mayor cantidad de energía por cada Kilo de Uranio puesto en el reactor sin exceder los límites de seguridad impuesto en el diseño termo-hidráulico-mecánico del reactor. Debido a la variación que experimenta la distribución de potencia con las condiciones de operación (posición de los bancos de barras, estado y ubicación del combustible extraído o introducido, nivel de potencia, temperaturas del moderador, pureza de agua pesada, etc.) es necesario un seguimiento detallado para una buena y segura predicción de recarga de combustible.

R. Solanilla
12.12.73