

**“CALCULO DE COEFICIENTES DE REACTIVIDAD DE LA
CENTRAL NUCLEAR ATUCHA-II EN EL PERIODO INICIAL DE
OPERACIÓN HASTA EL PRIMER RECAMBIO DE COMBUSTIBLE”**

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

Alumno:	Gonzalo D. Fernández
Director:	Facundo Khatchikian
Co-director:	José Manuel Fink



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

1. INTRODUCCIÓN	3
2. COEFICIENTES DE REACTIVIDAD	5
3. DESCRIPCIÓN DE LOS CÓDIGOS Y MODELOS.....	6
3.1 CÓDIGOS DE CÁLCULO	6
3.1.1 WIMS-D5.....	6
3.1.2 PUMA 4	7
3.2 MODELOS	7
3.2.1 Modelo para la celda de CNA 2.....	7
3.2.2 Temperatura y densidad de los materiales de la celda	9
3.2.3 Modelo para el núcleo de la CNA 2	12
3.3 PROGRAMAS AUXILIARES.....	13
3.3.1 WimsABf.exe.....	13
3.3.2 WimsCoef31.exe	13
3.3.3 PreHomCon51.exe	13
3.3.4 Homcon51.exe	13
3.3.5 Dens2.exe	13
3.3.6 TablasWims.pl.....	13
4. SIMULACIÓN DEL TRANSITORIO.....	14
4.1 METODOLOGÍA E HIPÓTESIS UTILIZADAS.....	14
4.2 LIMITACIONES DE POTENCIA Y REACTIVIDAD	16
4.3 SIMULACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL REACTOR AL 55% DE PLENA POTENCIA	18
4.4 SIMULACIÓN DE LA TRANSICIÓN HASTA EL PRIMER RECAMBIO DE COMBUSTIBLE.	24
4.4.1 Concentración crítica de boro para núcleo fresco	24
4.4.2 Cálculos de reactor.....	25
5. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE REACTIVIDAD.....	31
5.1 COEFICIENTE DE REACTIVIDAD DE TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE.....	31
5.2 COEFICIENTE DE REACTIVIDAD DE TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE.....	32
5.3 COEFICIENTE DE REACTIVIDAD DE TEMPERATURA DEL MODERADOR	34
5.4 COEFICIENTE DE REACTIVIDAD POR CONCENTRACIÓN DE BORO	35
5.5 COEFICIENTE DE REACTIVIDAD POR VACÍO DE REFRIGERANTE.....	36
6. CONCLUSIONES	38
7. BIBLIOGRAFÍA	40

1. INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear Atucha II (CNA2) se encuentra actualmente en construcción, estando programado el inicio de su operación comercial en 2011. Es un reactor de recipiente de presión de diseño alemán (Siemens), que consta de 451 canales verticales, dentro de cada uno se encuentra suspendido un elemento combustible (EC) de 5,3 m de longitud activa, refrigerado por agua pesada. Cada elemento combustible es un conjunto de 37 barras de zircaloy que contienen las pastillas combustibles de óxido de uranio (UO_2) natural dispuestas en anillos concéntricos de 1, 6, 12 y 18 barras. Los canales con los elementos combustibles están insertados en el tanque del moderador, que también es agua pesada, pero en un circuito separado del agua pesada del refrigerante. La temperatura promedio del moderador es de 177 °C y la del refrigerante 296 °C, ambos a una presión de 115 atm. La potencia de la central es de 2160 MW térmicos y entrega una potencia eléctrica de 745 MW. En los primeros días de operación, las condiciones del núcleo del reactor son muy diferentes de las que tendrá el resto del tiempo (núcleo en equilibrio), donde el comportamiento promedio se mantiene constante a lo largo de los años.

La determinación de los coeficientes de reactividad de un reactor tiene gran importancia para la operación de la central. Estos son una medida de la variación de la reactividad del reactor frente a las variaciones de parámetros físicos como la temperatura del moderador, la concentración de boro en el agua pesada, etc. Cálculos neutrónicos previos han analizado el comportamiento del núcleo de la CNA2 para el núcleo fresco (inicial) y para el núcleo en equilibrio, pero todavía no se han calculado los coeficientes de reactividad durante la transición del núcleo inicial al de equilibrio.

Al arrancar por primera vez la Central, se debe poner boro en el sistema refrigerante-moderador para compensar el exceso de reactividad debido a que los combustibles son todos nuevos (frescos). Por este mismo motivo, el flujo neutrónico es mayor en el centro del reactor, y no plano como en el núcleo en equilibrio, de modo que la potencia del reactor se debe limitar al 55%PP (55% de plena potencia). De esta forma, no se exceden ni la potencia lineal ni las potencias de canal permitidas en cada una de las 5 zonas hidráulicas. A medida que se va aplanando el flujo en la zona central del núcleo, la potencia del reactor se va subiendo lentamente, siempre respetando los límites para las potencias de canal y lineal.

Durante las primeras horas de operación la reactividad disminuye debido al crecimiento del xenón 135 y otros productos de fisión. Luego, a medida que se va quemando el combustible se va formando plutonio 239 y la reactividad aumenta. Estos cambios de reactividad se deben compensar agregando o sacando el boro disuelto en el sistema refrigerante-moderador. Dado que el efecto del boro es grande sobre la reactividad (el cambio de 0,5 ppm en la concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador equivale a un cambio en la reactividad de aproximadamente 2,5 mk), se deben calcular distintos conjuntos de secciones eficaces para las distintas concentraciones de boro.

Una vez superado el “pico de plutonio”, la reactividad empieza a disminuir constantemente debido a que el uranio 235 se va consumiendo y la formación de plutonio no logra compensar la desaparición de éste isótopo. Finalmente, cuando todo el boro ha sido extraído del sistema refrigerante-moderador (quedando sólo una pequeña fracción de boro residual), la única forma de mantener crítico el reactor es realizando recambios de combustible, extrayendo del reactor los elementos más quemados y remplazándolos por nuevos.

En operación normal y en estado estacionario, el núcleo se encuentra en estado crítico y las distribuciones de flujo y potencias se encuentran aplanadas (son aproximadamente homogéneas en todo el núcleo, exceptuando las zonas cercanas al borde del reactor). Por otro lado, la máxima potencia lineal en todo el reactor y las máximas potencias de canal por zona hidráulica tienen valores inferiores a los límites de seguridad establecidos por cálculos termohidráulicos. Además, si la potencia de uno o más canales disminuye entonces aumenta la potencia en otros canales para compensar esa disminución, de manera que la potencia del reactor sea constante. Las estrategias de recambio de combustible, entendiendo por esto la operación de transferir elementos combustibles de un canal a otro del reactor o de quitar un elemento combustible gastado e introducir uno nuevo, se planifican para mantener aplanados los perfiles del flujo y las potencias de canal y además evitar que se superen los límites para la potencia lineal y las potencias de canal en cada zona hidráulica.

En este trabajo se simuló la transición del reactor desde núcleo con combustible fresco, variando la concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador y subiendo la potencia total del reactor hasta que la máxima potencia de canal se aleja de los canales centrales. Esto ocurrió a los 132 días calendario (o equivalentemente a los 95,4 días de plena potencia), cuando el reactor se encontraba al 100%PP. En este punto, la disminución de la potencia en los canales centrales produjo un aumento de las máximas potencias en las zonas hidráulicas 1 a 4, de modo que sus valores se encontraban muy cerca de los límites de seguridad establecidos para estas zonas del reactor. Este acercamiento de las potencias en los canales periféricos del reactor a sus valores máximos permitidos obliga a realizar el primer recambio de combustible para continuar operando la central a plena potencia.

Una vez realizada la simulación de esta primera parte de la transición, se calcularon los coeficientes de reactividad del reactor en función de los días de operación. Los coeficientes calculados fueron los de temperatura del combustible, de temperatura y densidad del refrigerante, de temperatura y densidad del moderador, de vacío de refrigerante y de concentración de boro. Tanto el coeficiente de reactividad de vacío de refrigerante como el de temperatura de refrigerante resultaron positivos durante toda la simulación, mientras que el resto de los coeficientes calculados resultaron ser negativos.

2. COEFICIENTES DE REACTIVIDAD

El coeficiente de reactividad (CR) de un parámetro físico del reactor, como la temperatura del combustible o la concentración de boro en el moderador, es una medida de la tasa de cambio de la reactividad del núcleo frente a variaciones del parámetro. Un coeficiente de reactividad negativo implica que la reactividad disminuye si el valor del parámetro aumenta y se incrementa si el valor del parámetro disminuye. En cambio, un coeficiente de reactividad positivo implica que la reactividad del núcleo aumenta o disminuye si el valor del parámetro aumenta o disminuye respectivamente. Un reactor con coeficiente de reactividad negativo es estable si el aumento de la reactividad produce un aumento del valor del parámetro y es inestable si el aumento de la reactividad disminuye el valor del parámetro. Por el contrario, un reactor con coeficiente de reactividad positivo es estable si el aumento de la reactividad produce una disminución del parámetro y es inestable si el aumento de la reactividad aumenta el valor del parámetro.

El coeficiente de reactividad α_x de un parámetro físico x se define como

$$\alpha_x = \frac{\Delta\rho}{\Delta x} = \frac{\rho_{pert} - \rho_{ref}}{x_{pert} - x_{ref}}$$

donde ρ_{pert} es la reactividad del núcleo cuando se perturba el parámetro físico desde su valor de referencia x_{ref} , para el que la reactividad del núcleo es ρ_{ref} , hasta el valor perturbado x_{pert} . Esta ecuación es la que se usa para el cálculo de los coeficientes de reactividad.

En el caso del coeficiente de reactividad por vacío del refrigerante, éste se define como

$$\alpha_{vac.ref} = \rho_{vac} - \rho_{ref}$$

donde ρ_{vac} es la reactividad del núcleo cuando hay vacío de refrigerante.

Se pueden calcular tantos coeficientes de reactividad como parámetros físicos caractericen el reactor. En este trabajo, se calcularon los coeficientes de reactividad de temperatura del combustible, temperatura del refrigerante, temperatura del moderador, concentración de boro en el agua pesada y de vacío de refrigerante. Para el cálculo del coeficiente de reactividad de un parámetro en particular se perturbó su valor de referencia, dejando sin perturbar el resto de los parámetros físicos del reactor, de la siguiente manera:

- CR de temperatura del combustible: se incrementó su temperatura en 50 °C.
- CR de temperatura del refrigerante: se incrementó su temperatura en 10 °C.
- CR de temperatura del moderador: se incrementó su temperatura en 10 °C.
- CR de concentración de boro en el agua pesada: se incrementó la concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador en 1 ppm.

- CR de vacío de refrigerante: se asignó a la densidad de masa del refrigerante el valor $0,0013 \text{ g/cm}^3$, que es la densidad del aire a 1 atm de presión.

Cabe mencionar que cuando se perturbaron las temperaturas del refrigerante y del moderador para el cálculo de los respectivos coeficientes de reactividad, en cada caso también se asignaron a sus densidades de masa los valores que corresponden a la temperatura perturbada. Por lo tanto, se calcularon en estos casos los coeficientes de reactividad respecto de las variaciones de temperatura y densidad simultáneamente, pero por simplicidad se los seguirá llamando coeficientes de reactividad de temperatura.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS CÓDIGOS Y MODELOS

3.1 Códigos de cálculo

3.1.1 WIMS-D5

El código WIMS-D5b [1] es una versión mejorada de WIMSD (que es una versión lanzada en el año 1964 del popular código WIMS), desarrollada por AEA Technology. Se aplica a la resolución de la ecuación de transporte neutrónico en una celda de combustible con un espectro multigrupo de energías. Los principales resultados son el factor de multiplicación, las secciones eficaces macroscópicas multigrupos y las densidades isotópicas en función del quemado, entre otras.

WIMS-D5b toma sus datos de entrada de un archivo de texto escrito en formato de palabras clave (como NMESH o ANNULUS) seguidas de un conjunto de valores numéricos. Los datos se organizan en 3 grupos:

- a) PREAMBULO: definen los requerimientos computacionales del problema, por ejemplo, el número de grupos de energía, grilla espacial de cálculo, rutina principal de transporte, etc.
- b) PRINCIPAL: definen las características físicas del problema, como por ejemplo, la composición de los materiales involucrados en el problema, la forma geométrica de la celda, el buckling geométrico o el material, etc.
- c) EDICION: definen nuevos valores de los datos principales para recalcular parámetros, por ejemplo, valores del buckling para los que se calcula el flujo o las secciones eficaces.

El código es unidimensional, pero pueden realizarse cálculos bidimensionales en celdas con geometría circular. En particular, WIMSD fue desarrollado para hacer cálculos neutrónicos en celdas formadas por racimos (clusters) cilíndricos de combustible separados por moderador, además de celdas homogéneas y pin cells (celdas en las que el combustible se encuentra en el centro y esta rodeada por la vaina, refrigerante y el moderador).

3.1.2 PUMA 4

PUMA [5] es un código para realizar cálculos de tipo neutrónico de un reactor nuclear. Al sistema se le provee un conjunto de volúmenes en los que se suponen constantes ciertas propiedades, como las secciones eficaces. Este conjunto de volúmenes se llama *reticulado de representación*. Los volúmenes distribuidos en el plano horizontal se denominan *canales*, mientras que los volúmenes distribuidos en la dirección axial se llaman *trozos*. También se le provee un conjunto de puntos de discretización llamado *reticulado de cálculo* en geometría cartesiana, cilíndrica o triangular, que es utilizada por los módulos que resuelven la ecuación de difusión en diferencias finitas para hallar las distribuciones de flujo y potencia. Los reticulados de representación y de cálculo se vinculan entre si mediante coberturas volumétricas.

El sistema esta constituido por módulos que transfieren información entre si sólo a través de una base de datos en la que se encuentran guardados todos los datos que definen el reticulado de representación, el reticulado de cálculo, las distribuciones de flujo, potencias específicas y todos los parámetros calculados durante la simulación. Los módulos son activados mediante instrucciones ingresadas a través de un archivo de texto en forma de títulos, párrafos y frases. PUMA también acepta instrucciones escritas en lenguaje LOGO.

3.2 Modelos

3.2.1 Modelo para la celda de CNA 2

El núcleo de la CNA 2 es una red finita cuya *celda unidad* tiene geometría hexagonal, como se muestra en la Figura 3-1:

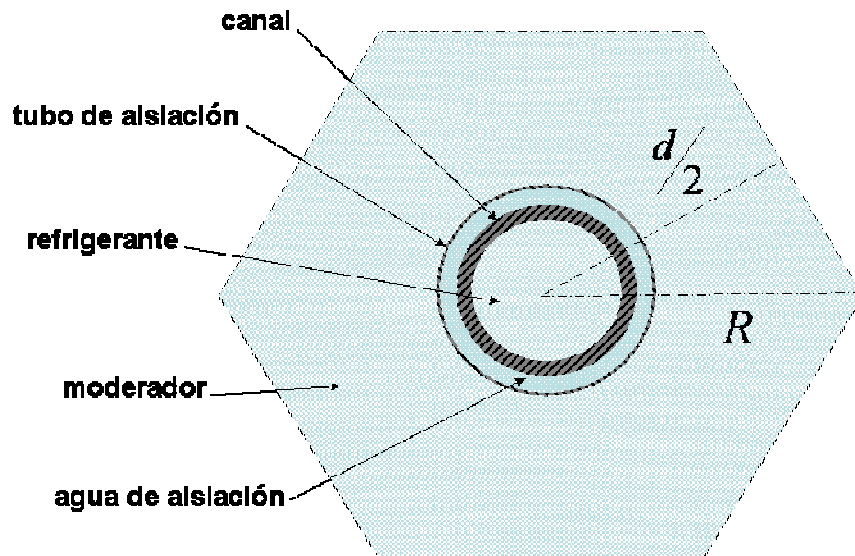


Figura 3-1: esquema de la celda unitaria de la CNA2. La figura no se encuentra a escala.

En el centro del hexágono se encuentra un canal de combustible, que contiene un elemento combustible (EC) y por el que circula el refrigerante (agua pesada). El canal de combustible se encuentra dentro del tubo de aislación, ambos separados por el agua de aislación que también es agua pesada. La función del agua de aislación es la de reducir la transferencia de calor por conducción desde el canal de combustible al moderador. Este último, que es agua pesada, llena todo el espacio entre los tubos de aislación del reactor.

Los canales de combustible del reactor están equiespaciados y la distancia entre el centro de un canal y el del más cercano se denomina *pitch*. La distancia nominal entre canales en la CNA2 es de 27,24 cm. El radio R del hexágono y el *pitch* d se relacionan de la siguiente forma:

$$R = \frac{d}{\sqrt{3}}$$

WIMS es un código desarrollado para celdas cuya geometría es del tipo placas consecutivas (slabs) o bien tipo anular (anillos concéntricos) y por lo tanto, es necesario representar la celda de la CNA 2 por una celda equivalente cuya geometría sea una de éstas. El modelo elegido para el presente trabajo consistió en reemplazar la celda hexagonal por una celda circular cuyo radio es tal que el área del círculo es igual al área del hexágono. De acuerdo con esto, la relación entre el *pitch* y el radio r de la celda circular equivalente es:

$$r = \frac{\sqrt[4]{3}}{\sqrt{2\pi}} d$$

En la Tabla 3-1 se muestran las dimensiones del canal, el tubo de aislación y el radio de la celda equivalente con la que se representa la celda hexagonal de la CNA2.

	Radio interno [cm]	Espesor [mm]	Material
Canal	5,41	1,7	Zircaloy
Agua de aislación	5,58	1,8	D ₂ O
Tubo de aislación	5,76	0,4	Zircaloy
Borde de celda (Circulo equivalente)	14,302	-----	-----

Tabla 3-1: dimensiones de los componentes y materiales de los elementos de la celda unidad de la CNA2.

El círculo equivalente que representa a la celda unidad se subdividió en 31 anillos concéntricos que se indicaron en el archivo de entrada de WIMS mediante el primer valor asignado a la palabra clave NREGION. Esta subdivisión define las regiones en las que WIMS resolvió la ecuación de transporte para el cálculo neutrónico. Los radios de los anillos se indicaron mediante las palabras clave ANNULUS. Los primeros 11 anillos describen el elemento combustible, el canal y el tubo de aislación, mientras que los restantes se encuentran en el moderador y son equiespaciados.

Para el cálculo principal de transporte se utilizó la opción PIJ (especificado por el valor 4 asignado a la palabra clave SEQUENCE) y una estructura de energía de 69 grupos (sin condensar a menos grupos), tomados de la biblioteca de datos nucleares IAEA-Lib [2]. Se usaron 100 puntos de malla y 69 grupos de energía sin condensación para los cálculos de la rutina principal de transporte mediante las palabras clave NMESH y NGROUP respectivamente.

Las secciones eficaces de la celda se calcularon con xenón ^{135}Xe y yodo ^{135}I en equilibrio. WIMS calcula las concentraciones de equilibrio de estos dos isótopos con 2 pasos de quemado indicados en la tarjeta POWER (en el primer paso calcula la concentración de equilibrio del yodo y en el segundo calcula la del xenón).

Dado que los cálculos de reactor se hicieron con el reactor crítico, los valores del buckling usados en los cálculos de las secciones eficaces fueron los del buckling crítico para cada valor del quemado. Estos se calcularon con WIMS mediante el keyword BUCKLING.

Las secciones eficaces macroscópicas del reflector axial se obtuvieron con el código auxiliar HOMCON v5.1, condensando las secciones eficaces del material de la región externa de la celda a 2 grupos de energía. Se supuso que el flujo en el reflector es similar al flujo en la última región definida en el moderador, limitada por los últimos dos de los 31 anillos en que se dividió la celda equivalente, cuando la composición isotópica del combustible corresponde a un quemado de 4000 MWd/tU. Este valor es muy cercano al valor promedio del quemado entre 0 y 7800 MWd/tU (quemado de extracción del núcleo en equilibrio).

3.2.2 Temperatura y densidad de los materiales de la celda

Para el cálculo de la temperatura del combustible, la vaina y el refrigerante a una potencia dada se usa la siguiente ecuación:

$$T = (T_{PP} - T_{ent.ref}) \frac{\%PP}{100} + T_{ent.ref}$$

donde T_{PP} es la temperatura del material correspondiente a plena potencia, $T_{ent.ref}$ es la temperatura de entrada del refrigerante y $\%PP$ es el porcentaje de plena potencia del reactor. La temperatura de entrada del refrigerante en la CNA 2 es de 277,7 °C.

La temperatura del moderador, el agua de aislación y el canal de combustible se calcularon con

$$T = \left(\frac{T_{PP} - T_{60\%PP}}{0,4} \right) \left(\frac{\%PP}{100} - 0,6 \right) + T_{60\%PP}$$

donde $T_{60\%PP}$ es la temperatura al 60% de plena potencia. Se eligió como referencia la temperatura al 60% de plena potencia porque se contaba con esos datos. Esta claro que el modelo de temperaturas es un modelo lineal.

Por último, se consideró que la temperatura del tubo de aislación es constante:

$$T_{tub.aisl} = 218 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En la Figura 3-2 se muestran las temperaturas del refrigerante, la vaina, el canal, el agua de aislación, el tubo de aislación y el moderador en función del porcentaje de plena potencia del reactor, calculadas usando el modelo lineal de temperaturas. La temperatura de la vaina, el refrigerante y el canal aumentan con el aumento de potencia, mientras que la temperatura del moderador disminuye.

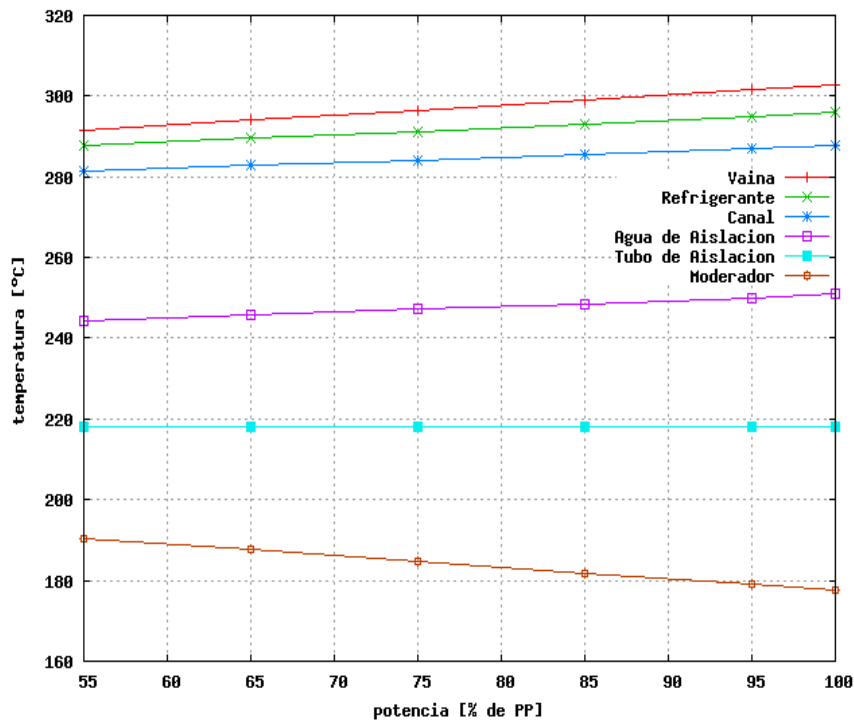


Figura 3-2: temperatura del refrigerante, la vaina, el canal, el agua de aislación, el tubo de aislación y el moderador en función de la potencia del reactor.

La disminución de la temperatura del moderador con el aumento de la potencia se debe a que el moderador de la CNA 2 se refrigera precalentando, en los intercambiadores de calor del moderador, el agua de alimentación a los generadores de vapor de la planta. Cuando aumenta la potencia del reactor también aumenta el caudal de agua que se inyecta a los generadores de vapor y por lo tanto aumenta el flujo en los intercambiadores de calor, disminuyendo la temperatura del moderador. Esta disminución de la temperatura del moderador cuando se aumenta la potencia mientras que la temperatura del canal aumenta nos conduce a considerar que la temperatura del tubo de aislación, que se encuentra entre ambos, se mantiene constante durante las variaciones de la potencia total.

La temperatura del combustible también aumenta con el aumento de la potencia del reactor, como se muestra en la Figura 3-3. Esto se debe a que el aumento de la potencia total implica un aumento de la tasa de fisiones en el material fisil y por lo tanto, un aumento en la tasa de generación de calor.

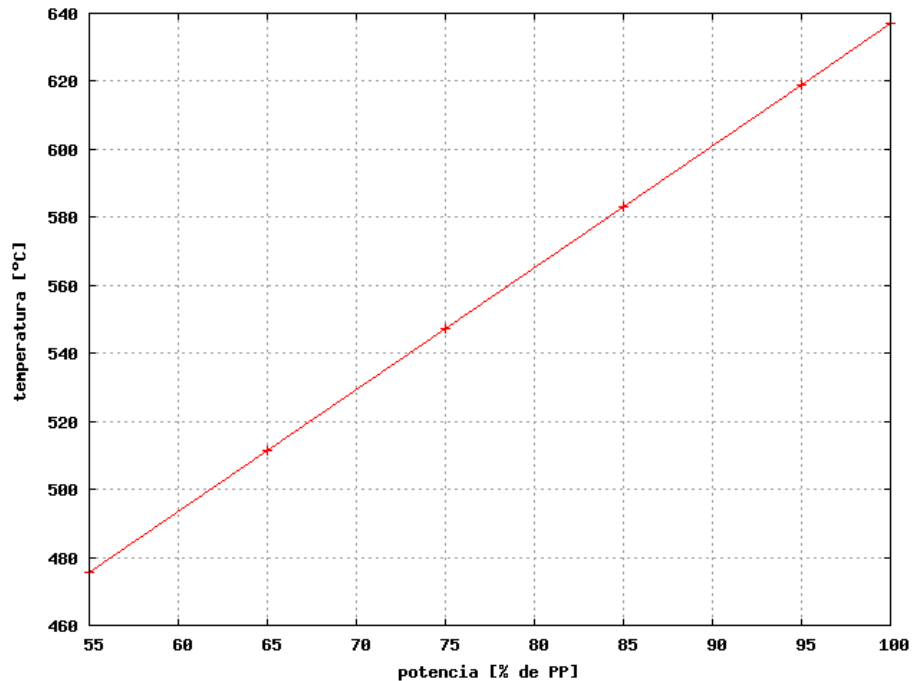


Figura 3-3: temperatura del combustible en función de la potencia del reactor.

En el presente trabajo se asumió que la densidad de masa de los componentes sólidos del reactor, como el combustible, el canal y la vaina no cambia en todo el rango de temperaturas simuladas, mientras que por el contrario, la densidad de masa del agua pesada del sistema refrigerante-moderador sí varía apreciablemente con la temperatura. La densidad de este material se calculó mediante el programa DENS2.EXE, usando una presión de 116,524 bar y una pureza isotópica de 99,85% en peso.

3.2.3 Modelo para el núcleo de la CNA 2

Se utilizó un modelo tridimensional del núcleo completo, que usa secciones eficaces de WIMS calculadas a 2 grupos de energía. El modelo usa una red detallada en X, Y y Z de 105, 121 y 31 planos respectivamente y una representación explícita del reflector radial, tubos guías y otros internos del reactor. El reticulado de representación consta de 933 canales y 24 trozos.

En la Figura 3-4 se muestra un corte del recipiente del reactor, donde se puede apreciar el interior con un solo canal de combustible, el central.

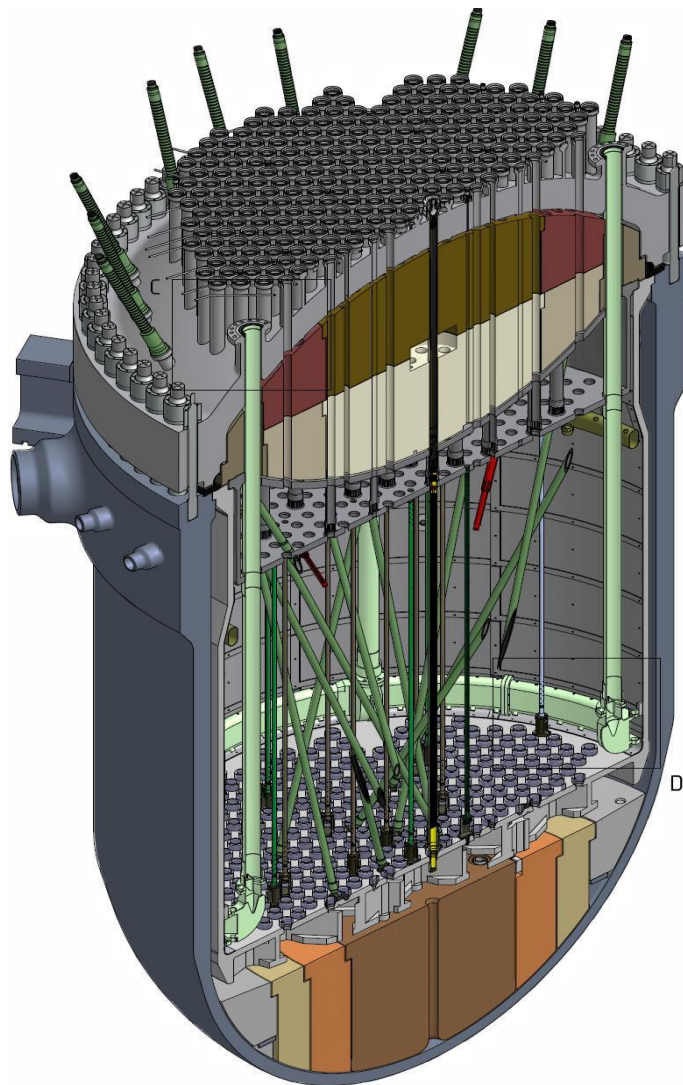


Figura 3-4: corte del recipiente del reactor de la CNA2.

3.3 Programas auxiliares

En esta sección se da una breve descripción de los programas auxiliares utilizados en el presente trabajo.

3.3.1 WimsABf.exe

Es un programa que extrae datos de las salidas de WIMS-D5b, tales como los bucklings críticos, los factores beta, las secciones eficaces, etc, para cada paso de quemado y los guarda en archivos diferentes que pueden ser utilizados por otros programas auxiliares.

3.3.2 WimsCoef31.exe

Es un programa que edita archivos de entrada de WIMS-D5b. El programa tiene 2 funciones: una es insertar en la entrada de un caso de WIMS los valores de buckling críticos para cada paso de quemado extraídos por WIMSABF de un caso de WIMS anterior, y otra es la de transformar una entrada de un caso de evolución (donde hay quemado del combustible) en una entrada sin evolución con una composición isotópica para cada paso de quemado obtenida de una corrida de evolución anterior.

3.3.3 PreHomCon51.exe

Prepara las entradas de WIMS-D5b cuyas salidas serán usadas para calcular las secciones eficaces de los reflectores con homcon51.exe. El programa edita la entrada de WIMS del caso deseado, imprimiendo en las tarjetas de materiales que describen el material fisil las densidades isotópicas correspondientes al quemado promedio del caso de WIMS.

3.3.4 Homcon51.exe

Homogeniza y condensa las secciones eficaces de la celda obtenidas de cálculos de WIMS correspondiente al quemado promedio.

3.3.5 Dens2.exe

Es un programa que calcula la densidad de masa del agua pesada para una dada presión, temperatura y pureza isotópica.

3.3.6 TablasWims.pl

Construye las tablas de secciones eficaces del caso de referencia y los casos perturbados en formato PUMA. Este programa, desarrollado por el autor para este trabajo, se escribió en lenguaje de programación PERL. El caso de referencia corresponde a un estado físico (caracterizado por un conjunto de valores de los parámetros físicos involucrados, como la temperatura, densidad y composición de los materiales, los bucklings axial y radial, etc) de la celda, mientras que el perturbado corresponde a una perturbación de una variable en el estado del caso de referencia, por ejemplo, una perturbación en la temperatura del combustible o en la densidad del refrigerante.

Los argumentos que se le ingresan al programa son la fracción de plena potencia del reactor, la concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador y el nombre de una entrada de WIMS que el programa irá editando en sucesivos pasos.

A partir del valor de la fracción de potencia ingresado, calcula las temperaturas de los materiales del reactor (usando las ecuaciones de la sección 3.2.1) y las densidades del refrigerante, agua de aislación y moderador (usando el programa Dens2.exe). El programa imprime estos datos en la entrada de WIMS y corre este último sobre ésta entrada editada. De la salida de WIMS obtenida, extrae las concentraciones isotópicas del carbono, oxígeno, hidrógeno y deuterio que luego imprime en la tarjeta DNB de la entrada. También edita los valores de la tarjeta POWER en la entrada, cambiando la densidad de potencia y el tiempo de irradiación. Corre WIMS-D5B sobre esta nueva entrada y extrae de la salida obtenida los bucklings cítricos correspondientes a cada quemado usando WIMSABF.EXE y los imprime en la entrada definitiva, usando WIMSCOEF31.EXE. Con esto queda armada la entrada de WIMS que describe la celda unidad de la CNA2 para el porcentaje de plena potencia dado. A continuación corre WIMS, PREHOMCON.EXE, HOMCON51.EXE y TABLASPUMA.EXE con los que arma las tablas de secciones eficaces en formato PUMA para la celda unidad y el reflector axial de la CNA 2. Para cada paso de quemado se utilizó la composición isotópica correspondiente del caso de referencia, sin hacer un nuevo cálculo de quemado.

Las tablas de secciones eficaces de los casos perturbados se construyeron análogamente, tomando ahora como entrada a editar la entrada de WIMS que representa la celda unidad de la CNA2 y perturbando los parámetros físicos como se indicó en la sección 2.

4. SIMULACIÓN DEL TRANSITORIO

4.1 Metodología e hipótesis utilizadas

La simulación del transitorio desde combustible fresco hasta el primer recambio de combustible se realizó con PUMA, respetando los límites para la potencia de canal por zona hidráulica y para la potencia lineal en todo el reactor, además de que se mantuvo el valor del factor de multiplicación efectivo dentro de una banda de 4 mk centrada en el valor crítico inicial.

La entrada de PUMA que se utilizó es un modelo detallado del reactor que tiene en cuenta los reflectores (axial, superior e inferior), los tubos guía, las lanzas de detectores y los separadores de INCONEL en el interior del reactor.

Se consideró una distribución de xenón uniforme y en equilibrio en todo el reactor, incluso en el arranque, cuando todo el combustible es fresco. También se supuso que la inyección y la extracción de boro es instantánea, y que la concentración de este veneno neutrónico en el agua pesada del sistema refrigerante-moderador también es uniforme. El sistema de purificación del agua pesada en la CNA2 puede quitar el boro disuelto hasta alcanzar una concentración residual de 0,05 ppm. En el presente trabajo, cuando se diga que se hizo un cálculo sin boro se debe entender que los cálculos se hicieron utilizando la concentración residual de boro.

La potencia del reactor al 100% de plena potencia es de 2160 MW y se asumió que las barras de control se encuentran en la posición nominal en toda la simulación del transitorio, es decir, el banco G10 al 94%, el G20 al 67%, el G30 al 24,5%, el S10 al 4,3% y los bancos S20 y S30 al 0%. A $t=0$ se asignó el valor 0 MWd/tonU al quemado a cada uno de los canales de combustible.

Para la simulación del transitorio, PUMA 4 usa las tablas de secciones eficaces calculadas con WIMS-D5b correspondientes a la potencia y la concentración de boro simuladas. Esto hace necesario calcular un conjunto muy grande de tablas de secciones eficaces puesto que en la simulación del transitorio se pasa por todas la potencias entre 55% y 100% de plena potencia, con un paso del 1% de plena potencia, y con las concentraciones de boro necesarias para satisfacer la restricción sobre el factor de multiplicación efectivo (ver sección 4.2).

En el presente trabajo, para reducir el número de tablas utilizadas, y por lo tanto el tiempo de cálculo, se dividió el espectro de potencia de la simulación en intervalos de 10% de plena potencia y en cada intervalo se utilizan las tablas de secciones eficaces como se muestra en la Tabla 4-1.

Para la simulación del transitorio en los días posteriores al día en que se alcanza el 100% de plena potencia se usan las tablas de secciones eficaces calculadas para plena potencia.

Intervalo de potencia del reactor	Tabla de XS usada
55 % a 60 % de PP	55 % de PP
61 % a 70 % de PP	65 % de PP
71 % a 80 % de PP	75 % de PP
81 % a 90 % de PP	85 % de PP
91 % a 100 % de PP	95 % de PP
100 % de PP	100 % de PP

Tabla 4-1: en la primera columna se muestran los intervalos de potencia en los que se dividió el espectro de potencia de la simulación y en la segunda columna se muestra la potencia con que se calcularon las tablas de secciones eficaces usadas en el respectivo intervalo.

Las tablas de secciones eficaces de los reflectores superior e inferior del núcleo de la CNA 2 fueron calculadas por única vez con el código DRAGON para el caso de referencia; éstas se usaron en todos los cálculos de PUMA ya que las variaciones de la concentración de boro en los reflectores superior e inferior no tienen una influencia importante sobre los cálculos del factor de multiplicación efectivo o la distribución de potencia del núcleo.

4.2 Limitaciones de potencia y reactividad

La potencia lineal media \overline{PLM} del reactor, expresada en W/cm, se calcula con la siguiente ecuación

$$\overline{PLM} = 1000000 \frac{P}{\#canales \text{ long.act.} \#barras}$$

donde P es la potencia total del reactor (en MW), $\#canales$ es el número de canales del núcleo, long.act. es la longitud activa (en cm) y $\#barras$ es el número de barras por elemento combustible. En el caso de la CNA 2 se tienen los siguientes valores:

#canales	451
long.act.	530 cm
#barras	37

La potencia lineal del reactor se calcula mediante 3 factores de corrección de la \overline{PLM} . En primer lugar, una pequeña fracción (4,7%) de la potencia generada en el elemento combustible es transferida al moderador y por esto la potencia lineal es menor que la potencia lineal media. El factor de corrección por transferencia de potencia moderador es 0,953. Otro factor resulta de los cálculos de WIMS y está relacionado con las potencias relativas de cada órbita del elemento combustible. El máximo de estas potencias relativas es de 1,11. El último de los factores de corrección esta dado por las tolerancias en la fabricación de la pastilla del elemento combustible y tiene el valor de 1,02. Con estos factores, la máxima potencia lineal de la simulación se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{PL}_{\max} = 1,11 * 1,02 * 0,953 * \overline{PLM} \text{ fact form}$$

donde *fact form* es el factor de forma calculado por PUMA.

El núcleo de la CNA2 se divide en 5 zonas hidráulicas, como se muestra en la Figura 4-1. Las zonas hidráulicas 1 a 4 tienen restrictores de caudal para que la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de los canales de estas zonas sea la misma que la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de los canales de la zona 5. Los restrictores se usan porque la potencia en los canales de la zona 5, que no tiene restrictores de caudal, es mucho mayor que las otras zonas.

Los elementos materiales que componen un reactor le imponen limitaciones en la operación a potencia. En el caso de la CNA2 se deben respetar los siguientes límites:

- a) Máxima potencia lineal (MPL) < 525 W/cm
- b) Máxima potencia de canal por Zona Hidráulica (MPZH)
 1. en la ZH 1 < 2524 kW
 2. en la ZH 2 < 3158 kW
 3. en la ZH 3 < 4036 kW
 4. en la ZH 4 < 5565 kW
 5. en la ZH 5 < 7062 kW

Los límites de potencia surgen de cálculos termohidráulicos. El límite para la MPZH se estableció para evitar el apartamiento de la ebullición nucleada (DNB) o una fracción de vacío en el refrigerante mayor al 25%, mientras que los límites para la MPL surgen para evitar tanto el DNB como la interacción pastilla-vaina (PCI).

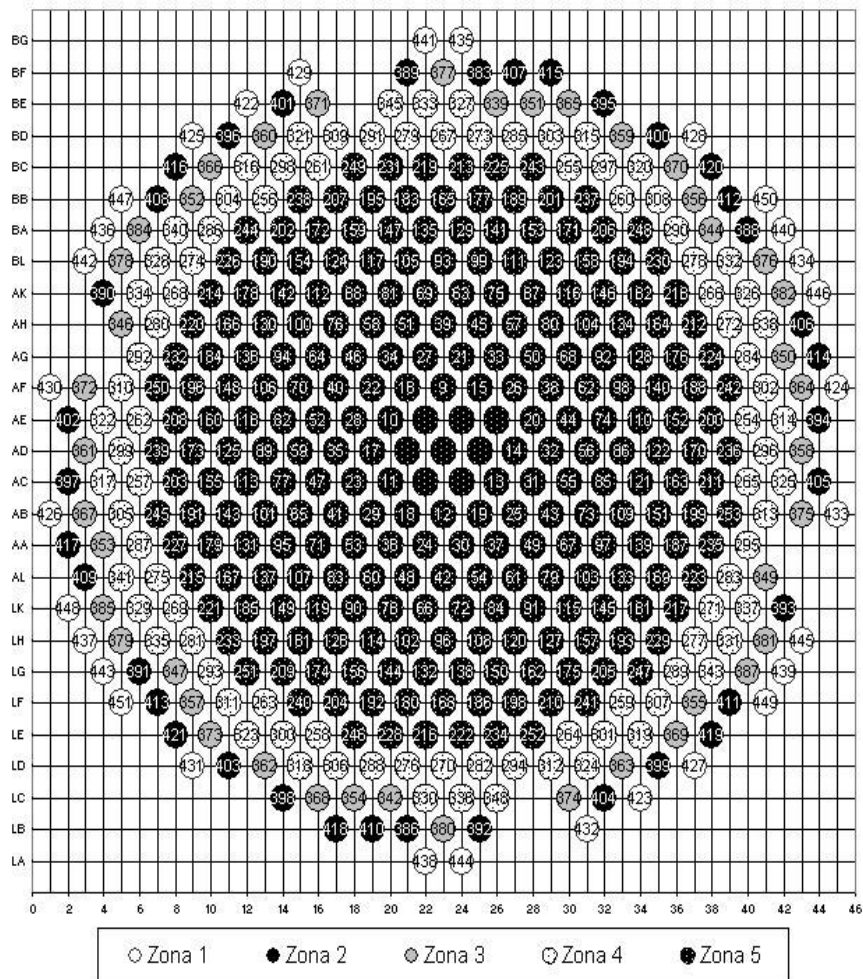


Figura 4-1: Zonas hidráulicas del núcleo de la CNA 2

En este trabajo, se tomaron como límite para las máximas potencias de canal por zona hidráulica valores 3% más bajos que los dados en el ítem b). Estos valores más conservativos se toman debido a que existen incertezas en los cálculos de las potencias que hace PUMA. Por otro lado, como el límite para la potencia lineal decrece linealmente con el quemado, se utilizó conservativamente el valor límite que corresponde a un quemado de 7800 MWd/tU (que es el quemado de extracción). En la Tabla 4-2 se resumen los límites para las máximas potencias de canal por zona hidráulica y para la máxima potencia lineal del reactor que se utilizaron en las simulaciones del presente trabajo.

	LIMITE DE POTENCIA
MPZH 1	2,448 MW
MPZH 2	3,063 MW
MPZH 3	3,915 MW
MPZH 4	5,398 MW
MPZH 5	6,850 MW
MPL	475 MW/cm

Tabla 4-2: límites para las potencias por zona hidráulica.

Otra limitación, relacionada con el peso de las barras de control del núcleo, se da sobre el factor de multiplicación efectivo. Durante operación normal, los bancos de barras de control de la CNA 2 pueden controlar, dentro del margen de operación, variaciones de reactividad de aproximadamente 2 mk. Es por esto que en la simulación del transitorio, el valor del factor de multiplicación efectivo del reactor se mantuvo dentro de una banda de ± 2 mk alrededor del valor crítico inicial.

4.3 Simulación de la evolución del reactor al 55% de plena potencia

Resulta interesante conocer la dependencia con el tiempo (y por lo tanto, con el quemado) y con la concentración de boro en el agua pesada del factor de multiplicación efectivo, la máxima potencia lineal y la máxima potencia por zona hidráulica. Para esto se realizaron dos simulaciones de la evolución del reactor de la CNA2. La primera se calculó con combustible fresco a $t=0$, con el reactor al 55% de plena potencia, sin boro en el sistema refrigerante-moderador y xenón en equilibrio durante toda la simulación. La segunda simulación se realizó con las mismas condiciones que la primera, excepto que se simuló una concentración de boro en el agua pesada de 7 ppm.

En la Figura 4-2 se muestra el factor de multiplicación efectivo obtenido en ambas simulaciones. Durante los primeros días de plena potencia, el factor de multiplicación disminuye debido al envenenamiento con algunos de los productos de fisión, especialmente el xenón 135, hasta alcanzar el mínimo a los 3 dpp en la simulación sin boro y a los 2,8 dpp en la simulación con 7 ppm de boro. En estos puntos, el factor de multiplicación comienza a aumentar su valor debido al crecimiento de la cantidad de plutonio hasta alcanzar un valor máximo (pico de plutonio) a los 25,3 dpp en la simulación sin boro y a los 27 dpp en la simulación con 7 ppm de boro. Finalmente, a partir del pico de plutonio, el factor de multiplicación comienza a disminuir debido a que la producción de plutonio no alcanza para compensar la desaparición de uranio 235.

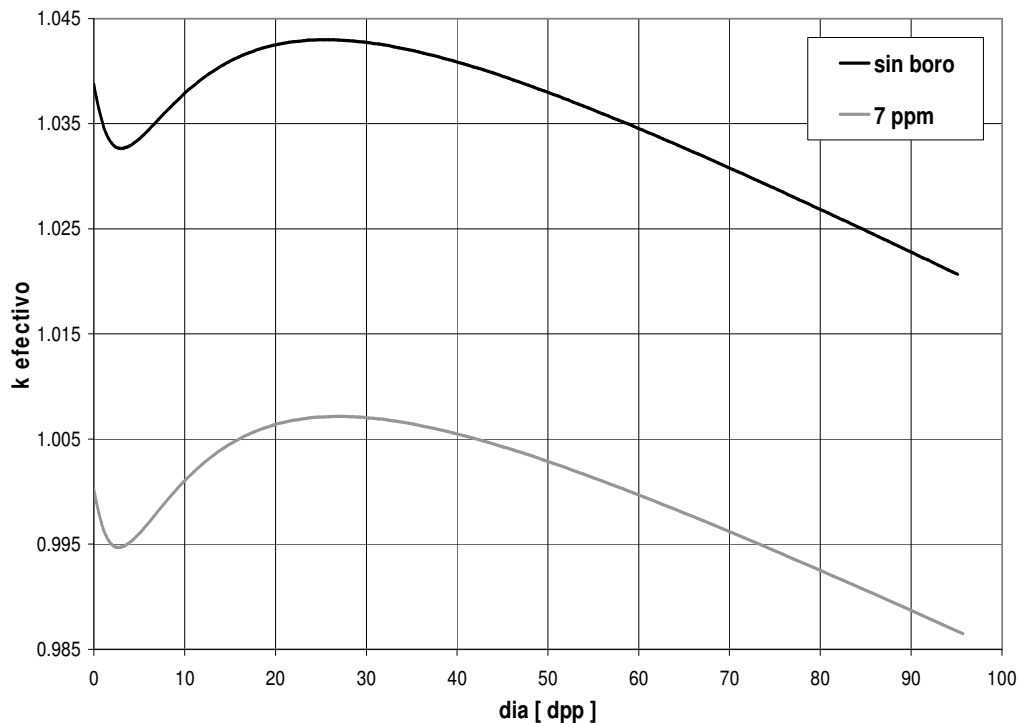


Figura 4-2: factor de multiplicación efectivo en función de los días de plena potencia.

En la Figura 4-3 se muestran las máximas potencias de canal por zona hidráulica en función de los días de plena potencia para la simulación sin boro. Se observa que durante el primer dpp de evolución, la máxima potencia alcanzada en la zona hidráulica 5 disminuye con el tiempo, mientras que las potencias máximas de las zonas hidráulicas 1, 2, 3 y 4 aumentan. Esto se debe a que en el arranque del reactor, el flujo neutrónico en los canales centrales, que se encuentran en la ZH5, es mucho mayor que en los canales del resto de las zonas hidráulicas. Esto produce un aumento muy grande de venenos neutrónicos en los canales centrales y por lo tanto una disminución de la potencia. Este efecto, junto a que la potencia total del reactor es constante (esto es, en términos de la simulación, la potencia total está normalizada) produce un aumento de la potencia en los canales periféricos.

Pasado un día de simulación a plena potencia, la potencia máxima de la ZH5 comienza a aumentar debido al aumento de la concentración de plutonio en los canales centrales, mientras que las potencias máximas de las zonas periféricas disminuyen, también porque la potencia del reactor esta normalizada.

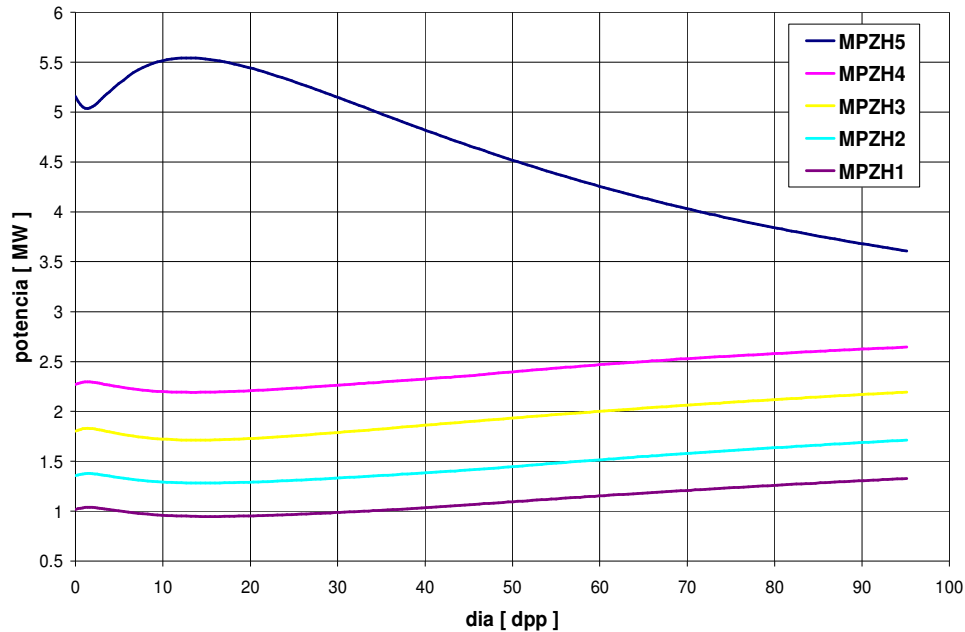


Figura 4-3: máximas potencias de canal por zona hidráulica en función de los días de plena potencia, para el núcleo de la CNA 2 sin boro en el sistema refrigerante-moderador y potencia total de 55% de plena potencia.

En la Figura 4-4 se muestran las máximas potencias por zona hidráulica obtenidas en la simulación con 7 ppm de boro. El comportamiento es similar a la simulación sin boro. A partir de los 12,7 dpp en la simulación sin boro y los 13,2 dpp en la simulación con 7 ppm de boro, la máxima potencia de la zona hidráulica 5 comienza a disminuir debido a que el plutonio producido no alcanza para compensar la pérdida de uranio 235 mientras que las potencias máximas de las restantes zonas hidráulicas aumentan. Los picos de las máximas potencias en la zona hidráulica 5, que ocurren en el canal AC22, se alcanzan antes que el pico de plutonio debido a que este último se produce por la reactividad positiva que introduce el inventario de plutonio en todo el reactor y el máximo de la MPZH5 se produce debido a la contribución del plutonio en el canal AC22, que es uno de los canales centrales. Como el flujo neutrónico es mucho mayor en los canales cercanos al centro del reactor, la producción de plutonio en estos canales es mucho mas rápida que en el resto del núcleo y por lo tanto, el máximo de la MPZH5 se alcanza antes que el pico de plutonio.

En las Figuras 4-5 a 4-9 se muestran los coeficientes de reactividad de vacío de refrigerante (CRVR), de concentración de boro (CRCB) en el sistema refrigerante-moderador, de temperatura del moderador (CRTM), de temperatura del refrigerante (CRTR) y de temperatura del combustible (CRTC) obtenidos en la

evolución al 55% de plena potencia con 0,05 y 7 ppm de boro en el sistema refrigerante-moderador.

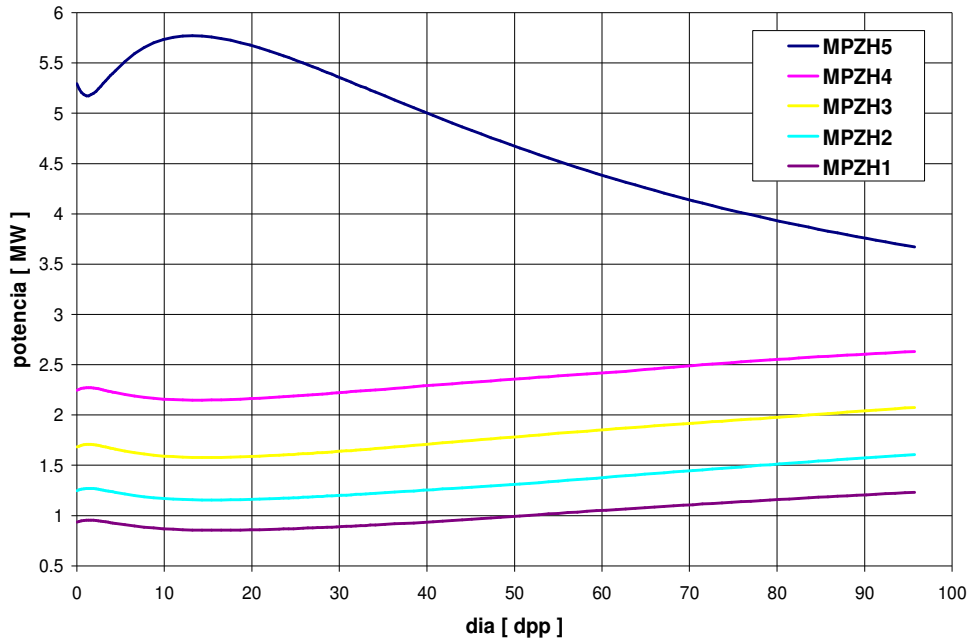


Figura 4-4: máximas potencias de canal por zona hidráulica en función de los días de plena potencia obtenidas en la simulación con 7 ppm de boro en el agua pesada del reactor.

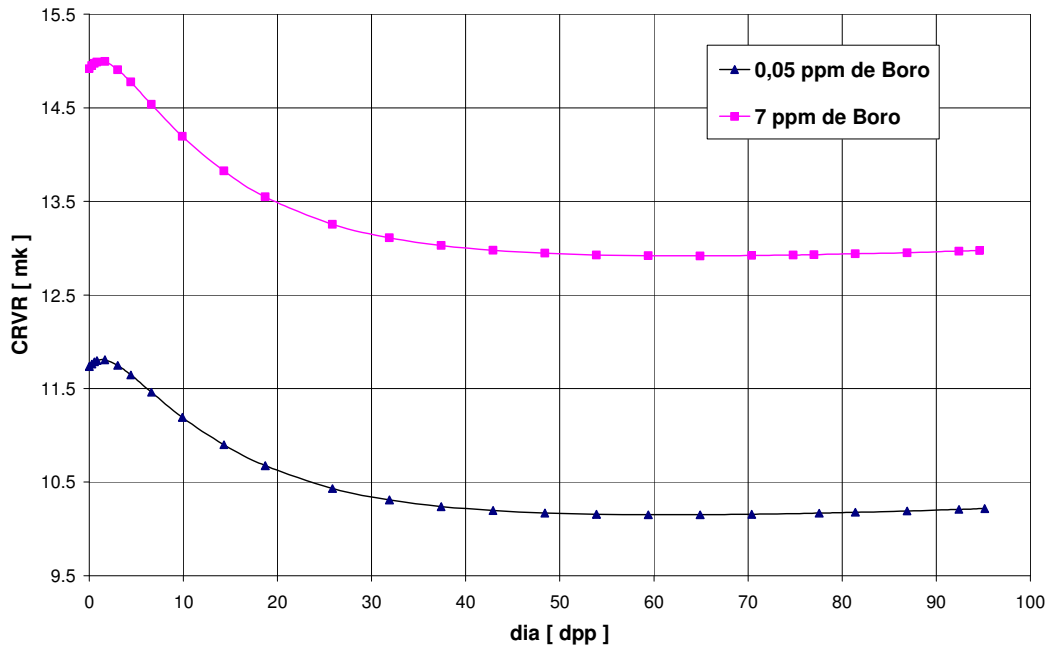


Figura 4-5: evolución del coeficiente de reactividad de vacío de refrigerante, con el núcleo al 55% de plena potencia.

En estas figuras se puede observar que entre los 20 y los 40 dpp se produce un cambio en la pendiente de las gráficas de los coeficientes, llegando los coeficientes de vacío de refrigerante y de concentración de boro prácticamente a estabilizarse. En los restantes coeficientes, disminuye apreciablemente su pendiente. Este comportamiento se debe principalmente a dos efectos superpuestos y que se afectan mutuamente: el crecimiento del plutonio y los cambios en la tasa de crecimiento de algunos productos de fisión con secciones eficaces de absorción de neutrones altas. Con el quemado no sólo aumenta la cantidad de plutonio, que tiene absorciones a energías diferentes a las de uranio, sino que también disminuye el número de fisiones provenientes del U235 y aumenta el número de fisiones provenientes del Pu239. Este crecimiento del número de fisiones del plutonio cambia la proporción de los productos de fisión generados, pues los rendimientos de fisión del uranio y del plutonio son diferentes. Además, nucleídos con secciones eficaces de absorción altas y con vida media del orden de días, como el Ru103, comienzan a tener fracciones de decaimiento importantes, que disminuyen su tasa de crecimiento. Un análisis más detallado implica un estudio que va más allá de los alcances de esta tesis.

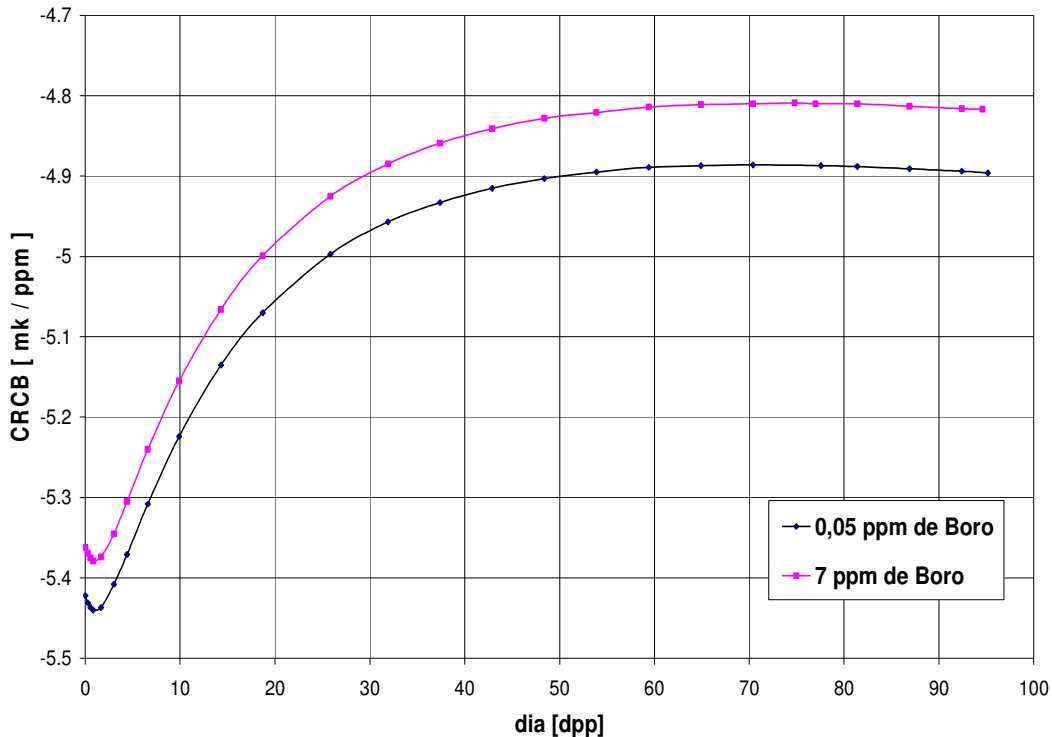


Figura 4-6: evolución del coeficiente de reactividad de concentración de boro, con el reactor al 55% de plena potencia.

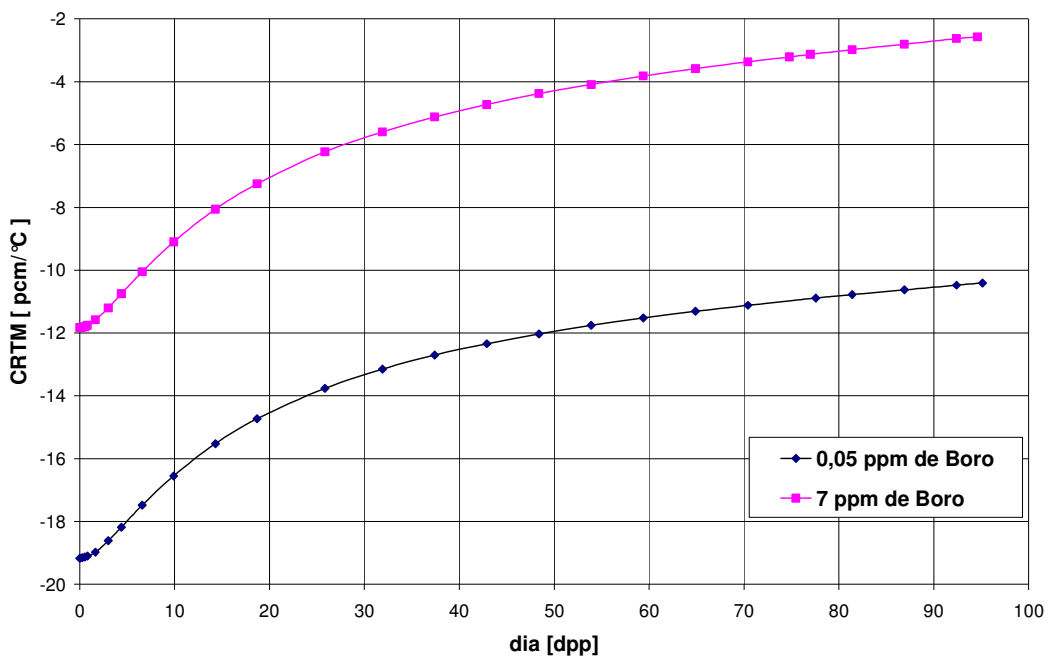


Figura 4-7: evolución del coeficiente de reactividad de temperatura de moderador, con el reactor al 55% de plena potencia.

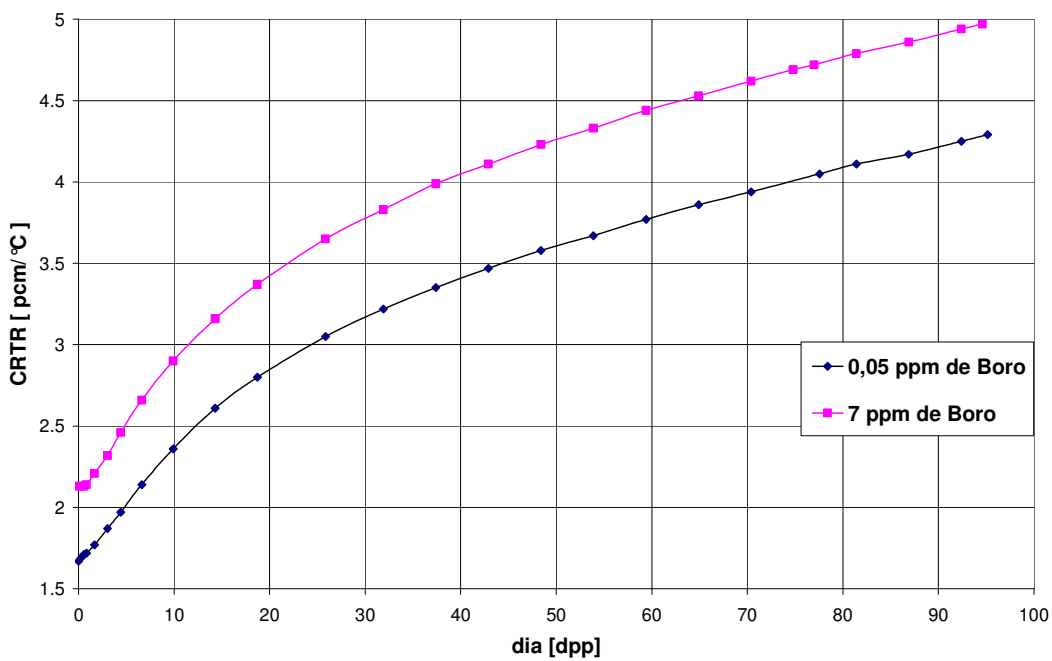


Figura 4-8: evolución del coeficiente de reactividad de temperatura del refrigerante, con el reactor al 55% de plena potencia.

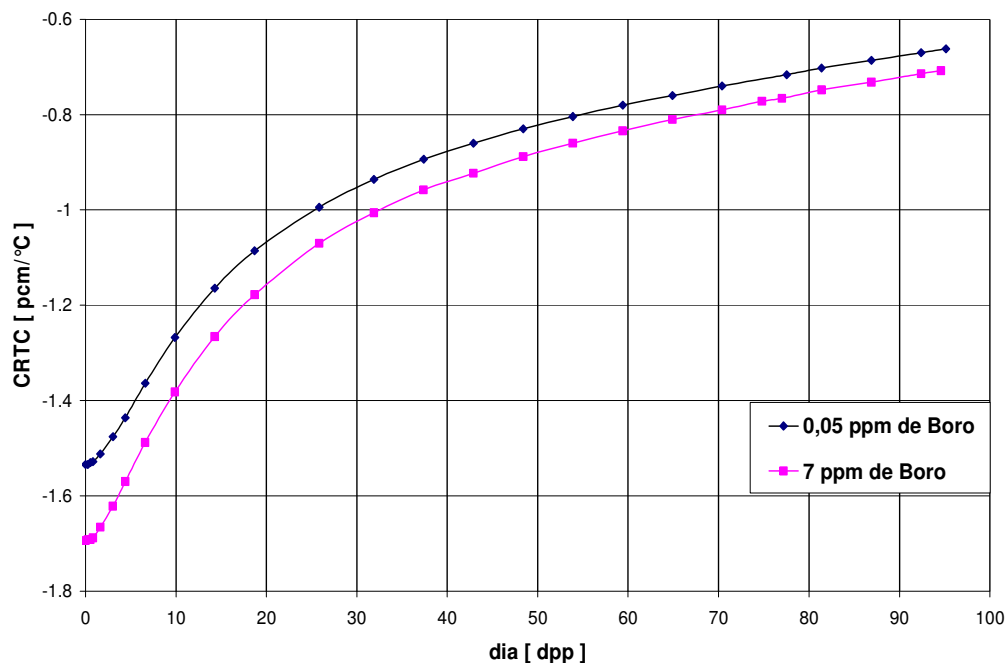


Figura 4-9: evolución del coeficiente de reactividad de temperatura del combustible, con el reactor al 55 % de plena potencia.

Se observa que para $t=0$, cuando el combustible es fresco, los coeficientes de reactividad para el caso con 7 ppm de boro difieren en menos de 2% con los obtenidos en cálculos previos [9]. A medida que aumenta el quemado los valores de los coeficientes para el caso sin boro se acercan a los obtenidos para el caso de quemado en equilibrio [9]. Los coeficientes de reactividad por vacío de refrigerante y por concentración de boro se estabilizaron en valores cercanos a los del caso de equilibrio. El resto de los coeficientes, que al final de la simulación siguen variando, tienden a acercarse a los valores de equilibrio. Se debe tener en cuenta que estos coeficientes están calculados al 55% de plena potencia, mientras que los casos calculados en [9] para combustible fresco están calculados al 60% y los del caso de quemado en equilibrio al 100%.

4.4 Simulación de la transición hasta el primer recambio de combustible.

4.4.1 Concentración crítica de boro para núcleo fresco

Para calcular la concentración crítica de boro para el instante inicial se calcularon las tablas de secciones eficaces con distintas concentraciones de boro (1 ppm, 2 ppm, 4 ppm, 6 ppm, 7 ppm y 8 ppm) en forma análoga a los cálculos del transitorio sin boro en el sistema refrigerante-moderador.

En la Figura 4-10 se muestra el factor de multiplicación efectivo en función de la concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador del núcleo. El

conjunto de puntos es aproximadamente lineal. Para determinar la concentración crítica de Boro, se interpolaron los datos con la recta

$$k = -0,005552(x - 1) + 1,03334$$

donde la ordenada k representa el factor de multiplicación efectivo del núcleo y la abscisa x representa la concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador. Igualando la ordenada a 1 y despejando la abscisa resulta que la concentración crítica de boro es $x = 7,005$. Para este trabajo se tuvo en cuenta que la precisión con que se puede medir la concentración de boro en el agua pesada de la CNA 2 es de 0,2 ppm y por lo tanto se tomó como concentración crítica $[B_{crit}]$ para combustible fresco el valor:

$$[B_{crit}] = 7 \text{ ppm}$$

Para este valor de la concentración de boro, el valor del factor de multiplicación efectivo es de 1,000244.

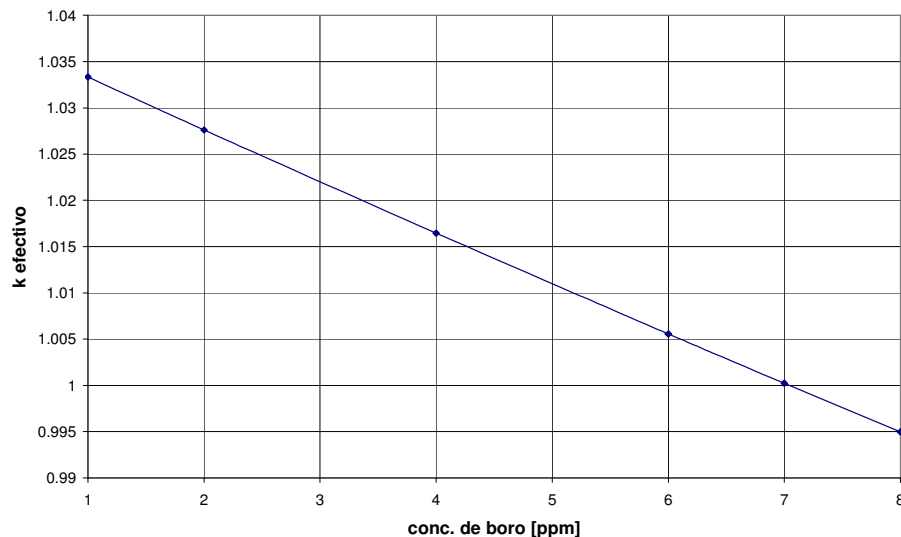


Figura 4-10: factor de multiplicación efectivo en función de la concentración de boro en el agua pesada.

4.4.2 Cálculos de reactor

La simulación del transitorio del núcleo de la CNA2 se inició con combustible fresco, núcleo crítico (con 7 ppm de boro) y con una potencia total del 55% de plena potencia. En la Tabla 4-3 se muestra una descripción de la simulación del transitorio. En la primera y segunda columna se muestran los períodos temporales (en días de plena potencia y días calendario respectivamente) en los que se usaron las tablas de secciones eficaces (XS) obtenidas en los cálculos de celda con WIMS para la potencia y concentración de boro mostradas en la tercera y cuarta columna. En la quinta columna se muestra la potencia total simulada en los cálculos de reactor realizados con PUMA.

días [dpp]	días [calendario]	CELDA		REACTOR
		potencia [%PP]	conc. de boro [ppm]	potencia [%PP]
0 a 0,3	0 a 0,5	55	7	55
0,3 a 1,1	0,5 a 2	55	6,5	55
1,1 a 5,5	2 a 10	55	6	55
5,5 a 8,3	10 a 15	55	6,5	55
8,3 a 11	15 a 20	55	7	55
11 a 14,9	20 a 27	55	7,5	55
14,9 a 16	27 a 29	55	8	55
16 a 19,3	29 a 35	55	8	56
19,3 a 21,6	35 a 39	55	8	57
21,6 a 22,8	39 a 41	55	8	58
22,8 a 23,9	41 a 43	55	8,5	58
23,9 a 25,7	43 a 46	55	8,5	59
25,7 a 28,1	46 a 50	55	8,5	60
28,1 a 29,3	50 a 52	65	8	61
29,3 a 31,2	52 a 55	65	8	62
31,2 a 32,4	55 a 57	65	8	63
32,4 a 33,7	57 a 59	65	8	64
33,7 a 35	59 a 61	65	8	65
35 a 36,3	61 a 63	65	8	66
36,3 a 37,7	63 a 65	65	8	67
37,7 a 39	65 a 67	65	8	68
39 a 40,4	67 a 69	65	8	69
40,4 a 41,8	69 a 71	65	8	70
41,8 a 43,2	71 a 73	75	7,5	71
43,2 a 44,7	73 a 75	75	7,5	72
44,7 a 45,4	75 a 76	75	7	73
45,4 a 46,9	76 a 78	75	7	74
46,9 a 48	78 a 79,5	75	7	75
48 a 49,1	79,5 a 81	75	7	76
49,1 a 50,3	81 a 82,5	75	7	77
50,3 a 51,5	82,5 a 84	75	7	78
51,5 a 52,6	84 a 85,5	75	7	79
52,6 a 54,2	85,5 a 87,5	75	7	80
54,2 a 55,5	87,5 a 89	85	6,5	81
55,5 a 56,7	89 a 90,5	85	6,5	82
56,7 a 57,5	90,5 a 91,5	85	6	83
57,5 a 58,8	91,5 a 93	85	6	84
58,8 a 60,1	93 a 94,5	85	6	85
60,1 a 62,2	94,5 a 97	85	6	86
62,2 a 64,4	97 a 99,5	85	6	87
64,4 a 66,1	99,5 a 101,5	85	5,5	88
66,1 a 67,5	101,5 a 103	85	5,5	89
67,5 a 69,3	103 a 105	85	5,5	90
69,3 a 70,6	105 a 106,5	95	5	91
70,6 a 72,5	106,5 a 108,5	95	5	92
72,5 a 74,8	108,5 a 111	95	5	93
74,8 a 76,2	111 a 112,5	95	4,5	94
76,2 a 78,6	112,5 a 115	95	4,5	95
78,6 a 80,5	115 a 117	95	4,5	96
80,5 a 82,4	117 a 119	95	4,5	97
82,4 a 83,9	119 a 120,5	95	4	98
83,9 a 85,9	120,5 a 122,5	95	4	99
85,9 a 87,4	122,5 a 124	95	4	100
87,4 a 93,4	124 a 130	100	3,5	100
93,4 a 95,4	130 a 132	100	3	100

Tabla 4-3: descripción de la simulación del transitorio.

En la Figura 4-11 se muestra el factor de multiplicación efectivo en función de los días de plena potencia. Este se mantuvo dentro de una banda de 4 mk de amplitud centrada en el valor crítico inicial de 1,000244, obtenido con núcleo fresco, xenón en equilibrio y con 7 ppm de boro en el agua pesada. Las discontinuidades de salto se deben a que se cambió, en 0,5 ppm, la concentración de boro en el agua pesada del reactor. Para estas variaciones, la amplitud de los saltos es del orden de 2,5 mk, por lo que el valor del factor de multiplicación efectivo se encuentra siempre dentro de la banda de 4 mk centrada en el valor crítico inicial.

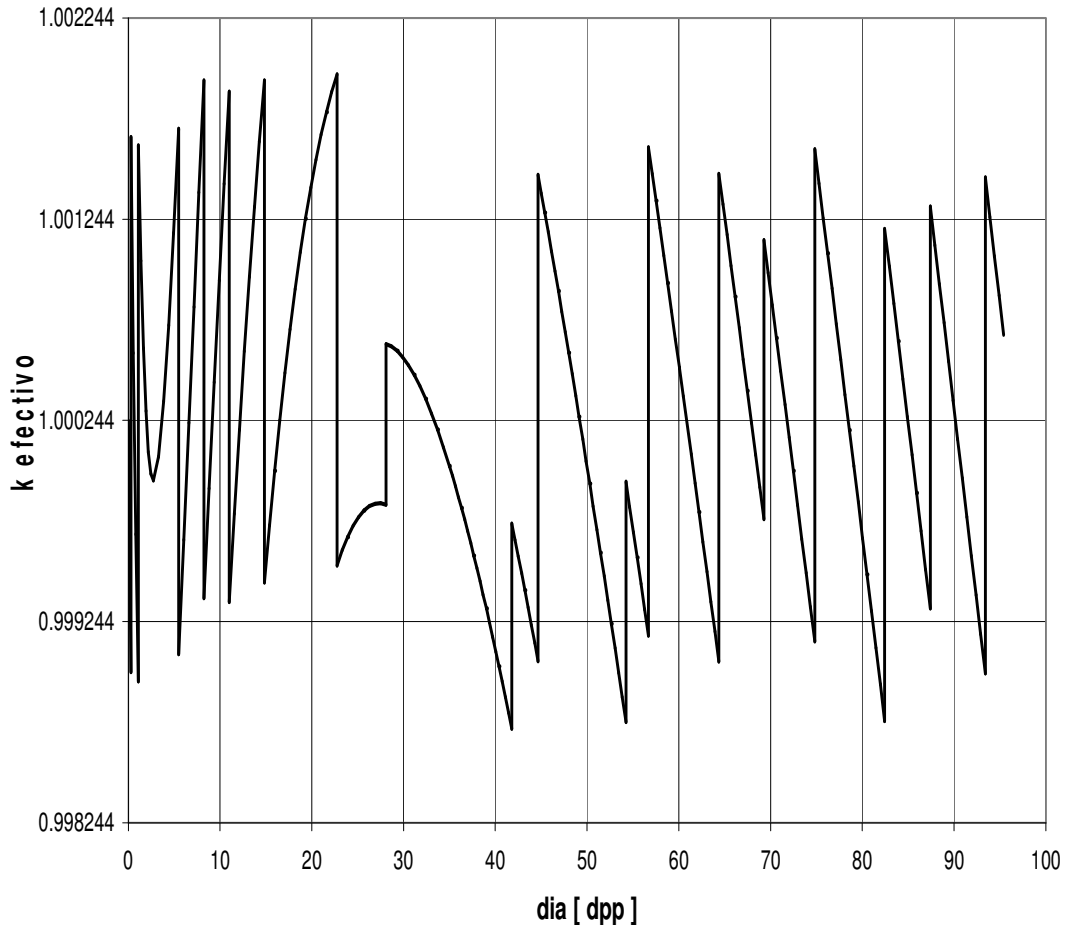


Figura 4-11: factor de multiplicación efectivo en función de los días de plena potencia.

En la Figura 4-12 se muestran la concentración de boro, la potencia utilizada en los cálculos de secciones eficaces con WIMS y la potencia utilizada en la simulación del transitorio con PUMA para cada día de plena potencia. La máxima concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador, que fue de 8,5 ppm, se alcanzó a los 22,8 dpp. La máxima concentración de boro se utilizó entre los

días 22,8 y 28,1 de plena potencia, lo que indica que el pico de plutonio se encuentra entre estos días.

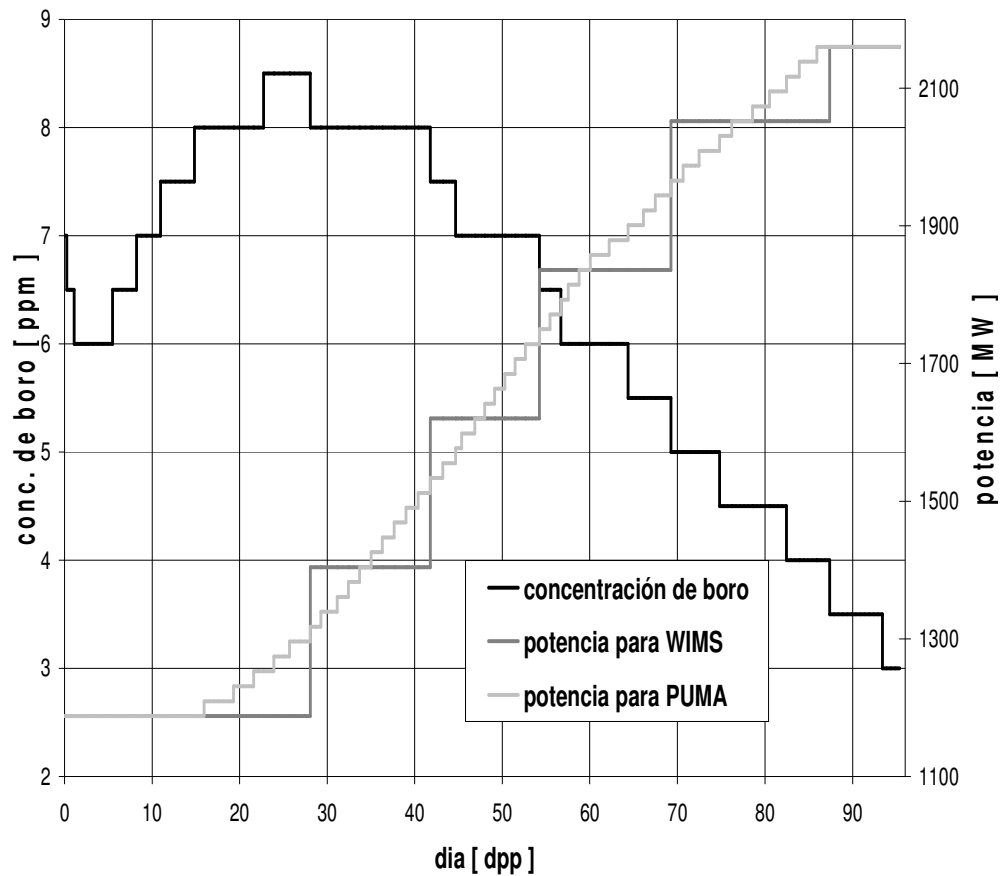


Figura 4-12: concentración de boro, potencia utilizada en los cálculos de secciones eficaces con WIMS y potencia utilizada en los cálculos de reactor con PUMA en función de los días de plena potencia.

En la Figura 4-13 se muestra la potencia sobre los canales AD (ver Figura 4-1). Como puede verse, el perfil de potencia del día calendario 132 (95,4 dpp) se encuentra aplanado en el centro, mientras que en los días calendario 0 (0 dpp) y 23 (12,7 dpp) el perfil es del tipo cosenoidal. Para comparar los perfiles del día 132 (obtenido con el reactor al 100% de plena potencia) y los de los días 0 y 23 (obtenidos con el reactor al 55% de plena potencia) se normalizaron estos últimos, multiplicando cada valor de potencia del perfil por el factor 1/0,55.

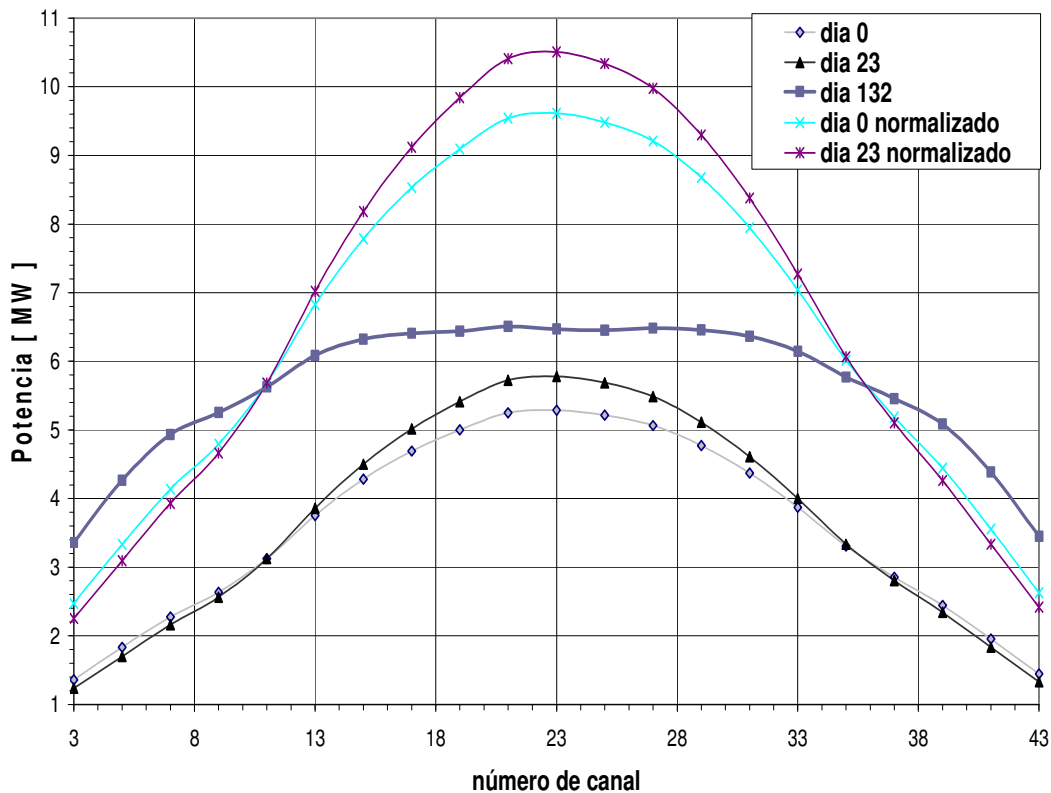


Figura 4-13: Perfil de potencia sobre el conjunto de canales AD.

En la **Figura 4-14** se muestra la máxima potencia lineal del reactor en función de los días de plena potencia. Las discontinuidades de salto más pequeñas se deben a variaciones de la concentración de boro en el agua pesada del sistema refrigerante-moderador, mientras que las discontinuidades de salto más grandes se deben a aumentos de potencia del 1%PP. Durante toda la simulación, este parámetro se mantuvo por debajo del límite de 475 W/cm. Los aumentos del 1%PP en la potencia del reactor producen aumentos de la MPL de 8,5 MW/cm aproximadamente para quemados hasta 1200 MWd/tU y del orden de 5 MW/cm para quemados medios entre 1800 MWd/tU y 2500 MWd/tU, mientras que las variaciones de 0,5 ppm en el sistema refrigerante-moderador dan aumentos de la MPL de aproximadamente 1 MW/cm.

En la Figura 4-15 se muestra la máxima potencia de canal en cada una de las 5 zonas hidráulicas del núcleo en función de los días de plena potencia. En la simulación del transitorio se buscó no superar los límites de potencia lineal y potencia de canal por zona hidráulica dados en la sección 4.2.

Cabe mencionar que durante los primeros 62,2 dpp de operación la potencia del reactor estuvo limitada por la MPL y a partir de ese día por la MPZH.

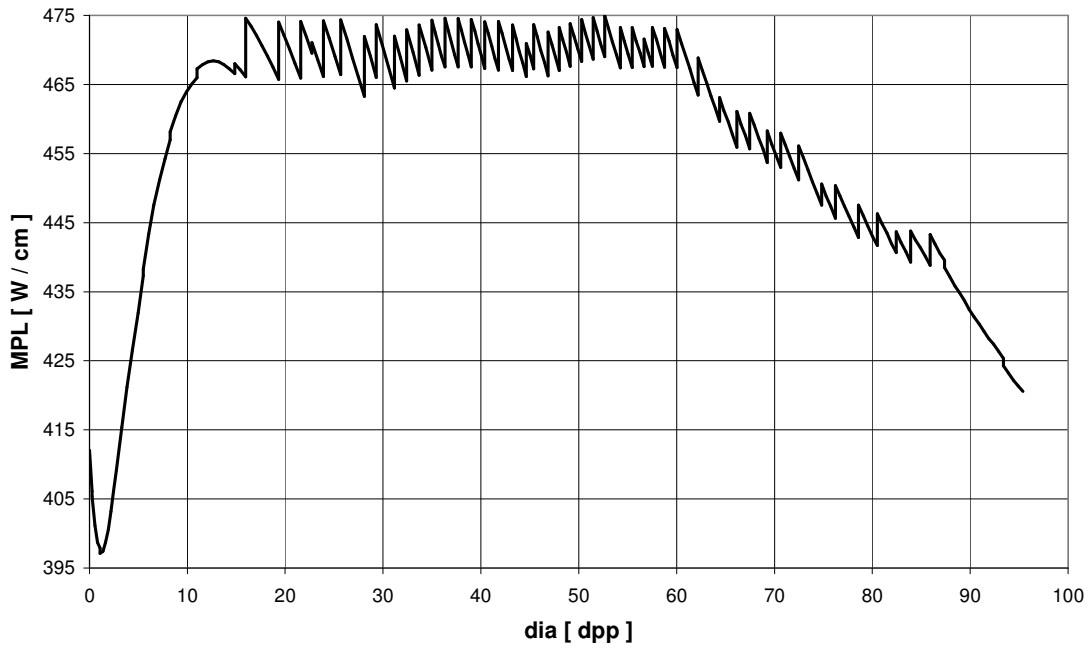


Figura 4-14: máxima potencia lineal en el núcleo de la CNA 2 en función de los días de plena potencia.

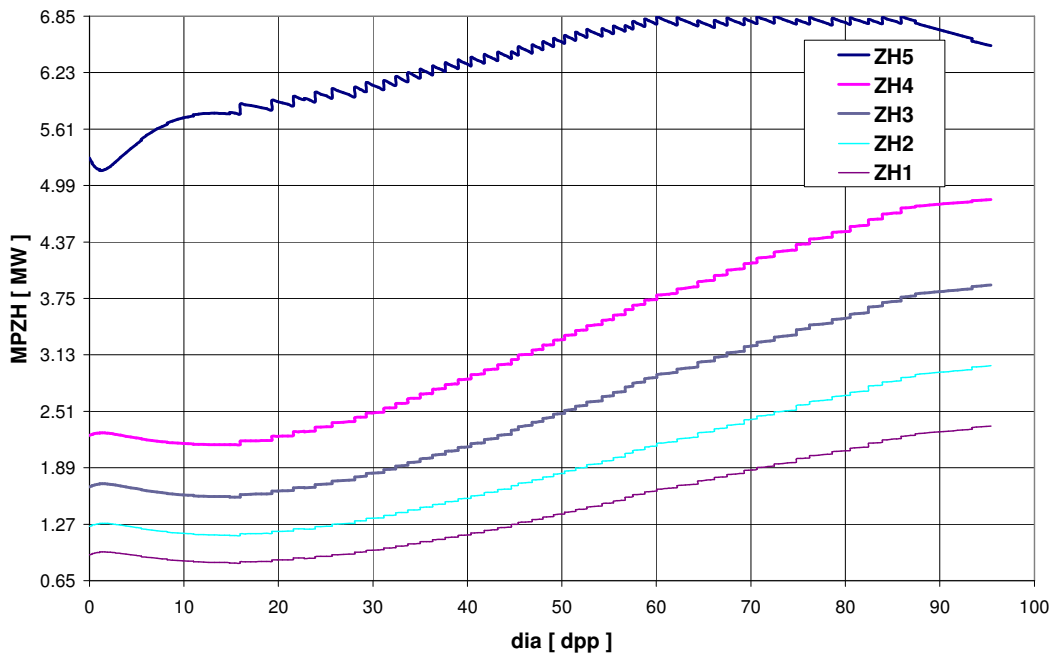


Figura 4-15: máxima potencia por zona hidráulica en función de los días de plena potencia.

5. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE REACTIVIDAD

Se calcularon los coeficientes de reactividad de temperatura del combustible, de temperatura del refrigerante, de temperatura del moderador, de concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador y de vacío de refrigerante mediante las fórmulas y perturbaciones dadas en la sección 2.

5.1 Coeficiente de reactividad de temperatura del combustible

En la Figura 5-1 se muestra el coeficiente de reactividad de temperatura del combustible (CRTC). Los saltos grandes de discontinuidad, de $5 \cdot 10^{-2}$ pcm/°C, en el coeficiente de reactividad a los 28,1 dpp, 41,8 dpp, 54,2 dpp y 69,3 dpp corresponden al cambio de las tablas de XS (ver Tabla 4-1), por ejemplo, a los 28,1 dpp se cambiaron las tablas calculadas con WIMS al 55 % de plena potencia y 8,5 ppm de boro en el agua pesada a la tabla calculada con WIMS al 65% de plena potencia y 8 ppm de boro en el agua pesada y además se aumentó la potencia del reactor de 60%PP a 61%PP (ver Tabla 4-3).

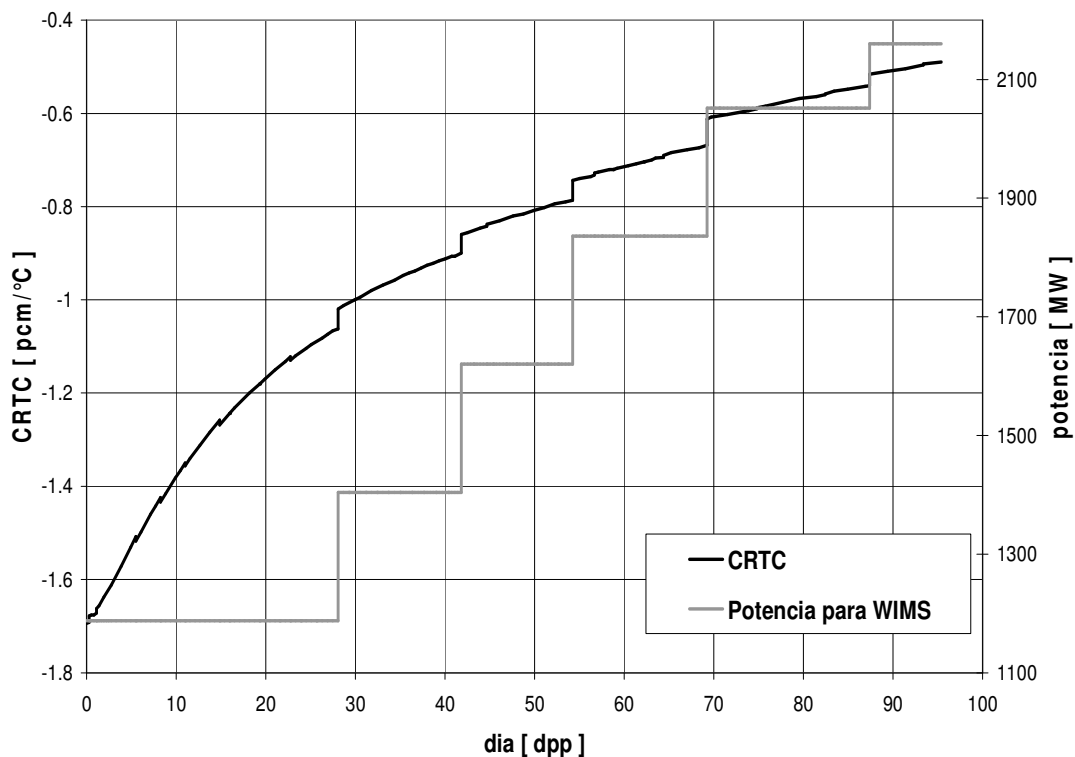


Figura 5-1: coeficiente de reactividad de temperatura del combustible y potencias utilizadas en los cálculos de secciones eficaces con WIMS en función de los días de plena potencia.

También se observan saltos mas pequeños, de $1 \cdot 10^{-2}$ pcm/°C durante los primeros días de simulación, debidos al cambio en la concentración de boro. Estas variaciones generan un incremento del coeficiente de reactividad por temperatura del combustible si se quita boro, mientras que producen una disminución si se agrega boro, como se muestra en la Figura 5-2. Estos saltos ocurren durante toda la simulación cuando se cambió la concentración de boro.

Dado que estos saltos en el coeficiente son pequeños, es razonable suponer que los saltos grandes del coeficiente de reactividad se deben a que la amplitud de los intervalos en que se dividió el intervalo de potencias simuladas es de 10%PP. Si la división del intervalo de potencias de 55%PP a 100%PP se hace más fina, entonces los saltos de discontinuidad serían más pequeños.

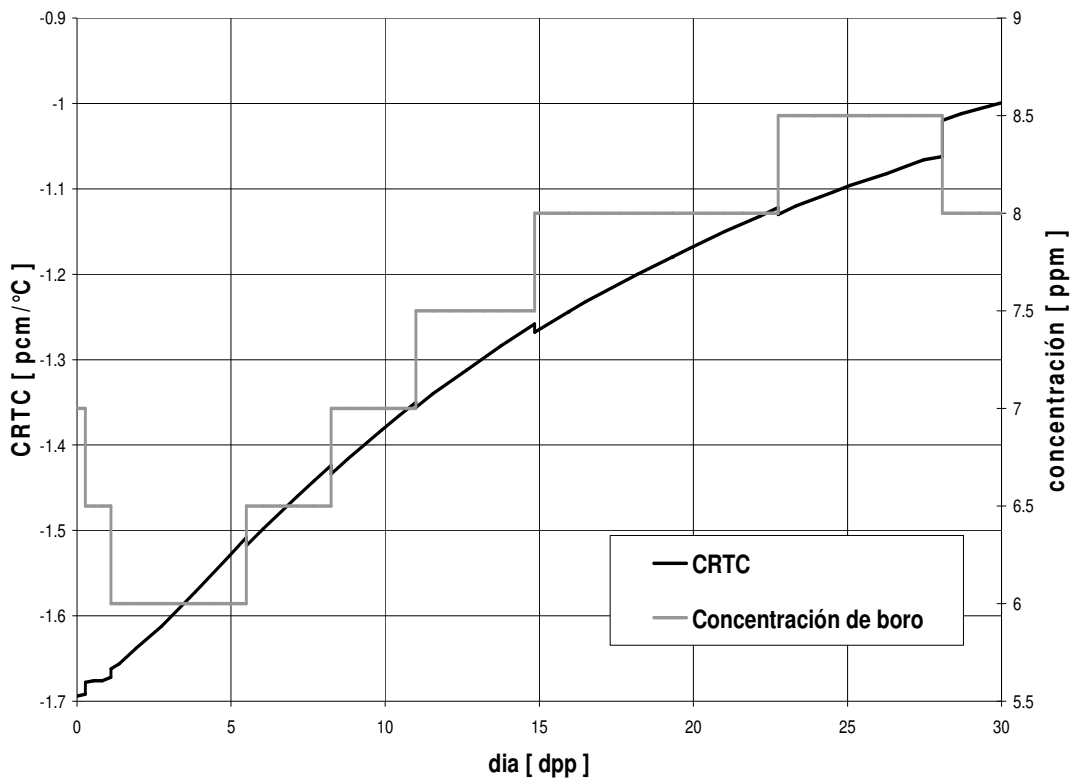


Figura 5-2: coeficiente de reactividad de temperatura del combustible durante los primeros 30 dpp de simulación. También se muestra la concentración de boro usada en este período.

5.2 Coeficiente de reactividad de temperatura del refrigerante

En las Figuras 5-3 y 5-4 se muestra el coeficiente de reactividad de temperatura del refrigerante (CRTR) junto con las concentraciones de boro utilizadas durante la simulación del transitorio y las potencias utilizadas en los cálculos de XS con WIMS respectivamente. Cuando se inyectan 0,5 ppm de boro el coeficiente aumenta 0,04 pcm/°C. En cambio, cuando se extraen 0,5 ppm de boro el coeficiente de reactividad disminuye desde 0,02 pcm/°C para quemados

bajos (o sea, durante los primeros dpp) hasta 0,06 pcm/°C a quemados altos (a partir de los 44,7 dpp).

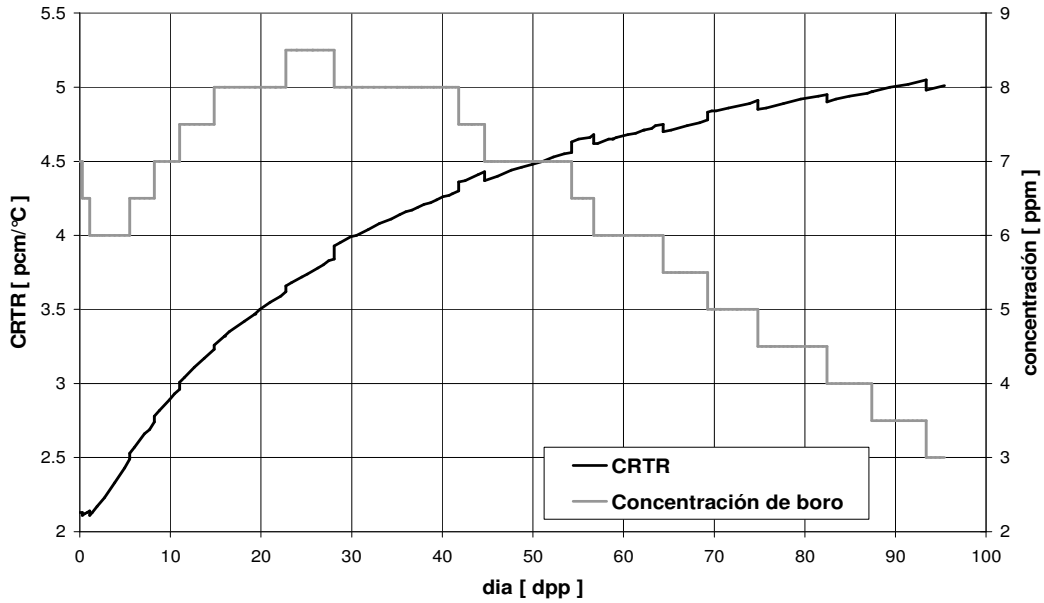


Figura 5-3: coeficiente de reactividad de temperatura del refrigerante y concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador en función de los días de plena potencia.

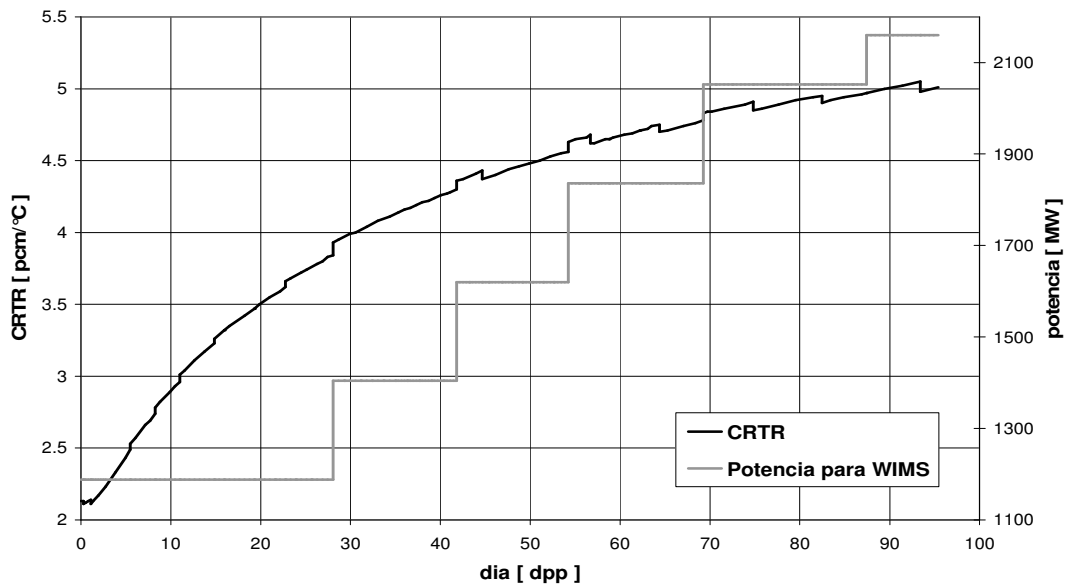


Figura 5-4: coeficiente de reactividad de temperatura del refrigerante y potencia utilizada en los cálculos de secciones eficaces con WIMS en función de los días de plena potencia.

Por otro lado, los cambios de las tablas de secciones eficaces provocan aumentos del coeficiente, como se puede apreciar en la Figura 5-4 a los 28,1 dpp, 41,8 dpp, 54,2 dpp, 69,3 dpp y 87,4 dpp. En estos días, en los que el aumento del coeficiente fue de 0,09 pcm/°C a 0,06 pcm/°C, se extrajo boro (lo que, como se dijo previamente, provoca una disminución del coeficiente) y se aumentó en 10%PP la potencia utilizada en los cálculos de WIMS.

5.3 Coeficiente de reactividad de temperatura del moderador

En las Figuras 5-5 y 5-6 se muestra el coeficiente de reactividad por temperatura del moderador (CRTM) junto con las potencias utilizadas en los cálculos de WIMS y la concentración de boro durante el transitorio respectivamente.

El coeficiente de reactividad aumenta o disminuye aproximadamente 0,5 pcm/°C si se agrega o quita 0,5 ppm de boro respectivamente. Los saltos mas pequeños, de aproximadamente 0,18 pcm/°C, ocurren cuando se cambian las tablas de secciones eficaces a los 28,1 dpp, 41,8 dpp, 54,2 dpp, 69,3 dpp y 87,4 dpp, cuando se sube la potencia usada en el cálculo de las tablas de XS con WIMS y se extrae 0,5 ppm de boro. Por lo tanto, se puede decir que los aumentos de la potencia en las tablas produce un incremento del valor del coeficiente, pero que, a diferencia del coeficiente de reactividad de temperatura del refrigerante, es menor que la disminución que genera la extracción de boro.

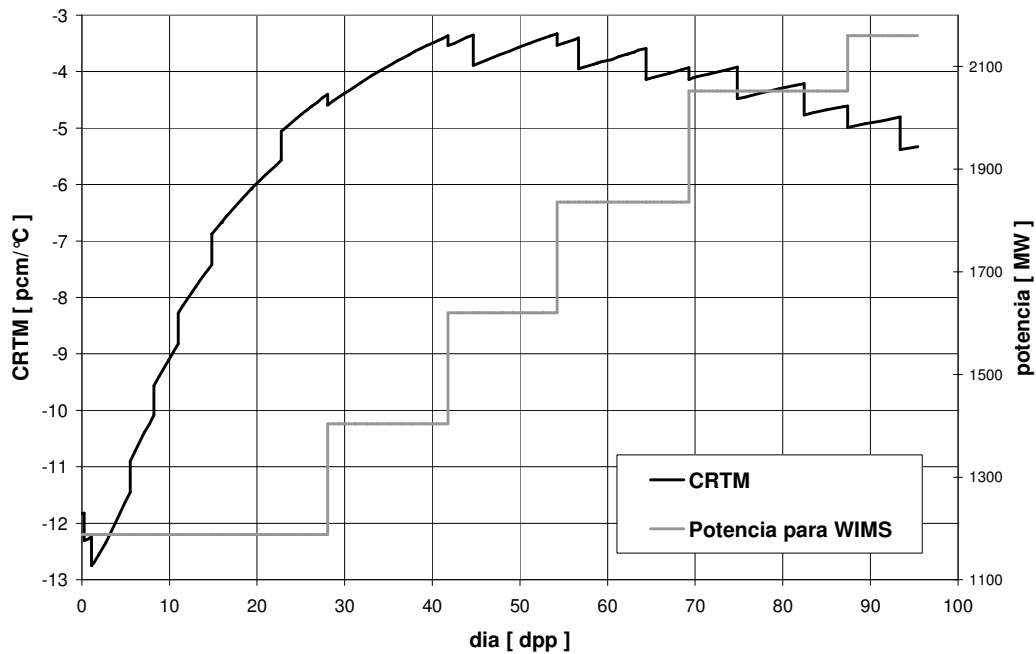


Figura 5-5: coeficiente de reactividad de temperatura del moderador y potencia utilizada en los cálculos de secciones eficaces con WIMS en función de los días de plena potencia.

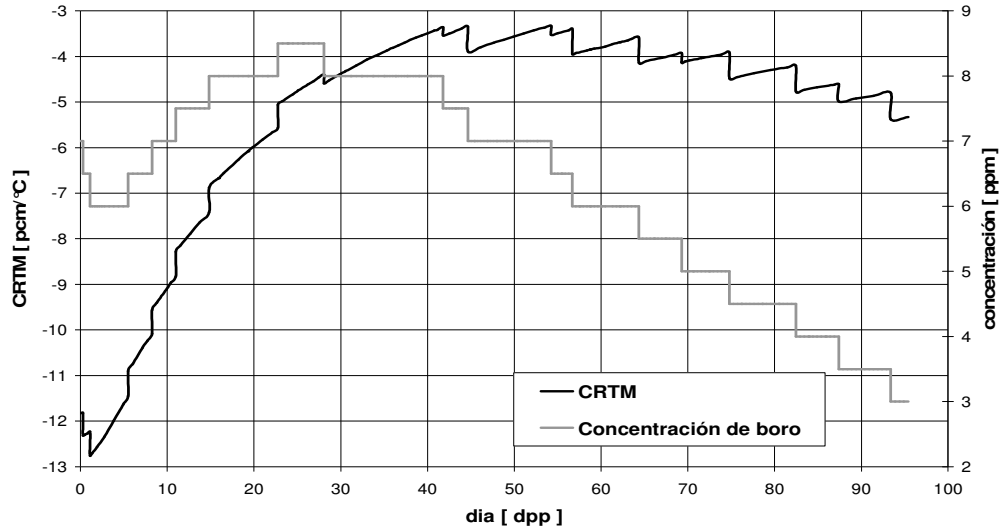


Figura 5-6: coeficiente de reactividad de temperatura del moderador y concentración de boro en función de los días de plena potencia.

5.4 Coeficiente de reactividad por concentración de boro

En las Figuras 5-7 y 5-8 se muestra el coeficiente de reactividad por concentración de boro (CRCB) en el sistema refrigerante-moderador.

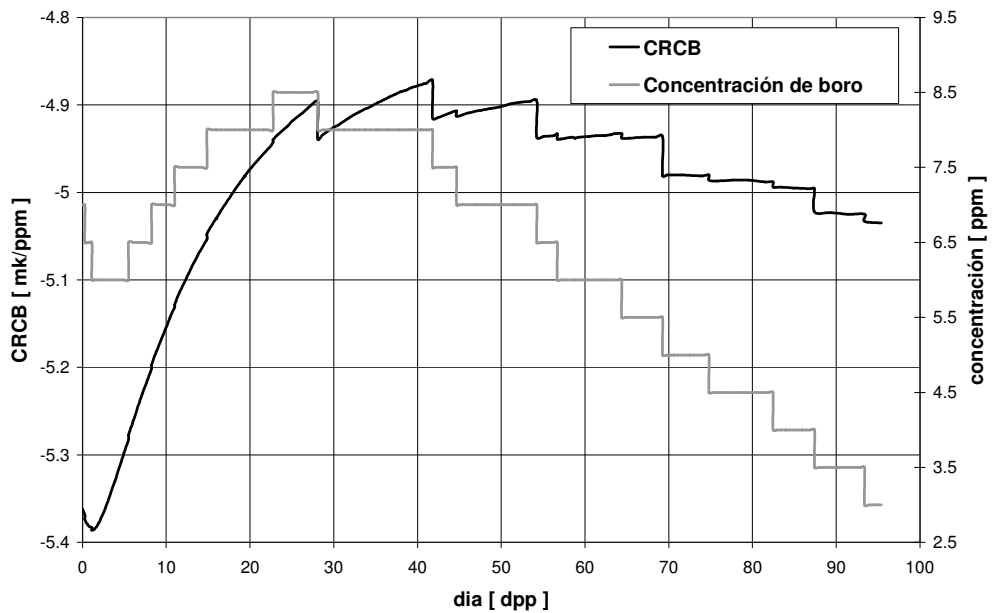


Figura 5-7: coeficiente de reactividad de concentración de boro en función de los días de plena potencia. También se muestra la concentración de boro utilizada en la simulación del transitorio.

Los saltos pequeños, del orden de 0,6 pcm/ppm, ocurren cuando se cambia en 0,5 ppm la concentración de boro en el sistema refrigerante-moderador. Cuando se quita boro, el coeficiente baja, mientras que cuando se agrega boro el coeficiente aumenta. Los saltos grandes, de 4,3 pcm/ppm en el valor del coeficiente, ocurren cuando se cambian las potencias de las tablas de secciones eficaces junto con una disminución de 0,5 ppm en la concentración de boro del sistema refrigerante-moderador.

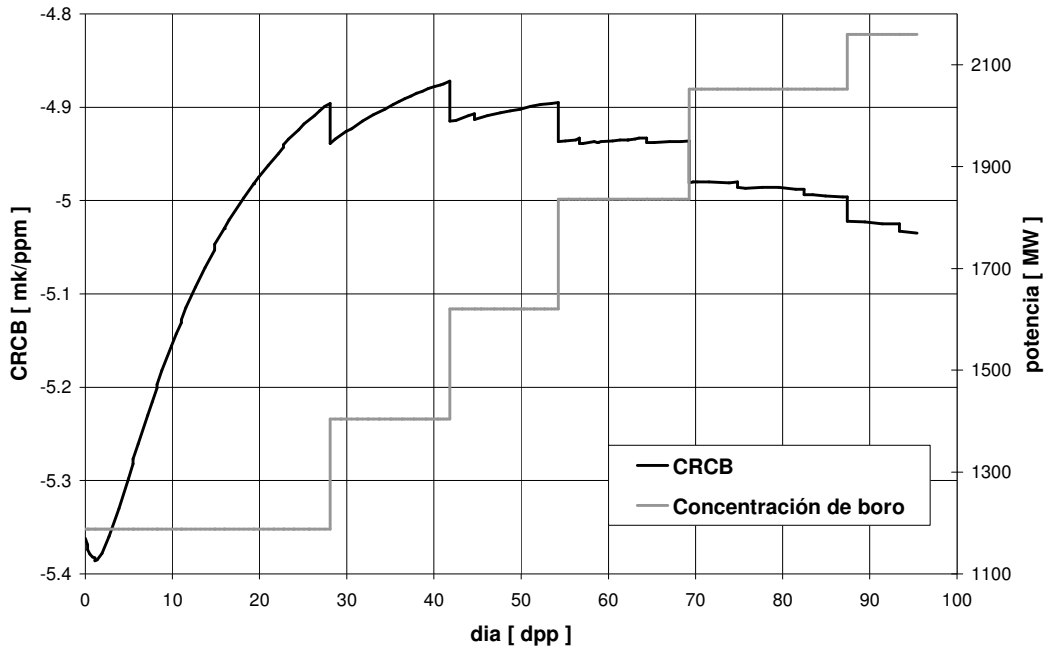


Figura 5-8: coeficiente de reactividad de concentración de boro y potencias utilizadas para el cálculo de las secciones eficaces con WIMS en función de los días de plena potencia.

5.5 Coeficiente de reactividad por vacío de refrigerante

En la Figura 5-9 se muestra el coeficiente de reactividad de vacío de refrigerante (CRVR) en función de los días de plena potencia. Inicialmente tiene el valor de 14,918 mk y continúa siendo positivo durante todo el transitorio simulado, aunque con una tendencia a disminuir su valor con los días de operación. Cuando se extraen 0,5 ppm de boro en el sistema refrigerante-moderador el coeficiente disminuye aproximadamente 0,18 mk, mientras que cuando se inyectan 0,5 ppm de boro el coeficiente aumenta 0,21 mk. Como se muestra en la Figura 5-10, las variaciones del valor del coeficiente en los días en que se cambió la potencia utilizada en el cálculos de las tablas de XS son del orden de las variaciones que se producen cuando sólo se cambió la concentración de boro. Por esto, los cambios de potencia en las tablas de secciones eficaces calculadas con WIMS no producen variaciones en el valor del coeficiente de reactividad.

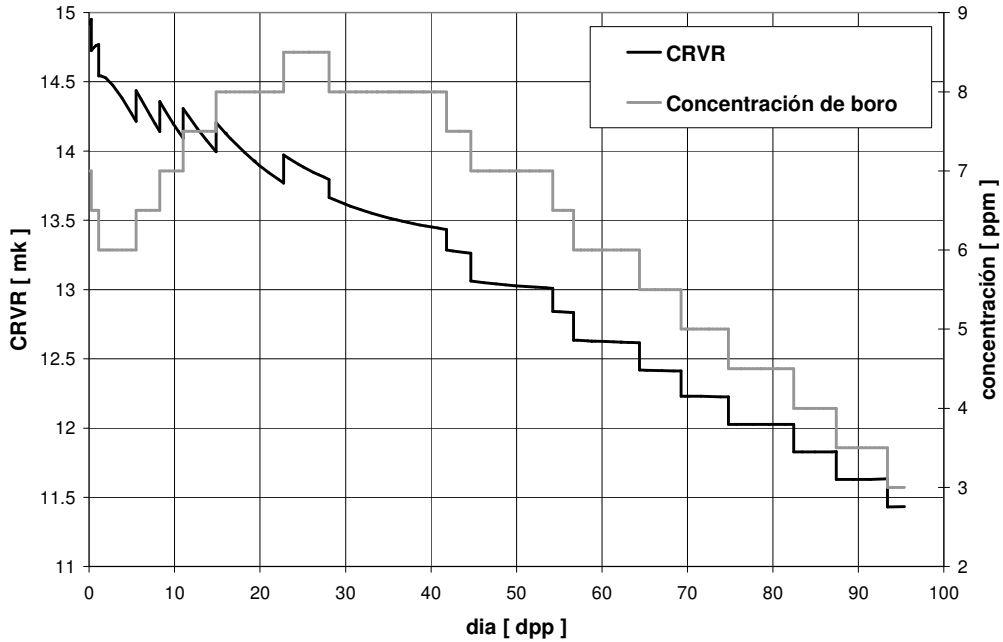


Figura 5-9: coeficiente de reactividad por vacío de refrigerante en función de los días de plena potencia. También se muestra la concentración de boro utilizada durante el transitorio.

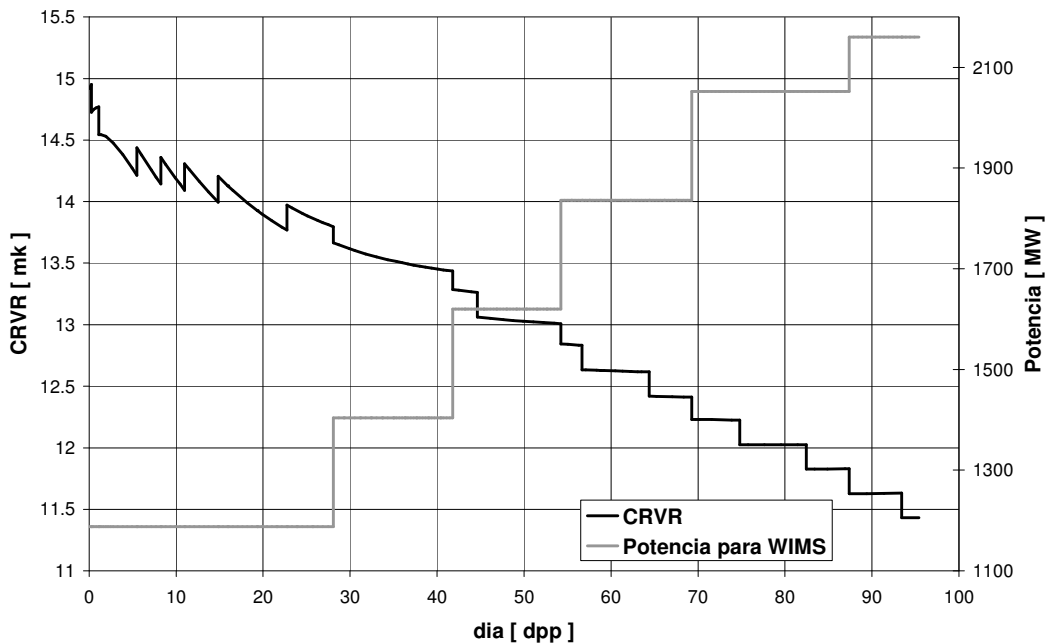


Figura 5-10: coeficiente de reactividad por vacío de refrigerante en función de los días de plena potencia. También se muestra la potencia utilizada en los cálculos de secciones eficaces con WIMS.

6. CONCLUSIONES

Se simuló el transitorio del núcleo de la Central Nuclear Atucha 2 desde el arranque, con combustible fresco y xenón en equilibrio, hasta el día calendario 132 (95,4 dpp) cuando la máxima potencia de canal del núcleo se alejó del canal central y las máximas potencias de canal en las zonas hidráulicas 1 a 4 se encontraron muy cerca de sus respectivos límites de seguridad. A partir de los resultados de la simulación del transitorio se calcularon los coeficientes de reactividad de temperatura de combustible, de temperatura de refrigerante, de temperatura del moderador, de concentración de boro y de vacío de refrigerante.

La simulación del arranque comenzó con combustible fresco, con el reactor a una potencia total de 1188 MW térmicos (55% de plena potencia) y un factor de multiplicación efectivo de 1,000244. Con esta potencia total inicial no se superaron los límites para las máximas potencias de canal por zona hidráulica y para la máxima potencia lineal dados en la Tabla 4-2.

El control del factor de multiplicación efectivo se hizo mediante la inyección o la extracción de 0,5 ppm de boro en el sistema refrigerante-moderador. Cuando se inyectaron o se extrajeron 0,5 ppm de boro, el factor de multiplicación efectivo disminuyó o aumentó respectivamente alrededor de 2,6 mk, independientemente del día de operación (o equivalentemente, del quemado de combustible). El pico de plutonio se alcanzó aproximadamente el día calendario 49 (26,9 dpp).

Los incrementos de la potencia total durante toda la simulación del transitorio fueron de 21,6 MW (o 1% de plena potencia), que producen aumentos de la MPL de hasta 8,5 W/cm aproximadamente y de hasta 116 W en la máxima potencia de canal. Durante los primeros días de simulación no se aumentó la potencia total del reactor porque se superaría, en el día calendario 23 (o 12,7 dpp) el límite de 475 W/cm para la máxima potencia lineal. Si bien es posible operar inicialmente a mayor potencia del reactor, sería necesario disminuirla antes de alcanzar los 23 días calendario para no superar el límite de la potencia lineal.

En el día calendario 29 (16 dpp) se comenzó a subir la potencia total del reactor. Desde ese día hasta el día calendario 94,5 (60,1 dpp) el limitante sobre los aumentos de la potencia total fue la máxima potencia lineal mientras que la máxima potencia de canal no generó limitaciones y tuvo un comportamiento creciente con el tiempo. Pasado el día calendario 94,5 la limitante sobre el aumento de la potencia del reactor fue la máxima potencia de canal.

El coeficiente de reactividad de temperatura del refrigerante resultó tener valores positivos durante toda la simulación, aumentando desde el inicio de la simulación hasta el final. El coeficiente de reactividad de vacío de refrigerante también resultó positivo durante toda la simulación, pero disminuye desde el arranque hasta el fin de la simulación. El resto de los coeficientes de reactividad calculados resultaron negativos durante toda la simulación.

Los coeficientes de reactividad de temperatura del combustible y de temperatura del refrigerante aumentaron cuando se cambiaron las tablas de secciones eficaces. Este aumento se debe al aumento del 10%PP en la potencia

con la que se calcularon las tablas. Por otro lado, la inserción de boro produjo una disminución de los valores de estos coeficientes, mientras que la extracción de boro produjo un aumento de sus valores. Ambos coeficientes aumentaron con el tiempo de operación, es decir, aumentaron con el quemado del combustible del reactor.

Los coeficientes de reactividad de temperatura del moderador y de concentración de boro disminuyeron su valor durante los primeros dpp, luego aumentaron hasta alcanzar un valor máximo y finalmente comenzaron a disminuir hasta el final de la simulación. Estos coeficientes son sensibles tanto a los cambios de la concentración de boro como a los aumentos en la potencia utilizada en los cálculos de las tablas de XS. Cuando se aumentó la concentración de boro, el coeficiente incrementó su valor mientras que cuando se quitó boro, el coeficiente disminuyó su valor. Los cambios de 10%PP cuando se cambiaron las tablas de secciones eficaces produjo un aumento del valor del coeficiente de reactividad de temperatura del moderador, mientras que produce una disminución del coeficiente de reactividad de concentración de boro.

El coeficiente de reactividad de vacío de refrigerante resultó sensible a los cambios de la concentración de boro, pero no se pudo asegurar que los cambios en la potencia con que se calculan las tablas de secciones eficaces con WIMS produzcan variaciones apreciables en este coeficiente.

Los valores de los coeficientes de reactividad de la simulación son consistentes con valores obtenidos en cálculos previos, y evolucionan hacia los valores obtenidos para el caso de quemado en equilibrio. Hay que tener en cuenta que, si bien el reactor opera al 100% de potencia, la concentración de boro al final de la simulación todavía es de 3,5 ppm, mientras que el caso de equilibrio sólo tiene 0,05 ppm de boro residual.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. HALSALL, M. J. et al. WIMSD A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis, distribuido por la NEA Databank, NEA 1507/02 (1997).
2. LESZCZYNSKI F., LOPEZ ALDAMA D. and TRKOV A. (Editors). *WIMS-D Library update: final report of a coordinated research project*, STI/PUB/1264, IAEA. Viena, Mayo 2007.
3. MARLEAU G., HERBERT A. and ROY R. *A user guide for DRAGON. Version DRAGON_000331 release 3.04*, IGE-174 Rev.5, Universidad de Montreal. Montreal, Abril 2000.
4. MARLEAU G. *DRAGON theory manual. Part 1: Collision Probability Calculations*. IGE-236, Universidad de Montreal. Montreal, Febrero 1999.
5. GRANT C. *PUMA versión 4. Manual del Usuario [PUMA version 4. User's Manual]*. Informe interno, CNEA. Buenos Aires, 2005.
6. GRANT C. et al. *Validation of Updated Calculation Models Proposed for Atucha-II PHWR. Part II: Benchmark Comparison of PUMA Core Parameters with MCNP5 & Improvements Due to a Simple Cell Heterogeneity Correction*. PHYSOR-2006 Conference. Vancouver, Septiembre 2006.
7. MOLLERACH R. et al. *Revision of the Reactor Physics Calculation Programs and Models used for the Atucha-II Plant. Part 2: Description of Models, Results and Benchmark Comparisons of Representative Core Problems and Main Conclusions*. (En publicación), NASA. Buenos Aires.
8. MOLLERACH R., FINK J. and LESZCZYNSKI F. *Revision of the Reactor Physics Calculation Programs and Models used for the Atucha-II Plant. Part 1: Results and Benchmark Comparisons of Representative Cell and Macrocell (Control Rod) Problems*. IT-FN-06/007, NASA. Buenos Aires, Abril 2007.
9. KHATCHIKIAN, F. *Update of the CNA II Reactivity Coefficients for BEQ and SOL cores*. IT-FA-09/002, NASA, Buenos Aires, 2009.