

EVALUACIÓN NEUTRÓNICA DE LA OPERACIÓN DE LA CENTRAL DE EMBALSE (CNE) CON CANALES SIN COMBUSTIBLE

Gonzalo D. Fernandez^a, Inés Gonzalez^b, Facundo A. Khatchikian^a, Ricardo J. Mollerach^a Arnaldo Rabiti^b y Javier E. Villar^b

^a*Departamento de Física y Análisis, Nucleoeléctrica Argentina S.A., Arribeños 3619, 1427 Cdad. Autónoma de Buenos Aires, Argentina, rmollerach@na-sa.com.ar, <http://www.na-sa.com.ar>*

^b*Departamento de Seguridad Nuclear, Central Nuclear Embalse, Nucleoeléctrica Argentina S.A., Camino a la Cruz S/N, Embalse, Córdoba, Argentina, jvillar@na-sa.com.ar, <http://www.na-sa.com.ar>*

Palabras clave: CNE, operación con canales sin combustible.

Resumen. Para mitigar ciertos problemas relacionados con el envejecimiento de la planta, la Central Nuclear Embalse opera desde el año 2011 con algunos canales sin combustible. Con el fin de estudiar la factibilidad de la operación en la condición mencionada se hizo necesario actualizar el modelo de reactor utilizado en los cálculos de difusión, estudiar nuevas estrategias de recambio con el fin de preservar la forma de flujo neutrónico y las potencias máximas de operación, simular la operación estacionaria del reactor para verificar la no superación de máximas potencias y evaluar la influencia de la nueva configuración de canales sobre la regulación de potencia.

1 INTRODUCTION

Para mitigar ciertos problemas relacionados con el envejecimiento de la planta, la Central Nuclear Embalse opera desde el año 2011 con algunos canales sin combustible. En dicho año fue vaciado el canal Q06; luego, a comienzos del año 2012 se prosiguió con el vaciado de Q08 y Q09, y a fin del mismo año, durante la parada de mantenimiento, se vació el Q10. Finalmente, en la parada programada del año 2013 se vació el canal Q11.

Con el fin de estudiar la factibilidad de la operación en la condición mencionada se hizo necesario actualizar el modelo de reactor utilizado en los cálculos de difusión, estudiar nuevas estrategias de recambio con el fin de preservar la forma de flujo neutrónico y las potencias máximas de operación, simular la operación estacionaria del reactor para verificar la no superación de máximas potencias y evaluar la influencia de la nueva configuración de canales sobre la regulación de potencia.

Tanto el cálculo de la gestión de combustible del reactor de la CNE como las evaluaciones de diseño y estrategia se realizaron con el código de difusión 3D PUMA, desarrollado en CNEA. Adaptarlo a las nuevas condiciones de operación requirió de un número de modificaciones, a saber: incrementar el mallado espacial, calcular las constantes de celda con el código WIMS y las de supercelda con DRAGON y calcular las secciones eficaces para representar los canales sin combustible utilizando este último código mediante un modelo bidimensional desarrollado para tal fin. La validez del modelo se demostró por un lado y previo al vaciado en base a comparaciones entre las distribuciones de potencia obtenidas con PUMA y con MCNP y por otro, ya con canales vacíos, por comparación con mediciones de planta. En el primer caso, se utilizó un modelo de Embalse simplificado, para la condición en que todos los canales tienen combustible y para el caso con cuatro canales sin combustible obteniendo diferencias relativas en la potencias de canal menores a 2,4% para el primer caso y a 3,7 % en el segundo y observando una sobreestimación de potencia en los canales vecinos al canal sin combustible. En el segundo estudio se observó que las discrepancias globales entre señales de flujo provistas por detectores autoenergizados y flujos térmicos evaluados a partir de la Gestión de Combustible son consistentes con los valores históricos.

La estrategia alternativa de recambio de un núcleo con canales vacíos fue obtenida utilizando la opción time average de PUMA, comprobando así la factibilidad de la operación en dicha condición operativa con un incremento acotado en las máximas potencias de canal y de manojo. Mientras que la estrategia de recambio original de la planta contempla dos zonas diferenciadas de recambio con diferentes quemados promedio de extracción, para la nueva situación se agrega una tercera zona, cercana a los canales sin combustible, donde se recambian los combustibles con mayor frecuencia para compensar la menor cantidad de elementos combustibles en la región. Con la estrategia de recambio alternativa se obtienen potencias de canal con diferencias menores al 3,0 % respecto al caso de referencia y una pérdida en el quemado promedio de extracción del 2,7 % con 5 canales vacíos.

La simulación de la operación estacionaria del reactor confirmó los resultados del cálculo Time Average proveyendo valores realistas para las potencias de canal y manojo, a la vez que permitió evaluar el impacto sobre la capacidad de acción del sistema de control de reactividad a corto plazo (controladores zonales de agua liviana).

Luego de los arranques de la planta, posteriores al vaciado de los canales, se realizaron diferentes mediciones con el objeto de evaluar las distribuciones de flujo y el comportamiento del sistema de regulación del reactor (RRS). Las mediciones involucran tres escalas de tiempo de acuerdo a un muestreo diario, uno horario y otro rápido. No se observó comportamiento anormal alguno en las variables monitoreadas ni indicios de deficiencias en el control de perturbaciones que pudieran causar oscilaciones de flujo debido a variaciones en la

concentración de xenón.

2 DESCRIPCIÓN DE LA CENTRAL DE EMBALSE

Los reactores CANDU como el de CNE, moderados con agua pesada, alimentados con combustible de uranio natural y enfriados con agua pesada presurizada, se basan en el concepto del tubo de presión. El combustible del reactor se dispone en tubos horizontales, también llamados canales, en los que se refrigera con agua pesada a presión. Esos canales pasan a través de un gran recipiente cilíndrico (la calandria) que contiene el moderador y el reflector de agua pesada.

Los canales en el núcleo son 380 y se ubican formando una red cuadrada, como puede verse en la [Figura 1](#).

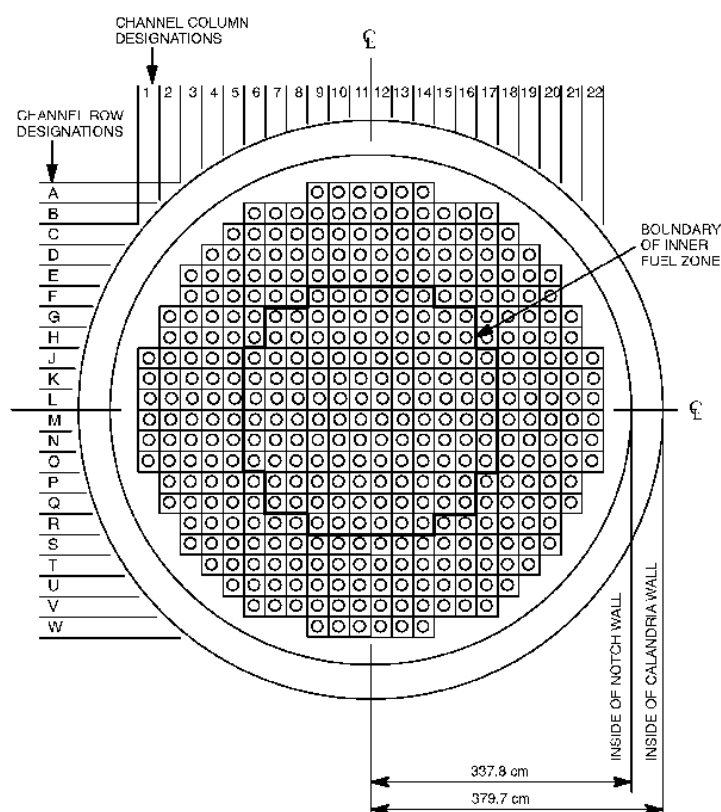


Figura 1: Distribución de los canales en el núcleo del reactor y su denominación alfanumérica

El combustible consiste en manojos de 50 cm de longitud compuestos por 37 barras combustibles dispuestas en anillos concéntricos. Cada barra combustible está conformada por una vaina de zircalloy llena con pastillas de dióxido de uranio. Cada canal combustible alberga en su interior 12 de los mencionados manojos. El agua pesada presurizada (refrigerante) se bombea a través de los tubos de presión, refrigerando el combustible y conduciendo el calor desde allí al colector de salida y a los generadores de vapor.

La forma usual de ingreso del combustible al reactor es en conjuntos de 8 manojos por vez que ingresan por un extremo del canal, desplazando a los 8 manojos que salen por el extremo opuesto. Dado que canales vecinos se recambian en sentidos opuestos, esta estrategia permite lograr un aplanamiento axial del flujo neutrónico.

A los fines del control de la distribución espacial de potencia, el núcleo se divide en 14 regiones teóricas, 7 zonas radiales, subdivididas axialmente en anterior y posterior (ver [Figura 2](#)).

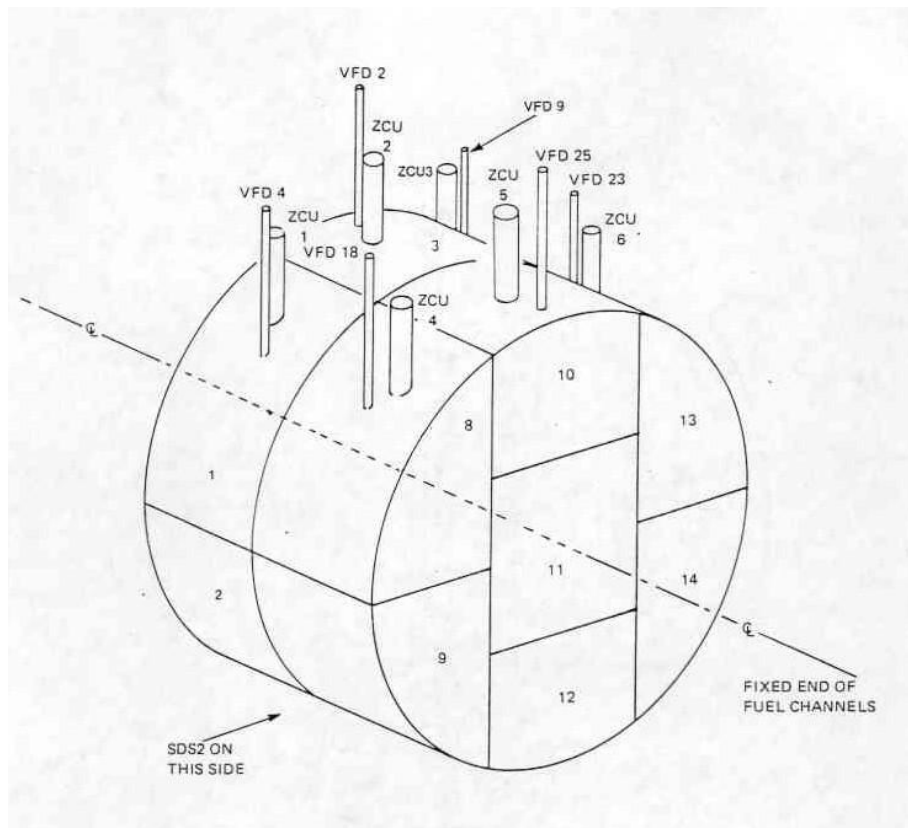


Figura 2: División del núcleo del reactor en 14 zonas

Cada zona tiene un controlador líquido (o zona líquida) cuyo nivel de agua liviana puede regularse para ajustar la absorción neutrónica y, con ella, la potencia promedio de la zona. Los vacíos dentro de este sistema se llenan con helio.

Por otra parte dentro del reactor se encuentran distribuidos 102 detectores de vanadio que pertenecen al sistema de mapeo de flujo neutrónico que posee la central y que permite tener conocimiento de la distribución global de flujo térmico dentro del reactor así como el flujo promedio en cada una de las 14 zonas antes mencionadas.

3 CÓDIGOS DE CÁLCULO

3.1 WIMS-D5b

El código WIMS-D5b (Halsall, M. J. et al., 1997) resuelve, en forma determinista, la ecuación de transporte neutrónico en una celda de combustible realizando varias aproximaciones, siendo las más importantes el uso de grupos de energía y la representación geométrica simplificada a 1 ó 2 dimensiones y dividida en una malla de cálculo espacial discreta que permite calcular las variaciones del flujo neutrónico.

Los principales resultados son el factor de multiplicación, el flujo neutrónico, las secciones eficaces macroscópicas por grupos de energía, y la composición isotópica en función del quemado, entre otras.

El método elegido para resolver la ecuación de transporte fue por probabilidades de colisión en 2 dimensiones, en toda la celda. La biblioteca de datos nucleares utilizada fue la WIMS-IAEA de 69 grupos de energía desarrollada en el Proyecto WIMS-D LIBRARY UPDATE (Leszczynski F., Lopez Aldama D., y Trkov A., 2007), sin condensar a menos grupos. Las secciones eficaces macroscópicas de celda fueron calculadas con la opción de

'buckling crítico'. El xenón 135 y el yodo 135 fueron considerados en equilibrio.

La entrada de WIMS de CNE fue revisada y actualizada, tanto en las opciones de cálculo como en los parámetros de operación del reactor. Sin embargo, se realizaron algunas modificaciones para simplificar las comparaciones con MCNP ([X-5 Monte Carlo Team, 2003](#)).

3.2 DRAGON

DRAGON es un programa de cálculo de transporte de neutrones, desarrollado en la Universidad de Montreal, que puede tratar una variedad de problemas en una, dos y tres dimensiones en diferentes geometrías utilizando métodos de probabilidad de colisión de primer vuelo. Incluye todas las funciones que caracterizan a un código de celda, a saber: interpolación de las secciones eficaces microscópicas suministradas por medio de bibliotecas; cálculos resonantes de autoblandaje en geometrías multidimensionales; cálculos de flujo de neutrones multigrupo y multidimensional que pueden tener en cuenta las fugas neutrónicas; cálculos equivalencia transporte-transporte o transporte-difusión, la edición de propiedades condensadas y homogeneizadas para el cálculo de reactor y también cálculos de quemado.

DRAGON tiene la ventaja de que puede utilizar diferentes formatos de bibliotecas de secciones eficaces incluyendo el formato WIMS. Esto permite utilizar las bibliotecas para WIMS directamente con DRAGON.

La descripción de los métodos de cálculo de probabilidades de colisión utilizados en DRAGON puede verse en [Marleau G., 2001](#). El uso del programa, por otra parte, se describe en [Marleau G., Herbert A. and Roy R., 2013](#). Algunos aspectos de la metodología de cálculo utilizada por el código se pueden ver en [R. Roy, A. Hébert, and G. Marleau., 1989](#); y en [Roy R., Marleau G., Tajmouati J., and Rozon D., 1994](#).

3.3 PUMA

Para los cálculos de reactor se utilizó el código PUMA versión 4 ([Grant, C., 2005](#)), que resuelve la ecuación de difusión multigrupo en 3 dimensiones mediante el método de diferencias finitas. El código tiene la capacidad para realizar gestión de combustible, reacoplamiento termohidráulico, cinética espacial y cálculos promediados en el tiempo.

Se utilizó para la representación del núcleo de la CNE un modelo completo tridimensional con una grilla cartesiana que contempla 49, 33 y 27 planos en X, Y y Z respectivamente ([Villar, J., 2001](#)), secciones eficaces a 2 grupos de energía calculadas con WIMS-D y secciones eficaces incrementales ya obtenidas con DRAGON en cálculos anteriores.

El modelo de reactor representa el reflector que rodea el núcleo con el estrechamiento de la calandria en los extremos axiales y varios de los internos del reactor. Las secciones eficaces incrementales, calculadas con DRAGON, de las barras ajustadoras de cobalto y sus tubos guía fueron obtenidas de [Mollerach, R., 2002](#), las de las zonas líquidas de [Shen, W., 1999](#), las de los tubos guía de las barras de corte y absorbedoras de [Higa, M., 2001](#). Las secciones eficaces incrementales de otros internos del reactor como los tubos de inyección de veneno líquido, las barras soporte de las ajustadoras, los tubos guía de los detectores de flujo, los resortes de tensión de ajustadoras, absorbedoras y de corte y los posicionadores y agarraderas de las unidades de zonas líquidas, detectores, ajustadoras, absorbedoras y corte se obtuvieron [Higa, M., 1994](#) y sólo se representan como incrementos en las absorciones térmicas.

4 MODELOS

El código MCNP versión 5 es considerado como el código de referencia para cálculos de transporte neutrónico, por lo que se realizaron comparaciones de las distribuciones de

potencias con y sin canales vacíos entre MCNP y PUMA, considerando un modelo idealizado. De esta forma fue posible verificar las distribuciones de potencia obtenidas por este último código usando secciones eficaces de canal vacío calculadas con DRAGON.

Para estas comparaciones se eligió una celda de CNE idealizada, con combustible fresco. Además, para simplificar el cálculo de MCNP, se hicieron dos modificaciones a la celda de CNE correspondiente a plena potencia.

La primera modificación fue considerar una única temperatura de 20,45 °C en toda la celda, que es la temperatura que corresponde a la biblioteca de MCNP. De esta forma se evita tener que generar nuevas bibliotecas térmicas para el agua liviana y pesada.

La segunda modificación fue eliminar las impurezas de los materiales y reemplazar el zircalloy usado en la celda por circonio puro, para reducir el tiempo de cálculo de MCNP. En este código, cuando un neutrón ingresa a un volumen con una cierta densidad, calcula la probabilidad de que haya una interacción con alguno de los átomos considerando las distintas secciones eficaces de los isótopos presentes. Al eliminar los elementos no representativos y de bajo porcentaje de participación, considerados como impurezas, este cálculo se simplifica y se reduce el tiempo que demanda calcular la probabilidad de interacción en el material.

Así, se consideró que el combustible se compone únicamente de UO_2 , la vaina y el tubo de calandria de circonio puro y el tubo de presión de la aleación de circonio y 2,5 %p Nb. El error cometido por esta aproximación es muy pequeño, pues más del 97% del zircalloy es circonio, y los otros elementos tienen secciones eficaces del orden del circonio.

También se eliminó el litio del agua pesada, pero para mantener el reactor crítico se supuso que aquella estaba borada con 12,3 ppm de boro natural (el gadolinio no se encuentra en la biblioteca de MCNP5 utilizada).

Solo se consideró combustible fresco de uranio natural, sin xenón, sin considerar internos del reactor, esto es, sin considerar zonas líquidas, barras ajustadoras, tubos guías ni otros materiales estructurales.

Con estas aproximaciones el tiempo de cálculo de MCNP para obtener una precisión estadística adecuada fue de varias horas. Los canales que se eligieron para vaciar de combustible son los G07, G16, Q07 y Q16, de forma de modelar solo 1 cuarto del reactor manteniendo la simetría y que el tiempo de cálculo necesario para obtener una estadística adecuada no fuera mayor a un día.

4.1 MODELOS DE SUPERCELDA CON DRAGON

Para representar canales sin combustible en el modelo de reactor se requiere contar con secciones eficaces que representen el canal en esas condiciones. Para ello se utilizó el código DRAGON usando un modelo de supercelda bidimensional donde se representa el canal vacío rodeado de canales con combustible. Las secciones eficaces buscadas se obtienen homogeneizando y condensando en las regiones del modelo que comprenden al canal sin combustible.

La supercelda está formada por un arreglo de 7x7 canales, donde el canal sin combustible se encuentra en el centro del modelo y está rodeado por 48 canales con combustible, como puede verse en la [Figura 3](#). El modelo tiene condición de contorno de simetría en los dos planos que pasan por el centro del canal sin combustible y condición de contorno de reflexión en los planos opuestos. La supercelda está dividida en 2121 regiones.

Se calcularon con este modelo dos juegos de secciones eficaces para representar el canal vacío. El primero para ser utilizado en las comparaciones con MCNP, con las simplificaciones mencionadas, y el segundo con las condiciones de operación de la planta, utilizado en la gestión de combustible.

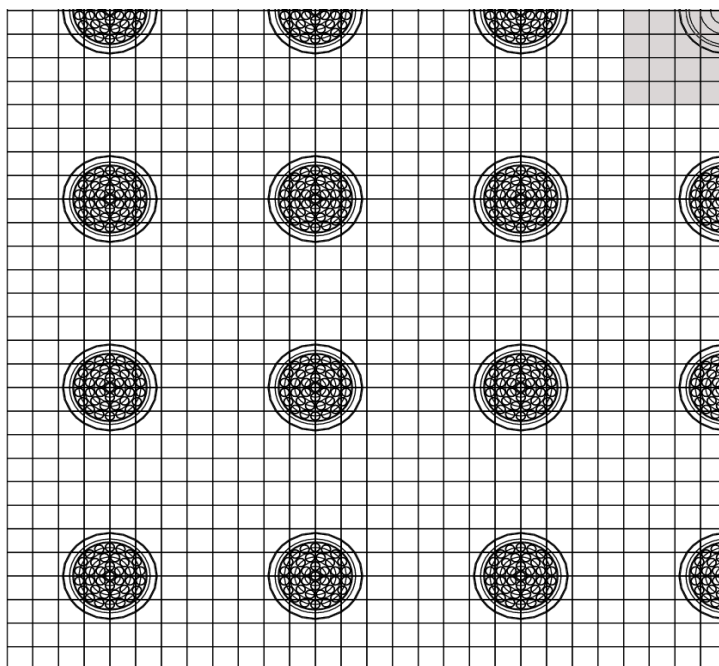


Figura 3: Modelo de supercelda de DRAGON para representar el canal sin combustible

Los elementos combustibles se representan con su geometría real, es decir que se representan explícitamente las 37 barras combustibles. La composición isotópica para el modelo de operación se tomó de la salida de materiales de WIMS para un quemado de 4000 MWd/tU que es el quemado medio del núcleo. Las condiciones consideradas para el refrigerante dentro del canal vacío son 104,833 bar de presión, 268°C de temperatura y 98,92% la pureza molar del agua pesada refrigerante.

5 COMPARACIONES CON MCNP

Se compararon los valores de k -infinito y las distribuciones de potencia con y sin canales vacíos obtenidos con MCNP con los obtenidos con PUMA. Estos fueron calculados usando secciones eficaces obtenidas con WIMS para los canales con combustible y con DRAGON para los canales sin combustible de este mismo modelo de núcleo idealizado.

En la Figura 4 se pueden observar las diferencias relativas porcentuales entre las potencias de canal obtenidas con PUMA y las obtenidas en MCNP para el caso con los 380 canales con combustible. La diferencia DifCanal(i) del canal i está calculada como $(PotPUMA(i) - PotMCNP(i)) * 100 / PotMCNP(i)$.

En la zona central, las potencias de canal calculadas con PUMA son levemente menores que las de MCNP, y en los canales externos PUMA sobreestima las potencias de canal. La máxima diferencia entre las potencias de canal es de 2,4 %, en los canales simétricos E03, E20, S03 y S20.

En cambio, en las potencias de manajo las diferencias máximas son algo mayores, probablemente debido a la mayor incerteza estadística de los resultados de MCNP. En este caso, la máxima sobreestimación de PUMA, del 3,39%, se da en los manojos 9 de los canales E03, E20, S03 y S20 y la máxima subestimación de PUMA, del 4,38 %, en los manojos 12 de los canales A09, A14, W09 y W14.

En la Figura 5 se pueden observar las diferencias relativas porcentuales entre las potencias de canal obtenidas con PUMA y las obtenidas en MCNP para el caso con 376 canales con combustible y los canales G07, G16, Q07 y Q16 vacíos de combustibles.

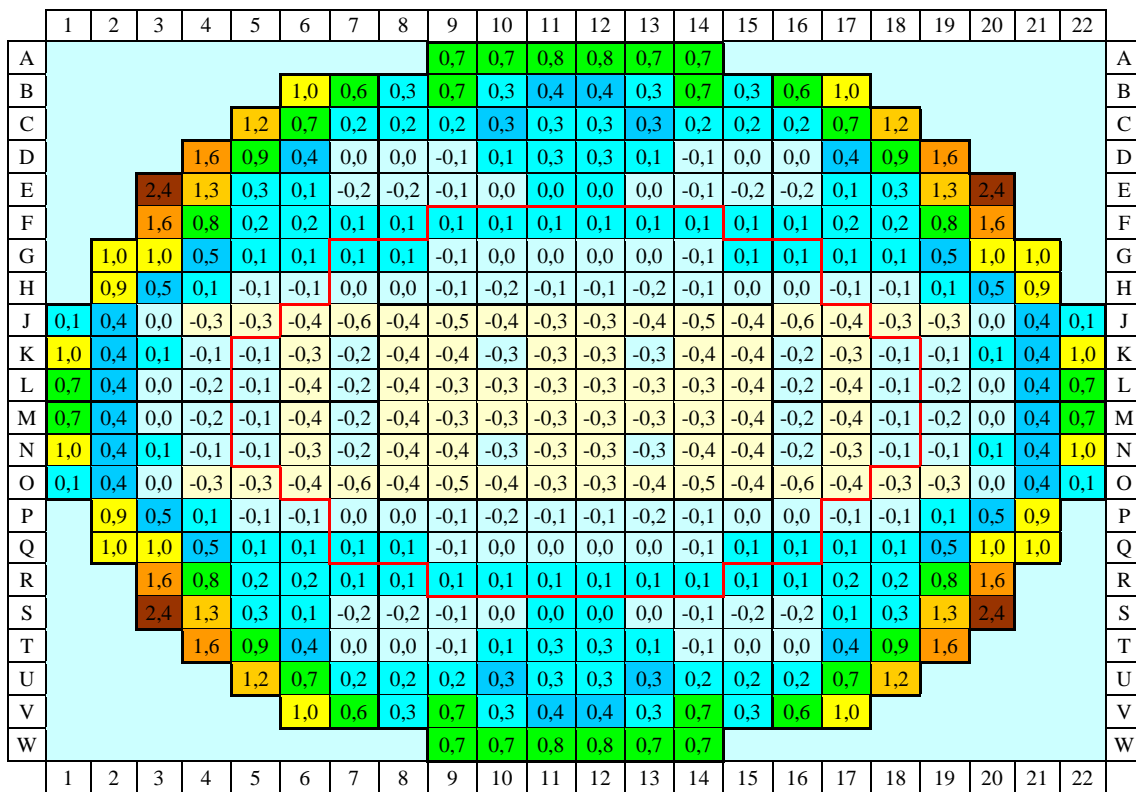


Figura 4: Diferencias relativas porcentuales de las potencias de canal entre MCNP y PUMA con 380 canales con combustible.

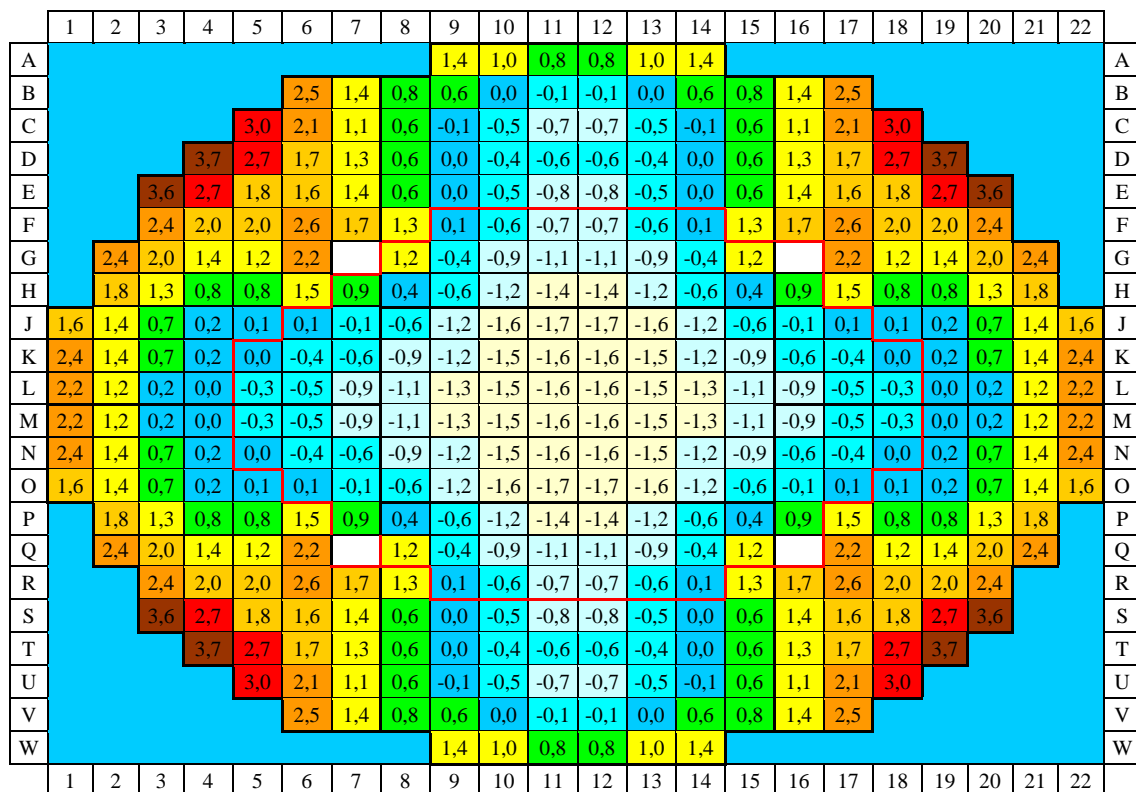


Figura 5: Diferencias relativas porcentuales de las potencias de canal entre MCNP y PUMA con 376 canales con combustible.

Las potencias de canal calculadas con PUMA en la zona central son menores que las de MCNP, y en los canales externos PUMA sobreestima las potencias de canal. La máxima diferencia entre las potencias de canal es de 3,7 %, en los canales simétricos D04, D19, T04 y T19. En los manojos 3 de estos canales se encuentran la máxima sobreestimación de PUMA, del 4,70%. La máxima subestimación de PUMA, de 2,48 %, se da en los manojos 9 de los canales L11, L12, M11 y M12.

En los 8 canales vecinos a los canales sin combustible la máxima diferencia de potencia de canal es de 2,6% y se da en los canales F06, F17, R06 y R17. PUMA sobreestima la potencia de estos 8 canales vecinos. Las diferencias de las potencias de manajo vecinas varían entre -0,02 % y 3,39 %.

6 ACUALIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE COMBUSTIBLE

6.1 Cálculos promediados en el tiempo (time average)

En la Central Nuclear Embalse el recambio de combustible se realiza durante la operación a potencia, introduciendo en el núcleo una cantidad de manojos por un extremo de un canal y retirando la misma cantidad de manojos quemados por el otro extremo. Cada canal que se recambia es previamente seleccionado durante la gestión de combustible para mantener crítico el reactor sin superar los límites de potencia de canal y potencia de manajo dados en el Manual de Políticas y Principios de la Central. Al operar el reactor por un período considerable de tiempo la tasa de recambios alcanza el equilibrio y el núcleo se caracteriza por distribuciones de potencia y de flujo que, promediados en el tiempo, son estacionarios y por el quemado de extracción promedio que también es estacionario.

Los parámetros que caracterizan el núcleo en equilibrio para la operación con los canales Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 sin combustible se estimaron en este trabajo mediante el método Time-Average (TAV) implementado en el código de reactor PUMA, con el que se pueden evaluar esquemas de recambio, i.e., la cantidad de manojos que se introducen en el núcleo en cada operación de recambio y diseñar la estrategia de recambio de combustible, es decir, la forma y quemado medio de extracción de las zonas de quemado del núcleo¹.

El método TAV determina, mediante un procedimiento iterativo, el quemado de entrada (q_e) y el de salida (q_s) de cada manajo y las distribuciones de flujo y potencia son calculadas asumiendo secciones eficaces macroscópicas integradas ($\bar{\Sigma}$) para la celda de combustible determinadas con la fórmula:

$$\bar{\Sigma} = \frac{1}{q_s - q_e} \int_{q_e}^{q_s} \Sigma(q) dq \quad (1)$$

donde $\Sigma(q)$ es la sección eficaz macroscópica en función del quemado q para la celda que se calculó con el código de celda WIMS-D versión 5. Para los canales sin combustible se utilizaron, como ya se mencionó, secciones eficaces macroscópicas calculadas con el código DRAGON.

El criterio adoptado para el diseño de la estrategia para la operación con canales sin combustible consistió en modificar las zonas de quemado del núcleo y sus quemados promedio de extracción de modo que el factor de multiplicación efectivo (k-efectivo) difiera en menos de 10 pcm, las potencias de canal en menos de 3% y los flujos relativos² por zona del control espacial en menos de 1,5 % respecto de sus valores de referencia (obtenidos en la configuración con todos los canales con combustible). Estas variaciones se encuentran dentro

¹ Los canales combustibles se agrupan en zonas cuyo quemado promedio de extracción se fija en la estrategia de recambio de combustible con el objeto de aplanar el perfil de flujo neutrónico.

² El flujo térmico promediado en la zona considerada dividido el flujo térmico promediado sobre todo el núcleo.

de los límites de operación aceptables en la planta, incluso para situaciones operativas no nominales (por ejemplo, con uno o más bancos de barras ajustadoras extraídos).

La metodología para el diseño de la estrategia de recambio para la operación con canales sin combustible se esquematiza en la [Figura 6](#). El proceso se inicia con la simulación del núcleo de equilibrio para una estrategia dada y la comparación del k-efectivo, las potencias de canal y los flujos relativos por zona del control espacial con los valores de referencia. Si no cumplen el criterio adoptado para el diseño, se modifica la estrategia cambiando las zonas de quemado y/o los quemados de extracción de cada zona y se comparan los resultados de la simulación del núcleo en equilibrio para la estrategia modificada con los valores de referencia. Esto se repite hasta que se cumple el criterio de diseño de la estrategia.

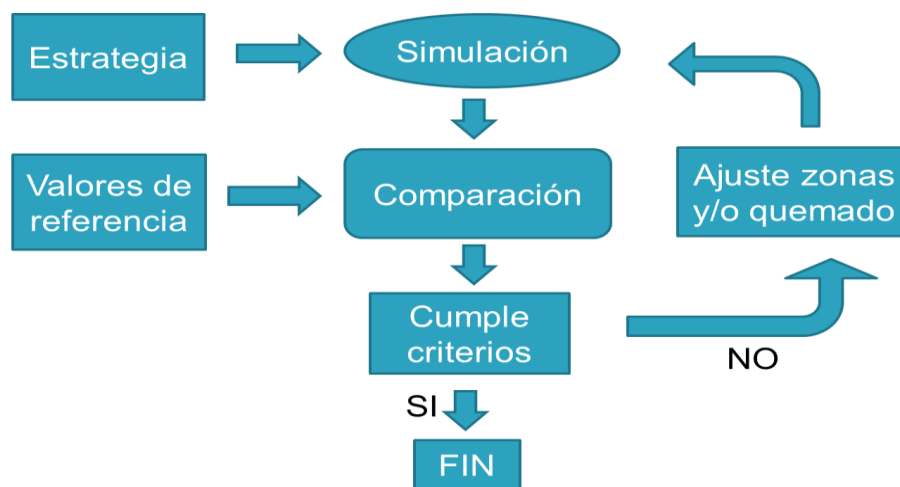


Figura 6: Diagrama de flujo que describe la metodología para el diseño de la estrategia de recambio para la operación con canales sin combustible.

Las potencias de canal se compararon con sus valores de referencia usando la fórmula:

$$DifCan(i) = 100 \frac{PotCan(i) - PotRefCan(i)}{PotRefCan(i)} \quad (2)$$

donde $PotCan(i)$ es la potencia de canal obtenida para el i -ésimo canal, $PotRefCan(i)$ es la potencia de referencia y $DifCan(i)$ es la diferencia porcentual. Las diferencias porcentuales entre los flujos térmicos relativos por zona del control espacial y sus valores de referencia se determinaron con una fórmula análoga.

En todos los cálculos con PUMA-4 se utilizó la opción TAV, con un esquema de recambios de combustible bidireccional³ de 8 manojos por recambio y se supuso que el nivel de llenado de las 14 zonas líquidas (ZL) del sistema de regulación espacial de la central es el nominal.

Los valores de referencia se determinaron en cálculos TAV con todos los canales con combustible y a una potencia del 100 %PP (2015 MW) en el caso del k-efectivo y los flujos relativos, mientras que en el caso de la potencia de canal se calcularon al 97 %PP (1955 MW) que es la máxima potencia a la que se espera operar el reactor. La estrategia de recambio de combustible para la operación con todos los canales con combustible consta de 2 zonas de quemado como se muestra en la [Figura 7](#). Los quemados de extracción de las zonas y el quemado de extracción del núcleo para esta estrategia se muestran en la [Tabla 1](#).

En la simulación al 100 %PP se obtuvo el factor de multiplicación efectivo 0,99491 y los flujos térmicos relativos por zona del control espacial que se muestran en la [Tabla 2](#).

³ En el esquema bidireccional los canales adyacentes se recambian en sentido opuesto.

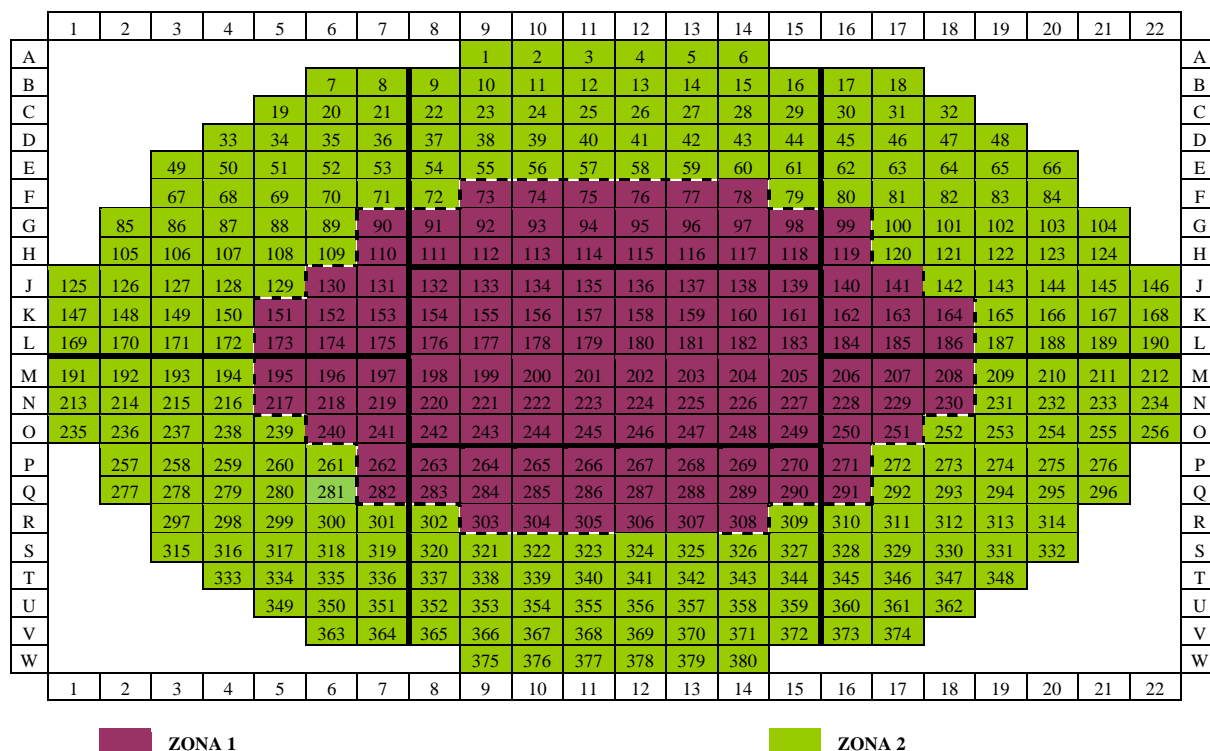


Figura 7: Distribución de canales en 2 zonas de quemado para la estrategia de recambio con todos los canales cargados con combustible.

| CASO | 100 %PP | 97 %PP |
|---------|---------------|---------------|
| Zona 1 | 6984,0 MWd/tU | 7040,0 MWd/tU |
| Zona 2 | 7890,0 MWd/tU | 7953,0 MWd/tU |
| Q. Ext. | 7332,6 MWd/tU | 7391,1 MWd/tU |

Tabla 1: Quemados de extracción para la estrategia de recambio de combustible de 2 zonas de quemado y los 380 canales con combustible.

| ZONA 1 | ZONA 2 | ZONA 3 | ZONA 4 | ZONA 5 | ZONA 6 | ZONA 7 |
|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0,9465 | 0,9558 | 1,0075 | 1,1925 | 1,0114 | 0,9464 | 0,9558 |
| ZONA 8 | ZONA 9 | ZONA 10 | ZONA 11 | ZONA 12 | ZONA 13 | ZONA 14 |
| 0,9478 | 0,9514 | 1,0096 | 1,1917 | 1,0073 | 0,9478 | 0,9511 |

Tabla 2: Flujo térmico relativo en las zonas del control espacial obtenido en la simulación al 100 %PP.

Con la metodología de diseño mencionada previamente se obtuvo para la operación de la central con los canales Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 sin combustible una estrategia de recambio con 3 zonas de quemado como se muestra en la Figura 8. El quemado de extracción de cada zona y el quemado de extracción del núcleo se muestran en la Tabla 3.

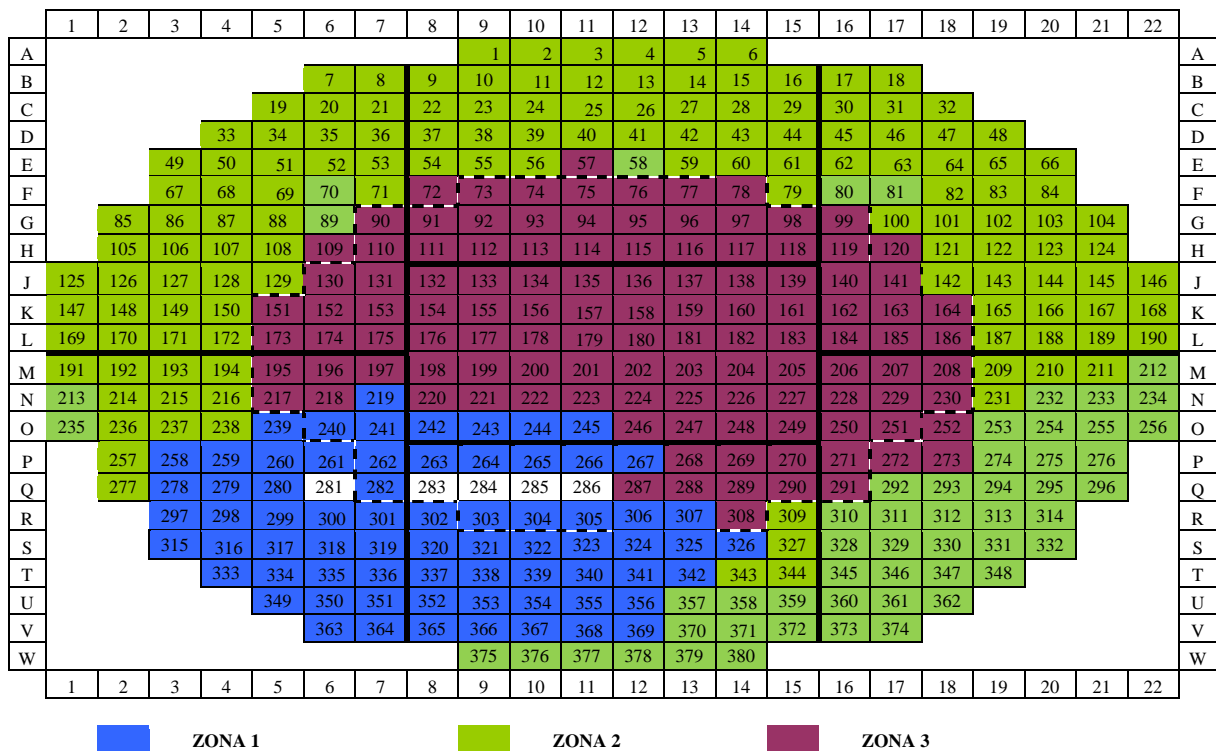


Figura 8: Distribución de canales en 3 zonas de quemado para la configuración con los canales Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 sin combustible.

Las diferencias porcentuales respecto de los valores de referencia en las potencias de canal correspondientes a la estrategia de recambio con 3 zonas para la operación con canales sin combustible se muestran en la Figura 9; y en la Tabla 4 se muestra el flujo relativo obtenido para esta estrategia y la diferencia porcentual respecto del valor de referencia.

En la Tabla 5 se muestra el incremento porcentual de la máxima potencia de canal y la máxima potencia de manejo y los máximos incrementos porcentuales de la potencia de canal y la potencia de manejo respecto del valor de referencia.

| CASO | Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 sin combustible |
|--------|--|
| Zona 1 | 6440,0 MWd/tU |
| Zona 2 | 7025,0 MWd/tU |
| Zona 3 | 7885,0 MWd/tU |
| Q. Ext | 7184,7 MWd/tU |

Tabla 3: Quemado de extracción del núcleo y quemado de extracción por zona para la estrategia de recambio para la operación con canales vacíos.

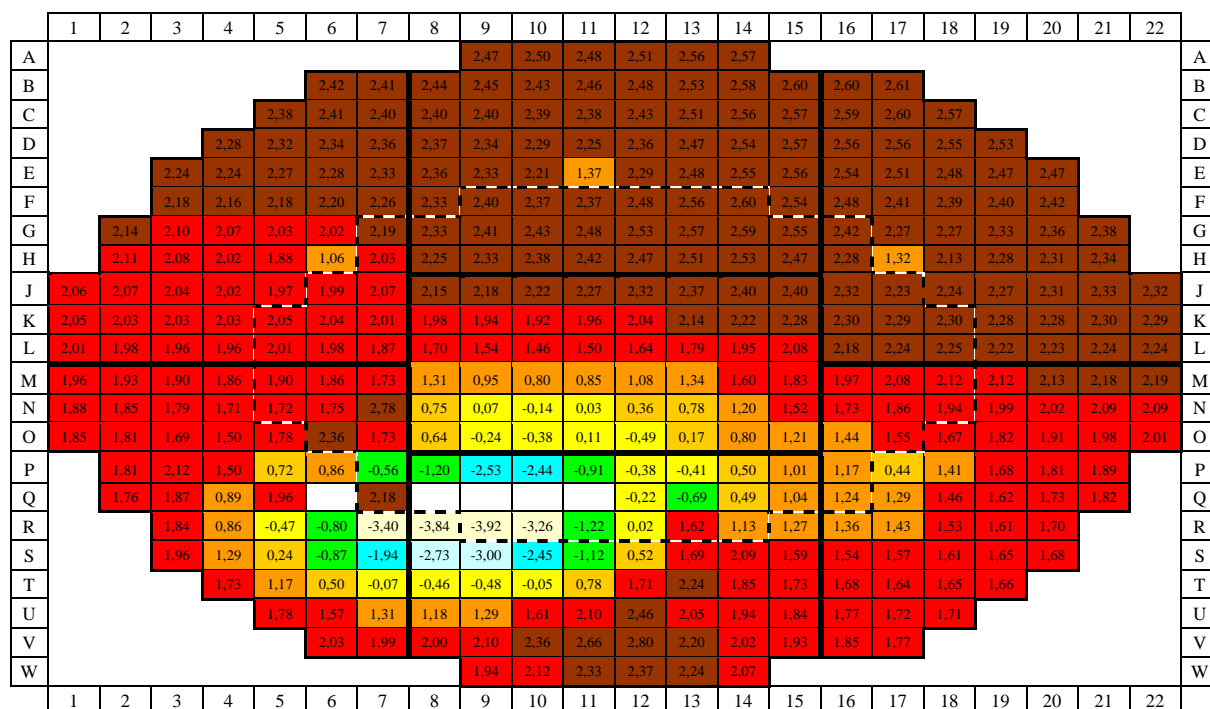


Figura 9: Diferencias porcentuales [%] entre las potencias de canal del caso con los canales sin combustible y estrategia de 3 zonas respecto del caso de referencia.

| | | | | | | | |
|-----------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| FLUJO RELATIVO | ZONA 1 | ZONA 2 | ZONA 3 | ZONA 4 | ZONA 5 | ZONA 6 | ZONA 7 |
| | 0,9476 | 0,9583 | 1,0112 | 1,1836 | 1,0155 | 0,9498 | 0,9525 |
| | ZONA 8 | ZONA 9 | ZONA 10 | ZONA 11 | ZONA 12 | ZONA 13 | ZONA 14 |
| | 0,9484 | 0,9444 | 1,0143 | 1,1826 | 1,0103 | 0,9507 | 0,9492 |
| DIFERENCIA [%] | ZONA 1 | ZONA 2 | ZONA 3 | ZONA 4 | ZONA 5 | ZONA 6 | ZONA 7 |
| | 0,1 | 0,3 | 0,4 | -0,7 | 0,4 | 0,4 | -0,4 |
| | ZONA 8 | ZONA 9 | ZONA 10 | ZONA 11 | ZONA 12 | ZONA 13 | ZONA 14 |
| | 0,1 | -0,7 | 0,5 | -0,8 | 0,3 | 0,3 | -0,2 |

Tabla 4: Flujo térmico relativo en las zonas del control espacial de la planta para la estrategia de 3 zonas de quemado y diferencia porcentual respecto del valor de referencia.

| | |
|--------------------------|---|
| CASO | Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 sin combustible |
| Inc. % MPC | 2,4 % |
| Inc. % MPM | 1,6 % |
| Máx. Inc. % de PC | 2,8 % V12 |
| Máx. Inc. % de PM | 7,9 % O06-1 |

Tabla 5: Incremento porcentual (Inc. %) de la MPC, MPM y máximos incrementos (Max. Inc.) de la PC y la PM del caso con canales sin combustible respecto del valor de referencia.

6.2 Simulación detallada de la operación

Con el fin de caracterizar la transición entre cada configuración con cierto número de canales vacíos y el estado de equilibrio de la siguiente configuración, representado por su correspondiente cálculo Time-Average, se simuló la operación del reactor en forma estacionaria para núcleos con 2, 3 y 5 canales vacíos incluyendo la irradiación del combustible, las operaciones de recambio y la acción de los mecanismos de control de reactividad, es decir, controladores de agua liviana Villar J., 2011. La duración de cada período analizado fue de al menos 50 días efectivos a plena potencia, y para el comienzo de cada uno de dichos períodos se adoptó la composición material (distribución de quemado por elemento combustible) obtenida del cálculo oficial de Gestión de Combustible de CNE correspondiente a un instante determinado en la operación de la planta seleccionado apropiadamente.

Se consideraron las siguientes configuraciones:

- Q06 y Q10 vacíos
- Q06, Q08 y Q09 vacíos
- Q06, Q08, Q09, Q10 y Q16 vacíos
- Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 vacíos

Los cálculos fueron realizados con el código PUMA y el modelo de reactor descrito en la sección 3.3, incluyendo las opciones de GESTION DE COMBUSTIBLE y AJUSTE DE ZONAS LIQUIDAS para simular el control tanto de la reactividad del núcleo como de la distribución de potencia en él. Los criterios básicos del cálculo fueron:

- a. mantener un exceso de reactividad del núcleo dado por el rango de 40 a 45% en el nivel promedio de los 14 controladores zonales
- b. mantener la distribución de potencia dentro del perfil estacionario
- c. seleccionar los canales a recambiar en base a lo establecido en el procedimiento de planta, esto es, en término de sus quemados promedio de extracción por 8 manojos, de las potencias de canal y manajo locales y de la separación en tiempo respecto de combustible fresco en canales vecinos

Se obtuvo en todos los casos simulados un nivel de criticidad con una precisión de aproximadamente 1% en nivel promedio de zona líquida. Esto se logró a costa de incrementar el consumo diario promedio de combustible durante los períodos de transición hasta un 5% por encima del valor correspondiente al núcleo completo afectando esto al quemado de salida en las regiones del reactor cercanas a los canales vaciados.

Las predicciones sobre máximas potencias de canal y manajo en el núcleo luego de vaciar un canal no indicaron, en general, un cambio brusco, sino más bien un leve incremento en los primeros días luego del vaciado y, a largo plazo, una curva de frecuencia de ocurrencia volcada hacia valores mayores que los obtenidos para un núcleo con 380 canales combustibles aunque aun lejos de los límites admitidos para la operación, como puede verse en la Figura 10 y la Figura 11.

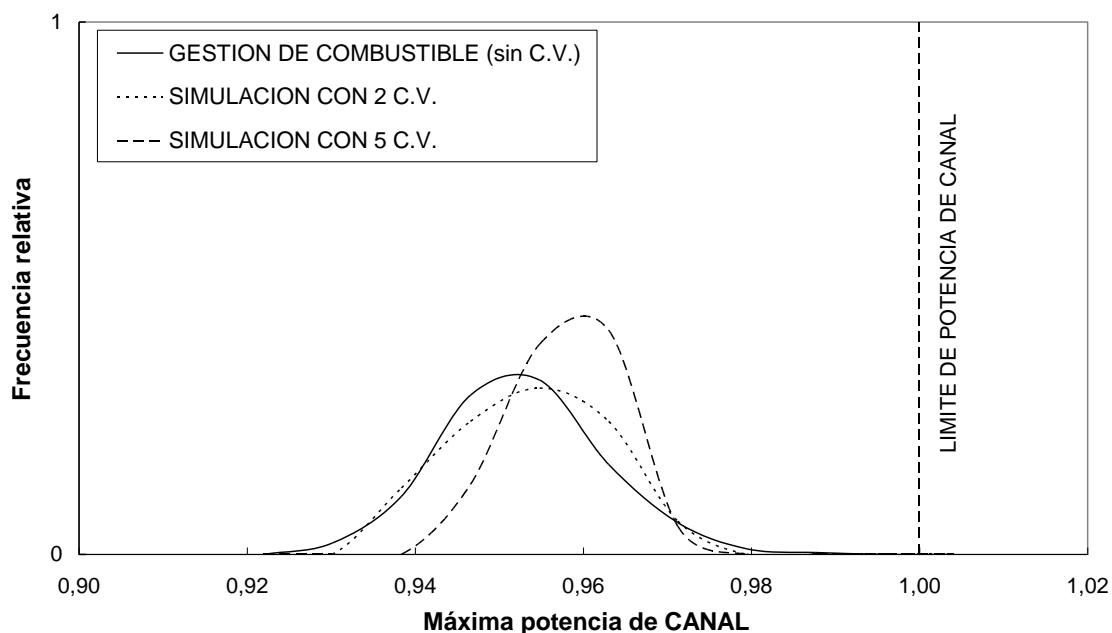


Figura 10: Frecuencia de ocurrencia de la máxima potencia de canal relativa al límite de operación

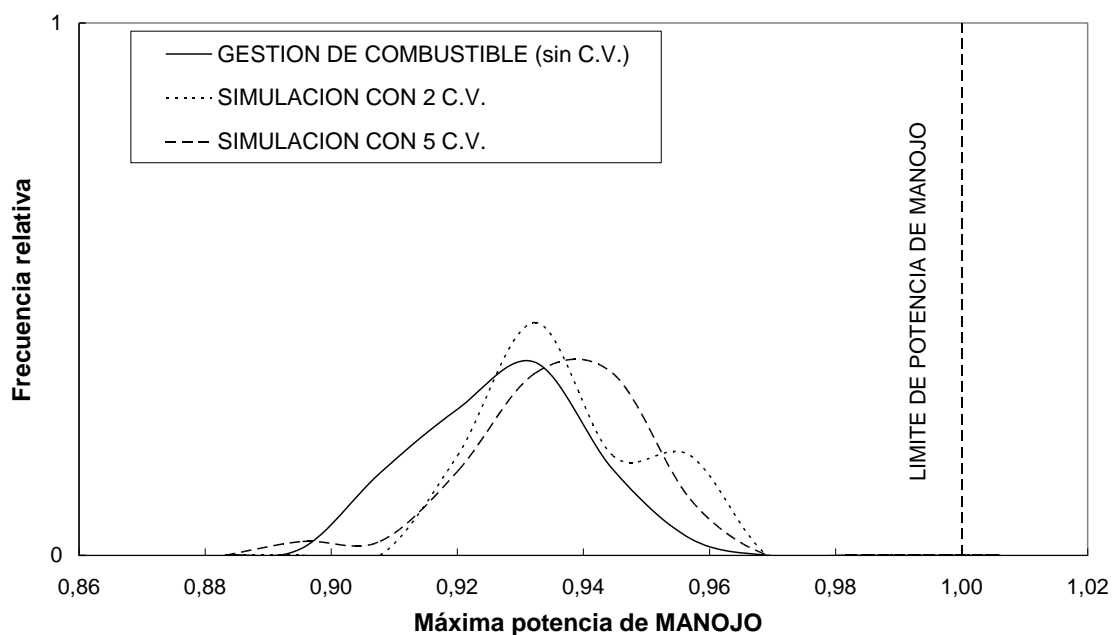


Figura 11: Frecuencia de ocurrencia de la máxima potencia de manejojo relativa al límite de operación

Dado que se supuso operación en configuración nominal, es decir, con las barras de cobalto insertadas y las barras absorbedoras extraídas, la reactividad del núcleo fue controlada mediante recambios con combustible fresco y cambios de nivel de los controladores zonales. De acuerdo a lo predicho por los cálculos Time Average, se requirió ocasionalmente recambiar combustible con quemado de extracción inferior al nominal en las regiones de control cercanas a los canales vacíos para mantener el nivel de los respectivos controladores en rango. Sin embargo, dada la limitada extensión de la simulación, dicha práctica no se tornó

rutinaria en las regiones mencionadas del reactor.

Por último, el cambio en la distribución de potencia en cada configuración con canales vacíos no afectó la probabilidad de fallas por rampas de potencia estimada según metodología estándar para los reactores CANDU.

7 MEDICIONES DESPUÉS DEL ARRANQUE

La metodología empleada en CNE para validar los cálculos de difusión del modelo de reactor consiste en la comparación entre el flujo térmico en la posición de los detectores de vanadio y las señales de dichos dispositivos, expresado a través de una diferencia cuadrática media. Este parámetro refleja la precisión del cálculo de Gestión de Combustible para predecir la distribución de flujo y potencia y por tanto es el observable apropiado para comparar la performance del modelo con canales vacíos en relación a aquella relativa al modelo de núcleo completo. El comportamiento del parámetro mencionado con el cambio de modelo se aprecia en la [Figura 12](#) y es atribuido al refinamiento del mallado geométrico, al modelado de los canales vacíos y a la falta de optimización en las propiedades materiales de los mecanismos de reactividad y estructurales respecto del modelo anterior (en color celeste en el gráfico). No obstante, el incremento en aproximadamente 0,5% se considera aceptable.

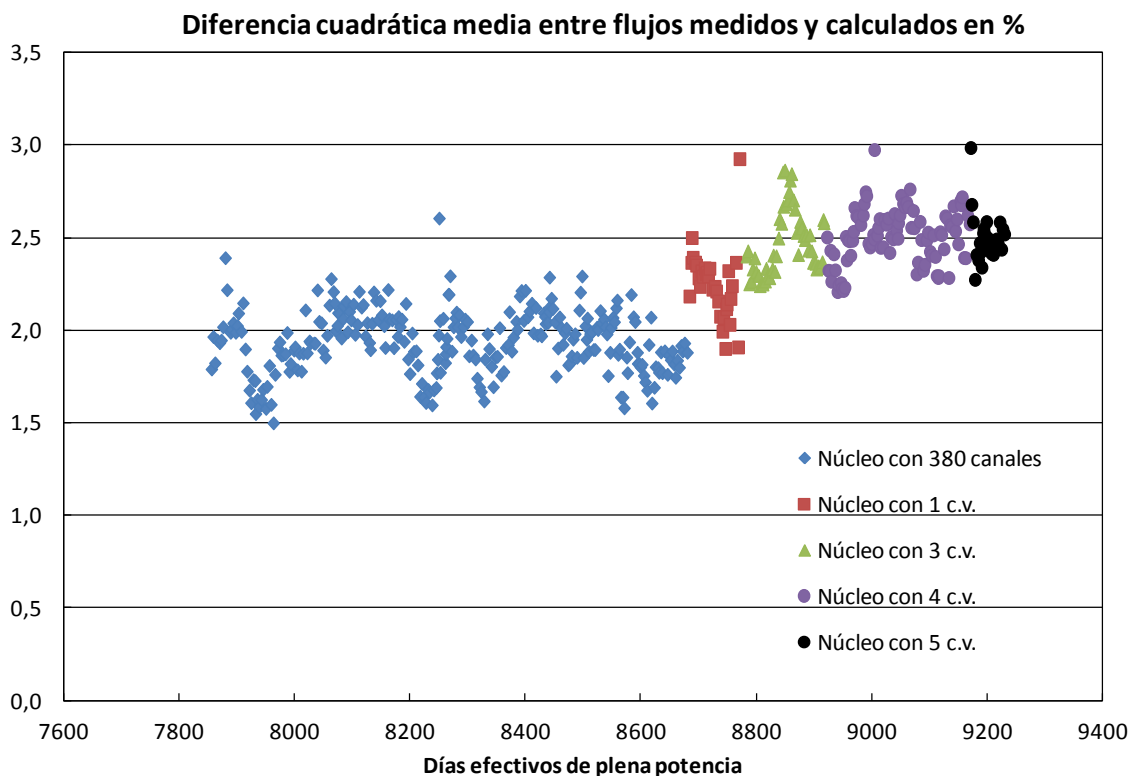


Figura 12: Evolución de la diferencia entre mediciones de flujo térmico y cálculos de difusión debida al cambio en el modelo de reactor utilizado para el cálculo de la Gestión de Combustible en CNE

Por otra parte, la ocurrencia de potencias máximas mayores al operar con canales vacíos se muestra debajo en la [Figura 13](#) y la [Figura 14](#), donde se han graficado resultados del cálculo de la Gestión de Combustible con diferente número de canales vacíos y normalizados todos al 100% de plena potencia además de las curvas ya exhibidas en la [Figura 10](#) y la [Figura 11](#). Si bien no se alcanzó el valor máximo admisible se aprecia que el margen al mismo se redujo

debido a que la curva con canales vacíos se halla desplazada ligeramente hacia valores mayores de potencias máximas. Cabe aclarar que no se ha operado al 100%PP desde el vaciado del primer canal, que la potencia de operación estacionaria ha sido de 83%PP y que en contadas oportunidades, por breves períodos de tiempo y con el fin de responder a picos de demanda energética, se ha subido hasta 97%PP.

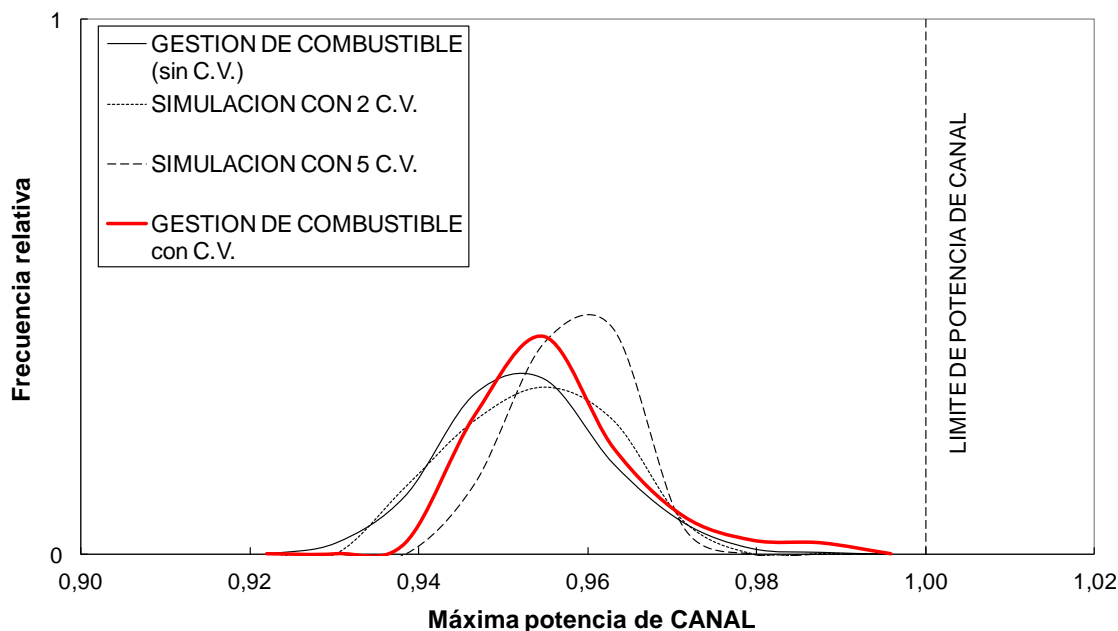


Figura 13: Idem Figura 10, incluyendo la estadística realizada sobre 197 casos de Gestión de Combustible con canales vacíos

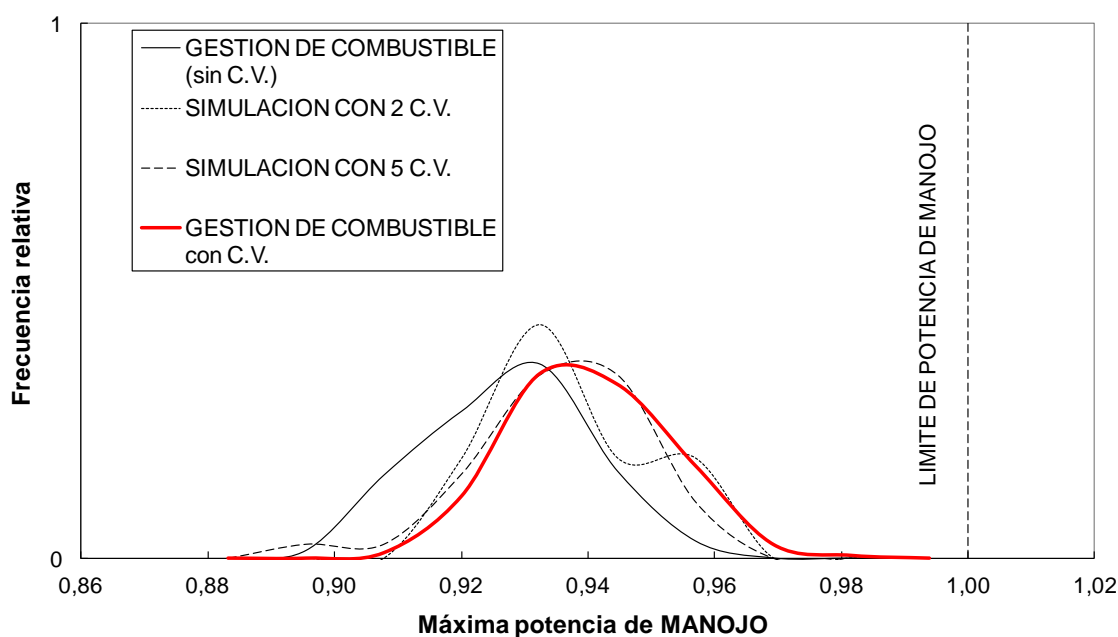


Figura 14: Idem Figura 11, incluyendo la estadística realizada sobre 197 casos de Gestión de Combustible con canales vacíos

Por último y si bien no se contempló en los estudios previos, se realizó un análisis del

comportamiento de las variables utilizadas por la computadora de planta para controlar la distribución de potencia térmica, antes y durante la operación con canales vacíos, con el objeto de verificar que dicha función no se vio alterada por las sucesivas configuraciones de canales vacíos [Gonzalez I., Villar J., Rabiti A., 2012](#). Se consideraron para dicho análisis:

- un muestreo diario de los errores de potencia zonal desde el año 2009 hasta el 2014, para identificar comportamientos en períodos largos y desviaciones no esperadas
- un muestreo cada 30 minutos del cociente entre el flujo promedio por debajo y por encima de la fila donde se ubican los canales vacíos, a lo largo de un par de días con el fin de buscar indicios de fluctuaciones de potencia en dirección vertical debidas a oscilaciones en el xenón-135 no amortiguadas por el control
- un muestreo cada 5 segundos de los errores de potencia zonal, para evaluar en forma instantánea cambios en el rango de variación de dichos parámetros en los diversos períodos de operación de la planta y en cercanía temporal con operaciones de recambio

No se halló comportamiento anormal en ninguna de las variables mencionadas ni se observaron indicios de deficiencia en el control de perturbaciones que pudieran causar potencialmente oscilaciones de flujo inducidas por la variación en la concentración de Xe¹³⁵.

8 CONCLUSIONES

Con el fin de evaluar la factibilidad de operación con canales vacíos en la CNE, se actualizó el modelo de reactor utilizado en los cálculos de difusión, se estudiaron nuevas estrategias de recambio con el fin de preservar la forma de flujo neutrónico y las potencias máximas de operación y se simuló la operación estacionaria del reactor para verificar la no superación de máximas potencias y evaluar la influencia de la nueva configuración de canales sobre la regulación de potencia.

El modelo de reactor -implementado en el código PUMA con constantes obtenidas a partir de cálculos de celda y supercelda realizados con WIMS y DRAGON respectivamente- fue contrastado contra el código MCNP, comparando las distribuciones de potencias con y sin canales vacíos. Así se concluyó la validez del modelado en PUMA de los canales vacíos, ya que las diferencias en las potencias de canal son aceptables, y aquél sobreestima las potencias de canal y de manojo vecinas a los canales sin combustibles.

Del estudio de las nuevas estrategias de recambio se concluye que es posible mantener la distribución estacionaria de potencia modificando la distribución de quemados. En efecto, se obtuvo, para una estrategia de 3 zonas de quemado que el apartamiento de la distribución de potencia de canal de su valor de referencia es menor al 2,8 % en todos los canales del núcleo y se encuentra dentro de los límites aceptables en la planta. La máxima potencia de canal y la máxima potencia de manojo se incrementan respecto de los valores máximos de referencia en sólo 2,4 % y 1,6 % respectivamente y además no superan los valores del caso al 100 %PP. Además, los flujos térmicos relativos en la mayoría de las zonas del control espacial del núcleo están próximos (difieren en menos del 0,8 %) a su valor de referencia y las diferencias son suficientemente pequeñas como para concluir que las zonas líquidas tienen niveles medios adecuados para absorber las fluctuaciones de flujo que ocurren en la planta como resultado de recambios de combustible, oscilaciones de xenón u otras situaciones operativas ([Fernández G., 2012](#)).

El núcleo de equilibrio para la configuración con los canales Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 tiene una pérdida de quemado de extracción de tan sólo 2,0 % respecto del valor de referencia al 100 %PP lo que implica que se tendrá un leve aumento en el consumo de combustible de la planta.

Finalmente, la simulación de operación estacionaria del núcleo confirma la tendencia de los resultados obtenidos con los cálculos de núcleo en equilibrio tanto en lo que respecta al

quemado medio de extracción del combustible como al incremento en las potencias de canal y manajo y el rango de nivel de los controladores zonales, reforzando la afirmación de que es factible operar el reactor con canales vacíos. Adicionalmente, se incluyó a modo de verificación los resultados de las comparaciones con flujos térmicos llevadas a cabo en la planta durante la operación en las condiciones mencionadas, las estadísticas del cálculo de Gestión de Combustible relacionadas con la potencia y las verificaciones realizadas sobre la performance del sistema de regulación de potencia del reactor.

REFERENCIAS

- Fernández, G., CNE: Estudios neutrónicos de estrategias de recambio de combustible para la operación con los canales Q06, Q08, Q09, Q10 y Q16 sin combustible, *Nucleoeléctrica Argentina S.A.*, Informe Técnico IT-FA/08/2012, 2012.
- González I., Villar J., Rabiti A., Análisis del Comportamiento del Control de Potencia del Reactor con los Canales Q06, Q08 y Q09 sin Combustibles, ... Q06, Q08, Q09 y Q10 sin Combustibles y ... Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 sin Combustibles, *Central Nuclear Embalse, Nucleoeléctrica Argentina*, Informes técnicos CI-083/12 (2012), CI-2013-014 (2013) y CI-2014-047 (2014).
- Grant, C., PUMA versión 4. Manual del Usuario, *Comisión Nacional de Energía Atómica*, Informe Técnico, 2005.
- Halsall, M. J. et al., WIMSD A Neutronics Code for Standard Lattice Physics Analysis, *NEA Databank*, NEA 1507/02, 1997.
- Higa, M., Fink, J. M., Factibilidad del uso de uranio levemente enriquecido en la CNE. Parte II: Cálculos de mecanismos de reactividad y reactor para un enriquecimiento de 0.9%, *Comisión Nacional de Energía Atómica*, Informe Técnico IT 1020/94, 1994.
- Higa, M., SOR and MCA Incremental Cross-sections Calculation Using DRAGON for the Embalse Reactor, *Nucleoeléctrica Argentina S. A.*, Informe Técnico IT-FN/01/010, 2001.
- Leszczynski, F., Lopez Aldama, D., y Trkov A. (Editors), WIMS-D Library Update: Final Report of a Coordinated Research Project, *IAEA*, STI/PUB/1264, 2007.
- Marleau, G., DRAGON theory manual. Part 1: Collision Probability Calculations, *Technical Report IGE-236 Revision 1*, 2001.
- Marleau, G., Herbert, A., and Roy, R., A User Guide for DRAGON. Version DRAGON_000331 Release 3.04, *University of Montreal*, Technical Report IGE-174 Rev.5, 2000.
- Marleau, G., Herbert, A., and Roy, R., A user guide for DRAGON. Version DRAGON_000331 Release 3.04, *Ecole Polytechnique de Montréal*, Technical Report IGE-174 Rev.12, 2013.
- Mollerach, R., Incremental Cross-sections Calculations for the Embalse Cobalt Adjuster Rods for NU and SEU Fuel Using DRAGON, *Nucleoeléctrica Argentina S. A.*, Informe Técnico IT-FN/02/002, 2002.
- Roy, R., Hébert, A., and Marleau, G., A Transport Method for Treating Three Dimensional Lattices of Heterogeneous Cells, *Nuclear Science and Engineering*, 101:217-225, 1989.
- Roy, R., Marleau, G., Tajmouati, J., and Rozon, D., Modelling of CANDU Reactivity Control Devices with the Lattice Code DRAGON, *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 21, N° 2: 115-132, 1994.
- Shen, W., Calculation of the Pt-Lepreau Device Properties with DRAGON (Revision 0), *AECL*, Technical Note FFC-RCP-34 Rev.0, 1999.
- Villar, J., Implementation of an Embalse Detailed PUMA Core Model for Slightly Enriched Uranium Fuel Reactor Physics Calculations, *Nucleoeléctrica Argentina*, Informe Técnico IT-FN/01/009, 2001.

Villar, J., Simulación de la gestión de combustible de un núcleo con los canales Q06 y Q10 sin combustible, ... Q06, Q08 y Q09 sin combustible, ... Q06, Q08, Q09, Q10 y Q16 sin combustible y ... Q06, Q08, Q09, Q10 y Q11 sin combustible, *Central Nuclear Embalse, Nucleoeléctrica Argentina*, Informes técnicos *CI-130/11* (2011), *CI-2012-019* (2012), *CI-2012-085* (2012) y *CI-2013-075* (2013).

X-5 Monte Carlo Team, MCNP, A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 5, *Oak Ridge*, 2003.