

DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE RECAMBIO DE COMBUSTIBLE PARA EL NÚCLEO DE 241 CANALES DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA 1

Daniel O. Roqueta

*Div. Estudios Neutrónicos de Seguridad, Depto. Física y Análisis,
Subgca. Diseño del Núcleo y Dinámica de Planta, Gcia. Análisis de Seguridad y Diseño del Núcleo,
Unidad de Gestión Proyectos Nucleares, Nucleoeléctrica Argentina S.A.; Edificio Nodus San Rafael,
Francisco Narciso de Laprida 3175, (B1603AAA) Villa Martelli, Argentina;
droqueta@na-sa.com.ar; <http://www.na-sa.com.ar>*

Palabras clave: CNA1, PUMA, estrategia de recambio, Time Average, simulación detallada.

Resumen. En el núcleo de la Central Nuclear Atucha 1 (253 canales) se plantea dejar sin elementos combustibles los 12 canales más externos para reducir el flujo neutrónico en el recipiente de presión. Esta reducción del número de elementos combustibles disminuye los márgenes a las potencias límites de canal si se continúa operando a plena potencia. El método Time-Average incorporado como módulo del código de reactor PUMA-4 permitió hallar una estrategia de recambio de combustible con márgenes promedio superiores al 4%. El programa REC_AUT (versión para CNA1) permitió llevar a cabo una simulación detallada de 984 recambios abarcando 4 años de plena potencia con un algoritmo simple de selección de recambios que confirmó la factibilidad de la estrategia. Se presenta la estrategia seleccionada y los resultados de la simulación detallada.

1 INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear Atucha Unidad 1 (CNA1) es una central de generación de energía eléctrica de 362 MWe (1179 MWt) que emplea combustible de dióxido de uranio (UO_2) con uranio levemente enriquecido (ULE) al 0,85%. El reactor es del tipo Pressurized Heavy-Water Reactor (PHWR) de vasija de presión, con 253 canales verticales a los que se recambia combustible en operación. El refrigerante circula por los canales en dirección ascendente; el moderador rodea a los canales, a la presión del refrigerante. Restrictores de caudal a las entradas de los canales dividen el núcleo en 8 zonas hidráulicas (ZZ.HH.) numeradas en orden creciente de la periferia hacia el centro, de la Z.H.1 (canales más externos, máxima restricción de caudal) a la Z.H.8 (canales centrales, caudal sin restricción). La **Figura 1** muestra la distribución de los canales (vista en planta) con la asignación de ZZ.HH., y las trazas de las barras de control dentro del núcleo en inserción nominal; la grilla subyacente indica la nomenclatura de identificación de los canales: una letra (A...T) y un número de 2 cifras (01...33). Las barras de control están inclinadas, ingresan desde la periferia por la parte superior presentando un diseño no simétrico (en particular, la barra gris que ingresa entre los canales K03, J02, J04 lo hace con menor inclinación, respecto de la vertical, que las otras del mismo banco).

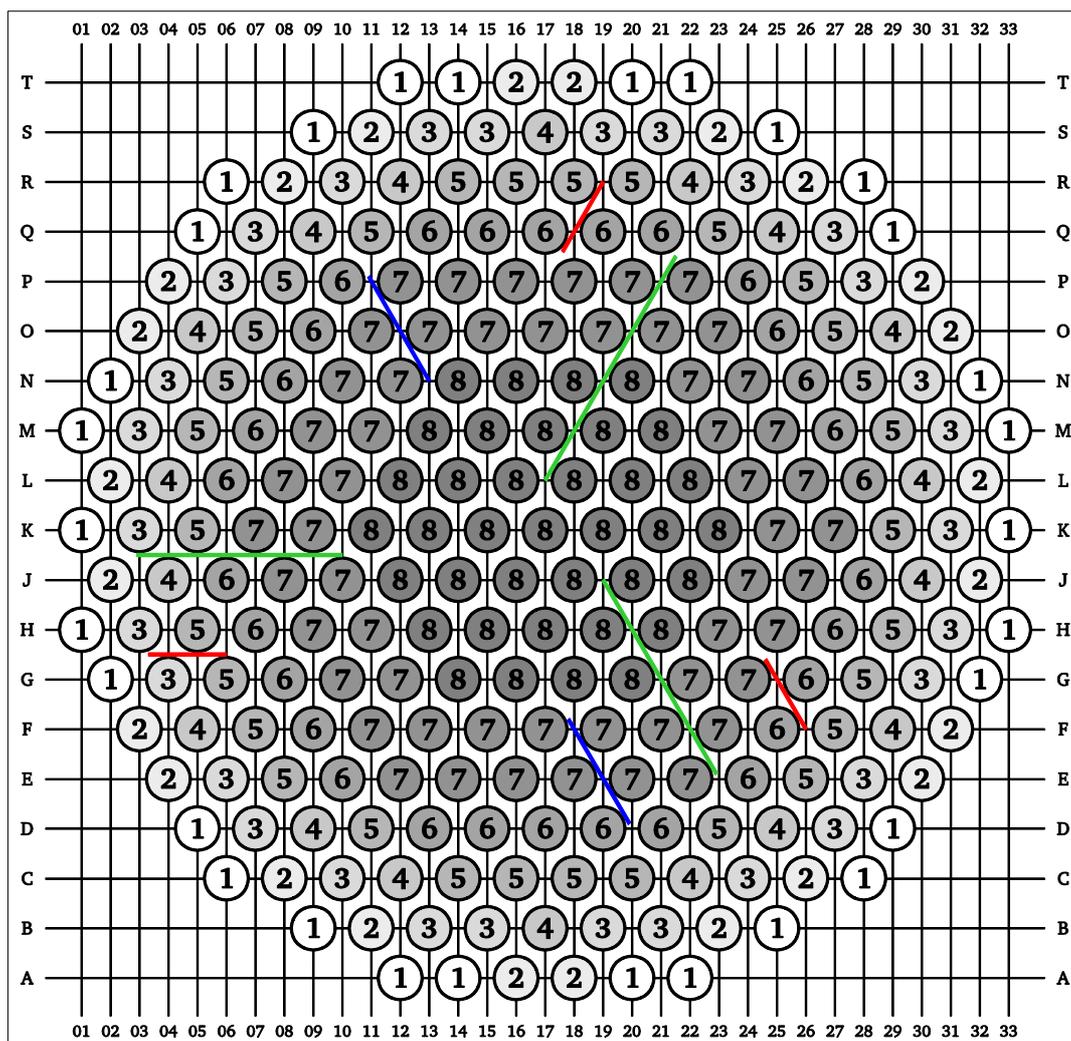


Figura 1: Mapa de Zonas Hidráulicas de CNA1.
Se muestran las barras de control en inserción nominal.

El recambio de combustible en operación permite mantener la reactividad del reactor. En cada recambio se ingresa al núcleo un elemento combustible (E.C.) fresco, se reposicionan algunos EE.CC. dentro del núcleo y se retira del núcleo un E.C. gastado siguiendo una determinada “estrategia de recambio de combustible”; en las condiciones actuales de operación se realizan aproximadamente 2 recambios cada 3 días de plena potencia. La estrategia de recambio de combustible ha de resultar en distribuciones de quemados tales que en ningún canal se supere la potencia límite correspondiente a su Z.H., que en ningún punto de ningún E.C. se supere la máxima potencia lineal admisible, y que los cambios locales de potencia lineal durante un recambio no alcancen condiciones de interacción pastilla-vaina (PCI, por “pellet-cladding interaction”). La actual estrategia de recambio de combustible de la CNA1 organiza a los canales en 2 caminos de irradiación: uno de 4 zonas de quemado (“camino largo”) y otro de 3 zonas de quemado (“camino corto”).

Al momento del inicio de este trabajo el reactor estaba operando rutinariamente con 250 canales, estando sin EE.CC. los canales periféricos R06, M33 y A12. A los fines de reducir el flujo en el recipiente de presión se ha propuesto dejar sin EE.CC. otros 9 canales periféricos (A22, C06, C28, H01, H33, M01, R28, T12 y T22, todos de la zona de egreso del camino de irradiación largo), quedando conformado un núcleo de 241 canales. Mantener al reactor funcionando a 100% de Plena Potencia (100%PP) sin modificar la estrategia de recambio de combustible produce los siguientes efectos: redistribución de la potencia que producían los canales vaciados en los 241 canales restantes (que reduce los márgenes a las potencias límites por Z.H.), reducción de la zona de egreso del camino de irradiación largo (que aumenta el quemado promedio de traslado a esta zona, alterando las potencias generadas en tal zona y en la inmediata anterior), y aumento de las fugas neutrónicas debido a la reducción del tamaño del núcleo (que disminuye el quemado de extracción promedio para compensar la pérdida de reactividad). Por estas razones, es necesario cambiar la estrategia de recambio de EE.CC. para evitar o minimizar la disminución de la potencia de operación.

2 LINEAMIENTOS DEL TRABAJO

El objetivo de este trabajo es hallar una estrategia de recambio para el núcleo de 241 EE.CC. de la CNA1 que permita operar el reactor al 100%PP con márgenes adecuados de potencias de canal y de potencia lineal. El trabajo consta de 2 partes: la aplicación del método Time-Average, que permite analizar distintas estrategias de recambio de EE.CC. y elegir la que se considere más adecuada; y la realización de una simulación detallada de recambios, que permite validar la factibilidad de la estrategia elegida.

3 CÓDIGOS DE CÁLCULO, PROGRAMAS Y MODELOS UTILIZADOS

Se utilizó el código neutrónico de cálculo de reactor PUMA 4.28 (Grant, 2005) tanto para los cálculos estáticos de la simulación detallada como para los cálculos Time-Average. La simulación detallada se efectuó con el programa REC_AUT (Mollerach y Fink, 2010) (versión adaptada a CNA1) de simulación automática de operaciones de recambio. Para la generación de una distribución de quemado inicial para el programa REC_AUT se hizo uso del módulo *gendist* del código DINO (Clavero y Silva, 2016).

El modelo de PUMA empleado para los cálculos estacionarios es el usado actualmente en la CNA1 para la gestión de combustible (Higa, 2008): modelo neutrónico a 2 grupos de energía de reactor completo en geometría cartesiana con corrección por heterogeneidad de celda. La tabla de secciones eficaces de las celdas de combustible fue calculada con el código neutrónico de celda WIMS-D5 (Halsall, 1997) utilizando el modelo de E.C. CNA1 de 37

barras combustibles ULE 0,85% (Villar, 2000) con ^{135}Xe en equilibrio en condiciones nominales de operación a 100%PP, empleando la biblioteca de datos nucleares IAEA.lib (Leszczinsky et al, 2007) a 69 grupos de energía. En los cálculos Time-Average se utilizó la tabla de secciones eficaces integradas en quemado.

Para los cálculos de PUMA se utilizó la configuración nominal de inserciones de barras vigente al momento del inicio de este trabajo, sin simular movimientos de barras que mantengan la criticidad con la evolución del quemado.

El código PUMA utiliza un archivo denominado MAESTRO como base de datos con la definición del modelo y los resultados de los cálculos más recientes.

3.1 Método Time-Average

El método Time-Average (TAV) permite obtener, con un solo cálculo (iterativo) de reactor, parámetros globales del núcleo (como ser el factor de multiplicación efectivo y la correspondiente reactividad, los flujos, las potencias de canal, las potencias lineales, los quemados promedios de traslado y de egreso) similares a los valores promediados en un largo tiempo de operación, para una dada estrategia de recambio. Como es usual en cálculos estáticos, el modelo considerado como mejor aproximación al reactor crítico arroja para el factor de multiplicación efectivo (k_{eff}) un valor no necesariamente unitario que ha de ser tomado como referencia de criticidad para cálculos ulteriores.

Este método está incorporado como módulo del código PUMA. Para el cálculo se debe asignar, a cada canal del reactor, el camino de irradiación y la zona de quemado que le corresponde según la estrategia que se pretende analizar (para los canales que no participen de la estrategia de recambio, cual es el caso de los canales vaciados, debe explicitarse “camino 0, zona 0”). También se debe indicar el quemado de extracción que se propone para cada camino, no siendo obligatorio proponer el mismo quemado de extracción para todos los caminos de irradiación. Los quemados de extracción deben ajustarse para cada estrategia calculada, de manera que el k_{eff} obtenido en cada caso coincida con el que se haya elegido como referencia.

Una vez obtenida la distribución de potencias de canal TAV correspondiente a una dada estrategia propuesta, se calcula para cada canal el margen relativo a la respectiva potencia límite según su zona hidráulica (Z.H.). Idealmente todos los márgenes deberían ser suficientemente amplios como para acomodar las desviaciones respecto de tales valores promedios debidas a las distribuciones de quemado reales a lo largo de la operación, más las fluctuaciones propias de la operación en sí. Márgenes reducidos sugieren la necesidad de tratar a ciertos canales con especial consideración o eventualmente de operar (transitoria o permanentemente) a potencias inferiores a 100%PP. Tales consideraciones no surgen directamente del cálculo TAV sino que requieren de una simulación detallada de gestión. Sí se puede establecer, como criterio de calificación de propuestas de estrategia, la preferencia de aquéllas que presenten un margen mínimo más grande. Debe tenerse en cuenta, empero, que el valor que indique que el margen de un dado canal pueda considerarse adecuado dependerá del camino y zona de quemado a los cuales tal canal haya sido asignado.

3.2 Simulación detallada de gestión

La simulación detallada de gestión se realiza una vez que se ha seleccionado una estrategia de recambio, para evaluar las fluctuaciones de potencias y de quemados respecto de los valores promedios predichos por el cálculo TAV que es esperable encontrar durante una operación a 100%PP por un lapso prolongado aplicando la estrategia elegida; y estimar

cualitativamente la frecuencia con la que puedan ocurrir situaciones excepcionales que requieran un tratamiento especial (e.g. adición de un paso de permutación de canales con EE.CC. que se han quemado más allá de lo previsto por la estrategia, u operación por un lapso limitado a potencias inferiores a 100%PP). La ocurrencia ocasional de tales eventos excepcionales es admisible; la ocurrencia frecuente, por el contrario, indicaría la necesidad de mejorar la estrategia.

La simulación consta de una secuencia de cálculos estacionarios (“casos”) con las correspondientes distribuciones instantáneas de quemado. La evolución del quemado del reactor se evalúa haciendo un seguimiento de la variación del factor de multiplicación efectivo (k_{eff}). A partir del k_{eff} calculado tras un dado recambio se estima la cantidad de días de plena potencia (dpp) a evolucionar hasta que sea necesario un nuevo recambio, y luego se obtienen el k_{eff} resultante tras la evolución y el resultante tras el nuevo recambio, supuesto instantáneo. El promedio de todos los valores de k_{eff} obtenidos a lo largo de la simulación debería aproximarse al valor que se haya elegido como referencia.

Para llevar a cabo la simulación detallada de gestión se utilizó el programa REC_AUT con algunas interrupciones para ajustes manuales. Este programa genera una secuencia de ejecuciones del código PUMA para seleccionar operaciones de recambio y evaluar las evoluciones de quemado de los EE.CC. entre recambios. Cabe mencionar las siguientes características:

- Se debe especificar al programa: la asignación a cada canal del camino y la zona que le corresponde según la estrategia elegida, el valor de k_{eff} a considerar como criterio de recambio, la máxima potencia lineal admisible tras un recambio, el mínimo margen admisible de la potencia de canal para cada Z.H., y el quemado mínimo admisible para traslado de cada zona de quemado.
- Se debe aportar como caso inicial un archivo MAESTRO generado con una distribución de quemados afín a un núcleo de equilibrio para la estrategia elegida.
- Para cada caso, en base al k_{eff} reportado para la instancia previa, el programa REC_AUT decide si ejecutar un “*caso de evolución*” o un “*caso de recambio*”:
 - Caso de evolución: Se ejecuta una corrida de PUMA que evolucione el quemado por el tiempo estimado necesario para alcanzar el criterio de recambio. El programa no efectúa verificaciones de los criterios de aceptación en casos de evolución; si se detectan violaciones de márgenes, queda a criterio del usuario interrumpir la ejecución y modificar manualmente alguna instancia previa, o aceptar condicionalmente la situación con las salvedades correspondientes.
 - Caso de recambio: Se propone una sucesión de recambios posibles según la estrategia de acuerdo a la distribución de quemados del núcleo, priorizando los EE.CC. más quemados de cada zona. Se ejecuta la corrida de PUMA correspondiente a cada recambio propuesto hasta hallar uno que cumpla con todos los criterios de aceptación (límite de potencia lineal, límite de potencia de canal por Z.H., cotas de potencia relativa por sexto).

El programa utiliza un algoritmo simplificado para proponer la sucesión de recambios posibles. Con esto se puede generar en un tiempo de cálculo acotado la simulación de períodos prolongados de operación, con resultados razonables pero optimizables. Es admisible, por tanto, un número limitado de excepciones o desviaciones, en el entendimiento de que la gestión humana del personal de planta evitará o tratará adecuadamente este tipo de situaciones.

Cabe mencionar las siguientes simplificaciones y aproximaciones:

- Las propuestas de recambios se basan sólo en los quemados de los canales involucrados. Existe así la posibilidad de admitir algunos recambios que conduzcan la gestión a eventuales “*callejones sin salida*”. La alternativa humana aplicará criterios de análisis global del núcleo con previsión de recambios futuros.
- Para los canales cuyos EE.CC. superan el quemado previsto de la zona correspondiente se aplica una “*rezonificación transitoria*” a la zona de quemado inmediata superior. Esta aproximación tiende a alterar las distribuciones de quemados por zonas previstas por la estrategia, por lo que debe acotarse el número de ocurrencias. La alternativa humana intercalará un paso adicional tal que el E.C. involucrado pase a un canal de la zona siguiente y sea reemplazado (“*permutado*”) por un E.C. de la misma zona.
- El programa no efectúa verificaciones de criterios de aceptación de recambios por condiciones de PCI (Pérez et al., 1995). Éstas deben realizarse con posterioridad a la ejecución. En caso de hallarse violaciones a los criterios de aceptación por condiciones de PCI, queda a criterio del usuario realizar modificaciones adecuadas que eviten el caso y reejecutar la simulación a partir de ese punto, o aceptar condicionalmente la situación con las salvedades correspondientes.

4 DESARROLLO Y RESULTADOS

Se llevó a cabo la siguiente secuencia de cálculos TAV: un cálculo inicial para el núcleo de 250 EE.CC. con la estrategia de recambio actual para determinar el k_{eff} de referencia, seguida de una serie de cálculos para el núcleo de 241 EE.CC. probando diversas estrategias hasta elegir la que mejor se ajusta a criterios.

Una vez elegida la estrategia para el núcleo de 241 EE.CC. se procedió a realizar una simulación detallada de ésta.

4.1 Time-Average, núcleo con 250 EE.CC. (referencia)

Se tomó como referencia el cálculo TAV del núcleo de 250 EE.CC. con la estrategia vigente imponiendo un quemado de extracción de 11140 MWd/tU para ambos caminos de irradiación. Se obtuvo un $k_{\text{eff}} = 0,997266$ y una frecuencia global de 0,659 recambios/dpp o 240,5 recambios/año-pp. Los resultados TAV se resumen en la [Tabla 1](#).

La [Figura 2](#) muestra la estrategia de recambio utilizada (i.e., la asignación de los canales a zonas de quemado por camino de irradiación) y los márgenes de las potencias de canal a las respectivas potencias límites por Z.H. en porcentaje. Pueden destacarse las siguientes observaciones:

- Los canales D11, K29 y Q11 (camino largo, zona 1) presentan márgenes muy bajos.
- Similarmente los canales E14 y L26 y los canales F11 y P14 (camino corto, zona 1). Los canales O11 y J26 (simétricos de los mencionados) presentan mejores márgenes.
- Los canales afectados por la barra gris menos inclinada (e.g. K01) presentan potencias relativamente bajas (i.e. márgenes relativamente altos).
- También los canales P04, O31 y A16 (camino largo, zona 4) presentan potencias relativamente bajas (i.e. márgenes relativamente altos), por pertenecer a la zona de egreso, con quemados relativamente altos.
- Algunos canales ubicados hacia el centro del reactor (camino corto, zona 2) tienden a presentar márgenes reducidos (e.g. J16, H15, K15). Esto se debe a que la barra gris con menor inclinación, con inserción nominal, no llega hasta esta zona.

Camino	Zona	Quem. Trasl. [MWd/tU]		Tpo. de perm. [dpp]
		Ingreso	Egreso	
corto	1	0	4180	133
	2	4180	9480	126
	3	9480	11140	92
largo	1	0	2341	82
	2	2341	5447	99
	3	5447	9766	115
	4	9766	11140	107

Parámetros globales: k_{eff} : 0,997266 (-274,1 pcm)
 Frec. rec. : 0,659 recs./dpp
 240,5 recs./año-pp

Tabla 1: Resultados TAV del caso de referencia con 250 EE.CC.

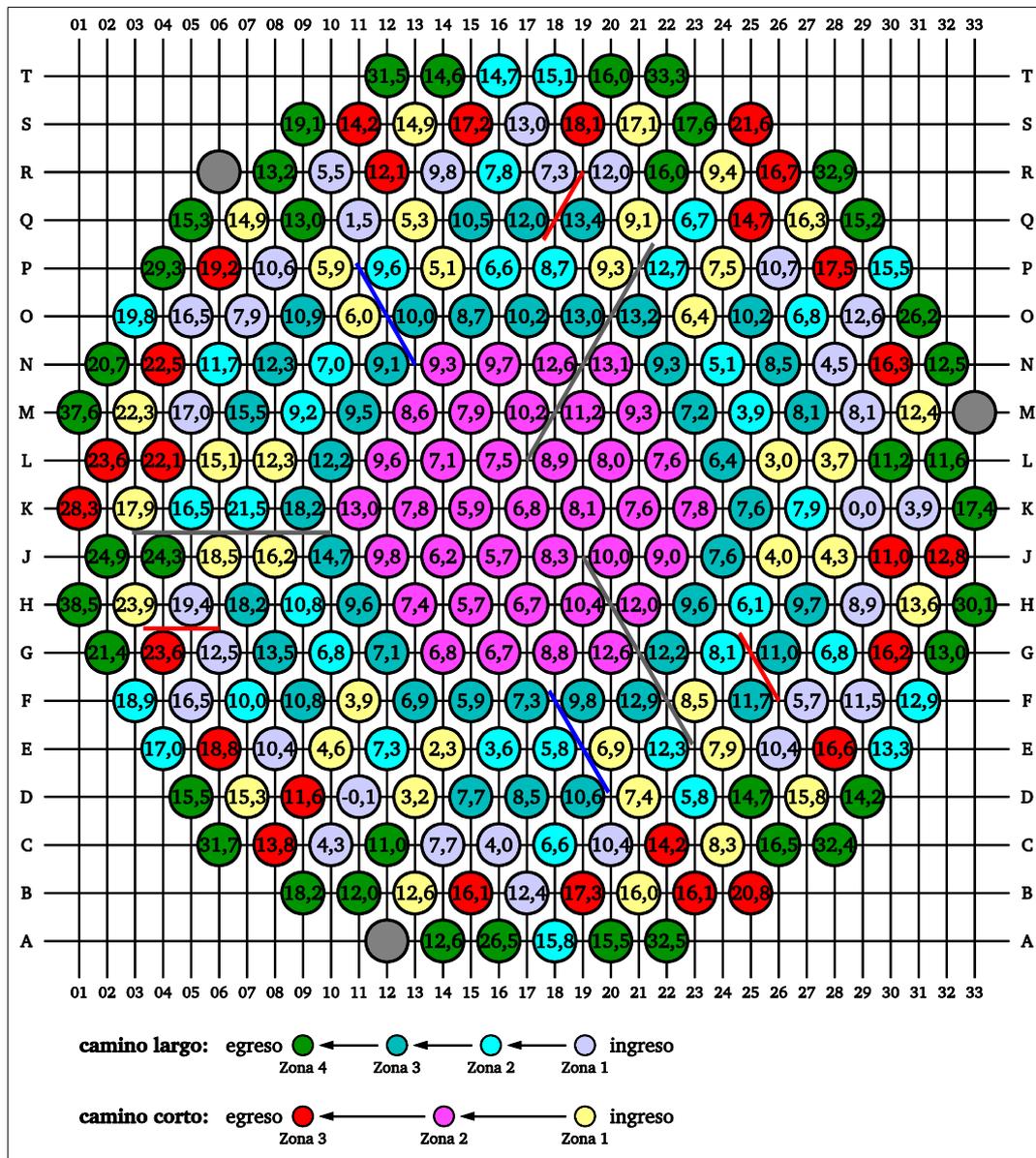


Figura 2: Estrategia de referencia, núcleo de 250 EE.CC. Márgenes de potencia de canal [%].

4.2 Time-Average, núcleo con 241 EE.CC. (estrategia elegida)

Para desarrollar la nueva estrategia para el núcleo de 241 EE.CC. se decidió preservar el esquema de la estrategia original (2 caminos de irradiación: uno largo de 4 zonas y uno corto de 3 zonas; igual quemado de extracción para ambos caminos). La tarea consistió en una sucesión de modificaciones de la distribución en caminos y zonas respecto de la estrategia del núcleo de 250 EE.CC., ajustando en cada cálculo los quemados de extracción hasta ± 1 MWd/tU para repetir aproximadamente el $k_{\text{eff}} = 0,997266$ seleccionado como referencia de criticidad, y verificando en cada caso la existencia de canales con márgenes de potencia problemáticos y/o la existencia de canales con márgenes extremos a los cuales poder redistribuir la potencia. Cabe destacar las siguientes modificaciones:

- Se reubicaron los canales D11, K29 y Q11 (camino largo, zona 1) en la zona 2 para aumentarles el quemado y así reducirles la potencia de canal.
- Similarmente se reubicaron los canales E14 y L26 y los canales F11 y P14 (camino corto, zona 1) en la zona 2 del camino largo para aumentarles el quemado y así reducirles la potencia de canal. Los canales O11 y J26 permanecieron en la zona 1 del camino corto.
- Se realizaron cambios de zona/camino en algunos de los canales afectados por la barra gris menos inclinada (e.g. K03) tendientes a reducir los quemados en ese sector, a fin de mejorar la distribución de potencias (i.e., mejorar los márgenes en otras partes del reactor).
- Similarmente se reubicaron los canales P04, O31 y A16 (camino largo, zona 4) en la zona 2 para reducirles el quemado y así aumentarles la potencia de canal.
- Se reubicaron algunos canales ubicados hacia el centro del reactor (camino corto, zona 2) en la zona 3 del camino largo para aumentarles el quemado y así reducirles la potencia de canal.
- A modo de compensación, el canal K09, el canal G08 y los canales H07, Q19 y F25 (camino largo, zona 3), que presentan márgenes relativamente altos, fueron reubicados en la zona 2 del camino corto.

La **Figura 3** muestra la estrategia obtenida tras estas modificaciones, con los márgenes de potencias de canal resultantes, todos superiores al 4% (margen mínimo: 4,08% en Q11). Los resultados TAV se resumen en la **Tabla 2**: especificando un quemado de extracción de 10965 MWd/tU para ambos caminos de irradiación se obtuvo un $k_{\text{eff}} = 0,997262$ y la frecuencia global de recambios resultó de 0,669 recambios/dpp o 244,4 recambios/año-pp (i.e., la reducción en 175 MWd/tU en el quemado de extracción resultó en un incremento de aproximadamente 4 EE.CC. frescos en el consumo por año de plena potencia respecto de la estrategia de referencia aplicada al núcleo de 250 EE.CC.).

En la **Tabla 3** se comparan los principales resultados de este cálculo TAV con los correspondientes al núcleo de 250 EE.CC. con la estrategia de referencia. Se destacan los márgenes mínimos de las ZZ.HH. 3, 5, 6 y 7 del caso de referencia, cuyos valores están por debajo del 4%. La estrategia elegida para el núcleo de 241 EE.CC. se considera satisfactoria en vista de los márgenes obtenidos.

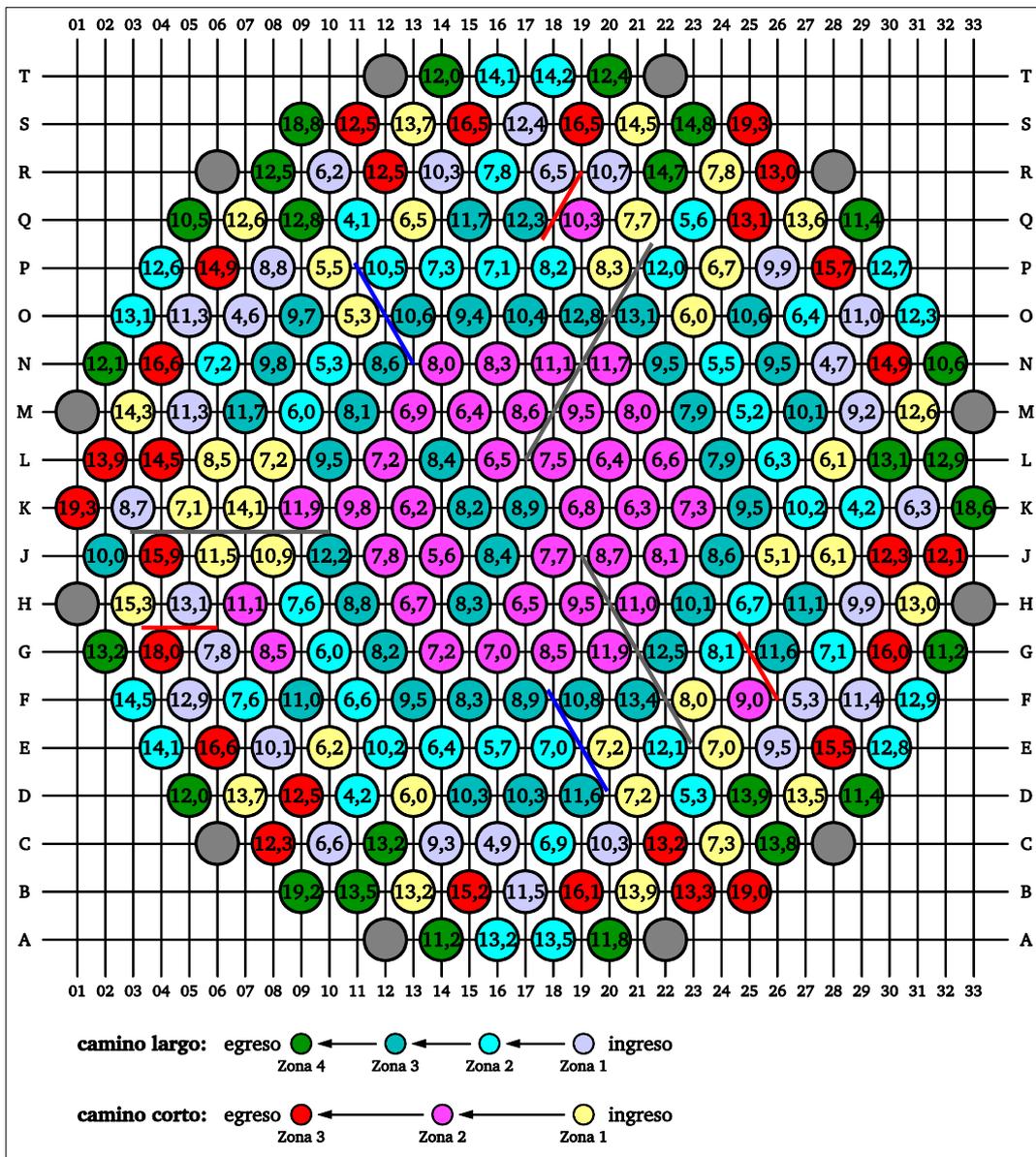


Figura 3: Estrategia elegida, núcleo de 241 EE.CC. Márgenes de potencia de canal [%].

Camino	Zona	Quem. Trasl. [MWd/tU]		Tpo. de perm. [dpp]
		Ingreso	Egreso	
corto	1	0	3866	124
	2	3866	9161	128
	3	9161	10965	97
largo	1	0	2071	74
	2	2071	5720	116
	3	5720	10016	113
	4	10016	10965	66

Parámetros globales: k_{eff} : 0,997262 (-274,5 pcm)
 Frec. rec. : 0,669 recs./dpp
 244,4 recs./año-pp

Tabla 2: Resultados TAV de la estrategia elegida con 241 EE.CC.

Núcleo	k_{eff}	Q_{extr} [MWd/tU]	Frec. Recs. [recs./año-pp]	Mínimo margen por Z.H. [%], canal							
				ZH1	ZH2	ZH3	ZH4	ZH5	ZH6	ZH7	ZH8
250	0,997266	11140	240,5	12,47 N32	11,56 L32	3,87 K31	10,96 C12	-0,11 D11	3,17 D13	2,35 E14	5,69 H15
241	0,997262	10965	244,4	10,49 Q05	10,03 J02	6,19 R10	11,02 O29	4,08 Q11	5,55 P10	5,15 J26	5,58 J14

Tabla 3: Comparación de los principales resultados TAV entre la estrategia de referencia del Núcleo 250 EE.CC. y la nueva estrategia elegida para el Núcleo 241 EE.CC. Se destacan los márgenes menores que 4%.

4.3 Simulación detallada de la estrategia elegida

La distribución de quemado inicial fue generada con el módulo *gendist* del código DINO; tal distribución es afín a la estrategia utilizada pero se considera arbitraria a los fines de la simulación. A esa distribución inicial se la hizo evolucionar 0,7474 dpp (1/2 ciclo de recambio a 0,669 recs./dpp) para definir el “caso 0”.

Al inicio de la simulación se definieron los siguientes criterios:

- Valor de k_{eff} criterio de recambio : 0,996875
- Máxima potencia lineal admisible tras un recambio : 462,645 W/cm
- Máximo lapso a evolucionar : 0,6 dpp
- Ritmo promedio de variación de k_{eff} : -0,6‰ / dpp
- Mínimo lapso a evolucionar : 0,1 dpp
- Mínimo margen de potencia de canal : 1,0% (todas las ZZ.HH.)
- Rango admisible, potencia normalizada por sextos : [0,90 ; 1,10] (todos los sextos)
- Margen de quemado de traslado : 10% (zonas de egreso)
15% (demás zonas)

Se estimó en primera instancia que especificando $k_{eff} < 0,996875$ como criterio de recambio se podría converger en valor medio al $k_{eff} = 0,997262$ resultante del cálculo TAV. A partir del caso 1396 (1032,61 dpp) se reajustó el criterio a $k_{eff} < 0,996872$.

El establecimiento de un margen mínimo de 1,0% en las potencias de canal en los casos de recambio suele ser suficiente para asegurar que no se superen los límites de potencia en los subsiguientes casos de evolución, aunque en ocasiones esto no se logra, como se detallará más adelante. Por otra parte, en ocasiones resulta un criterio excesivamente restrictivo conducente a “callejones sin salida” evitables con la aplicación de criterios heurísticos. La ejecución del programa REC_AUT se interrumpió en 3 ocasiones para relajar transitoriamente tales márgenes:

- Caso 0526 (388,42 dpp), margen 0,85% en ZH8
para admitir el recambio: K21 ← L18 ← S13 (K21: Q > 11250 MWd/tU).
- Caso 0532 (393,13 dpp), margen 0,68% en ZH8
para admitir el recambio: G04 ← K13 ← H31 (G04: Q > 11300 MWd/tU).
- Caso 1506 (1113,36 dpp), margen 0,65% en ZH5
para admitir el recambio: M27 ← G12 ← G24 ← O07 (M27: Q > 10330 MWd/tU).

Se presentaron además situaciones de extracción de EE.CC. con quemados elevados que ocurrieron durante períodos de ejecución sin supervisión inmediata; si bien se podría haber procedido de manera análoga a los casos mencionados más arriba, se decidió no interrumpir la ejecución del programa y dar por válidas tales situaciones:

- Caso 0860 (636,61 dpp), se extrae E.C. de J04 con $Q = 11679$ MWd/tU que a partir del caso 0844 (624,71 dpp) presentaba el quemado máximo del núcleo ($Q > 11400$ MWd/tU).
- Caso 1278 (944,08 dpp), se extrae E.C. de K21 con $Q = 12814$ MWd/tU que a partir del caso 1246 (919,71 dpp) presentaba el quemado máximo del núcleo ($Q > 11200$ MWd/tU).
- Caso 1318 (973,97 dpp), se extrae E.C. de J14 con $Q = 11640$ MWd/tU que a partir del caso 1298 (959,33 dpp) presentaba el quemado máximo del núcleo ($Q > 11060$ MWd/tU).

Finalmente, también se interrumpió el programa para llevar a cabo rezonificaciones en ocasiones en que se observó canales con quemados que excedían lo esperado. La versión utilizada del programa REC_AUT admite extracciones de EE.CC. que no estén en zonas de salida; no tiene programadas, en cambio, rezonificaciones a zonas intermedias. En el curso de este trabajo se decidió continuar el algoritmo simplificado del programa REC_AUT (alterando manualmente la asignación de zona del canal afectado) en vez de simular manualmente el intercalado de una permutación de EE.CC. dentro de la misma zona. Se efectuaron 7 rezonificaciones manuales.

Externamente al programa REC_AUT se llevó a cabo un seguimiento del tránsito de los EE.CC. en el núcleo. Los EE.CC. del núcleo inicial fueron nombrados **I####** con una numeración correlativa según el momento de la extracción, y los EE.CC. ingresados en la simulación fueron nombrados **C####** con una numeración correlativa según el momento del ingreso. En la secuencia de la simulación detallada cabe mencionar los siguientes hitos:

- En el caso 0648 (479,32 dpp), recambio #324: se retira del núcleo el E.C. **I0241**, que es el último remanente del núcleo inicial. Todos los canales han participado en al menos 2 recambios. En la búsqueda de un núcleo de equilibrio representativo, se considera que todo el lote de EE.CC. **C0001–C0323** está afectado de la arbitrariedad en la elección del núcleo inicial.
- En el caso 1324 (978,49 dpp), recambio #662: se retira del núcleo el E.C. **C0310**, que es el último remanente del lote de EE.CC. **C0001–C0323**. Todos los canales han participado en al menos 4 recambios. Se considera que el resto de la simulación corresponde a un “núcleo en equilibrio”, exenta de la arbitrariedad en la elección del núcleo inicial.
- En el caso 1969 (1457,67 dpp), evolución tras el recambio #984: se da por terminada la ejecución de la simulación detallada de gestión, habiéndose ejecutado 479 dpp desde la total remoción del lote **C0001–C0324** (~4 años-pp desde el inicio de la simulación).

En la [Figura 4](#) se contrastan las máximas potencias de canal en función del tiempo para cada Z.H. contra las respectivas potencias límites (líneas horizontales de trazo y punto, con una indicación de los márgenes mínimos y máximos). En dicha figura se destacan las instancias de extracción de los EE.CC. **I0241** y **C0310** (líneas verticales de trazo y punto). En la [Tabla 4](#) se presentan los 9 casos de evolución en que ocurren márgenes negativos (0,46% del total de casos); ninguno de estos excesos de potencia supera 14 kW, lo que se considera una situación aceptable dentro de las limitaciones de esta simulación. Se entiende que valores de tal magnitud no implican a priori la necesidad de reducir la potencia de operación.

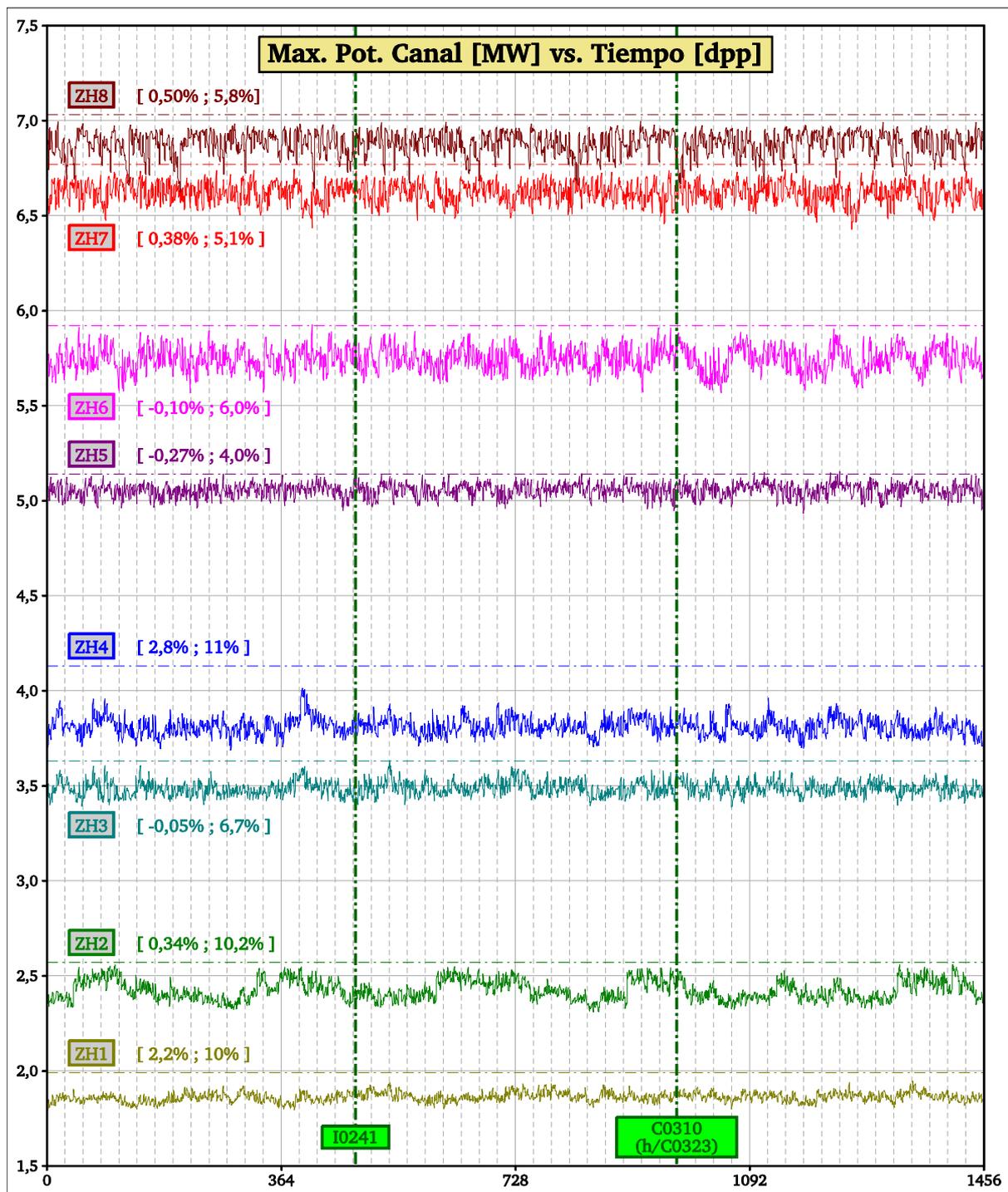


Figura 4: Máximas potencias de canal por Z.H. contrastadas contra las respectivas potencias límites (líneas horizontales de trazo y punto); entre corchetes, los rangos de los respectivos márgenes. Se marca el egreso de **I0241** (núcleo sin EE.CC. del lote inicial) y de **C0310** (núcleo en equilibrio).

La potencia lineal (Figura 5) en ningún momento excede 465,1 W/cm. Se verificó con un postprocesamiento de las salidas el cumplimiento de los criterios de PCI; tal tratamiento no se incluye en esta presentación.

Caso	Canal (Z.H.)	Exceso (margen)
0557 (412,26 dpp)	G08 (ZH6)	6 kW (-0,10%)
0703 (520,21 dpp)	F27 (ZH5)	0 kW (-0,01%)
0721 (533,05 dpp)	C24 (ZH3)	2 kW (-0,05%)
1123 (831,53 dpp)	F07 (ZH5)	3 kW (-0,06%)
1485 (1099,47 dpp)	Q11 (ZH5)	7 kW (-0,14%)
1507 (1115,20 dpp)	C16 (ZH5)	9 kW (-0,18%)
1645 (1217,67 dpp)	D11 (ZH5)	7 kW (-0,14%)
1661 (1228,96 dpp)	O07 (ZH5)	0 kW (-0,01%)
1665 (1232,51 dpp)	O07 (ZH5)	14 kW (-0,27%)

Tabla 4: Ocurrencia de márgenes negativos en la simulación detallada.

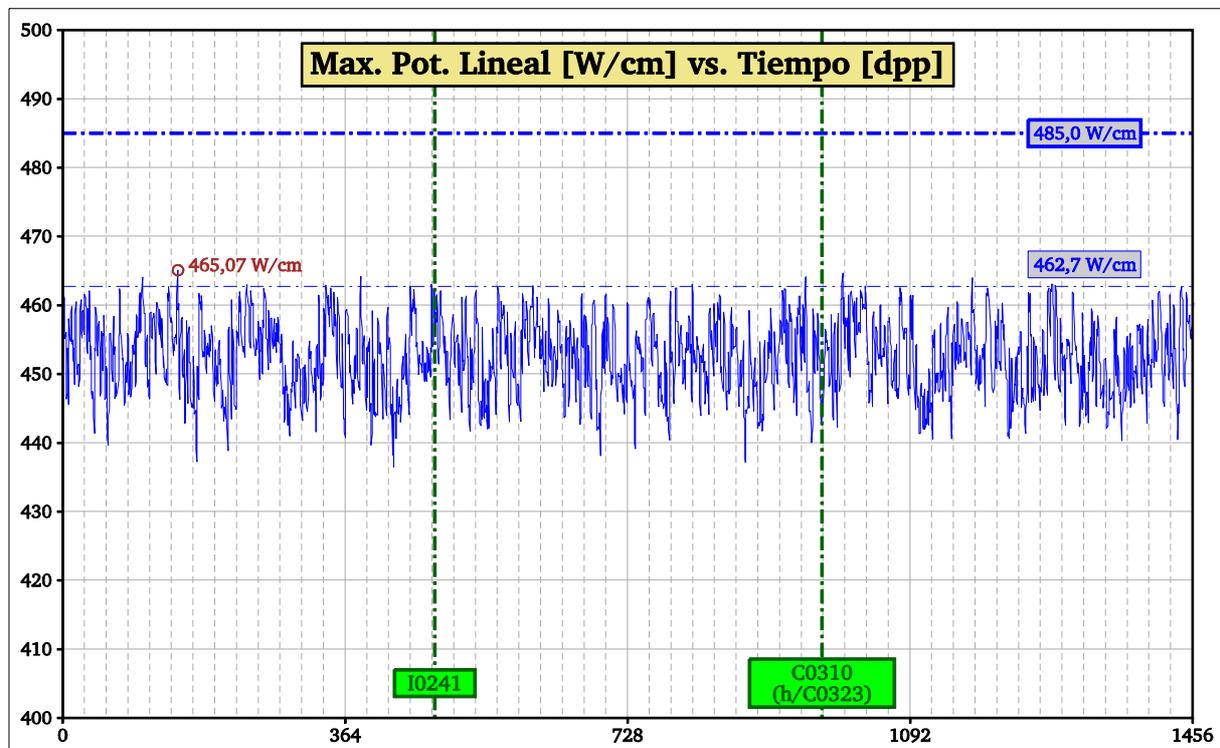


Figura 5: Máxima potencia lineal contrastada contra un límite admisible de 485,0 W/cm y el límite de ~462,7 W/cm impuesto en la simulación a los casos de recambio. Se marca el máximo valor alcanzado en un caso de evolución.

Los quemados de extracción (Figura 6), comprendidos en la banda entre 10300 MWd/tU y 12200 MWd/tU, presentan un valor promedio (10879 ± 147) MWd/tU considerando los resultados de toda la historia, o (10861 ± 111) MWd/tU promediando sólo los resultados obtenidos para el núcleo en equilibrio (i.e. a partir del caso 1325); esto es, una reducción de 86 MWd/tU y 104 MWd/tU, respectivamente, respecto del quemado de extracción del cálculo TAV. La frecuencia de recambios se evalúa en 246,6 recs./año-pp considerando toda la historia, o 246,1 recs./año-pp para el núcleo en equilibrio; esto es, un incremento de ~2 EE.CC. sobre la estimación TAV del consumo por año de plena potencia. En la Tabla 5 se comparan los principales resultados de esta simulación detallada con los del cálculo TAV.

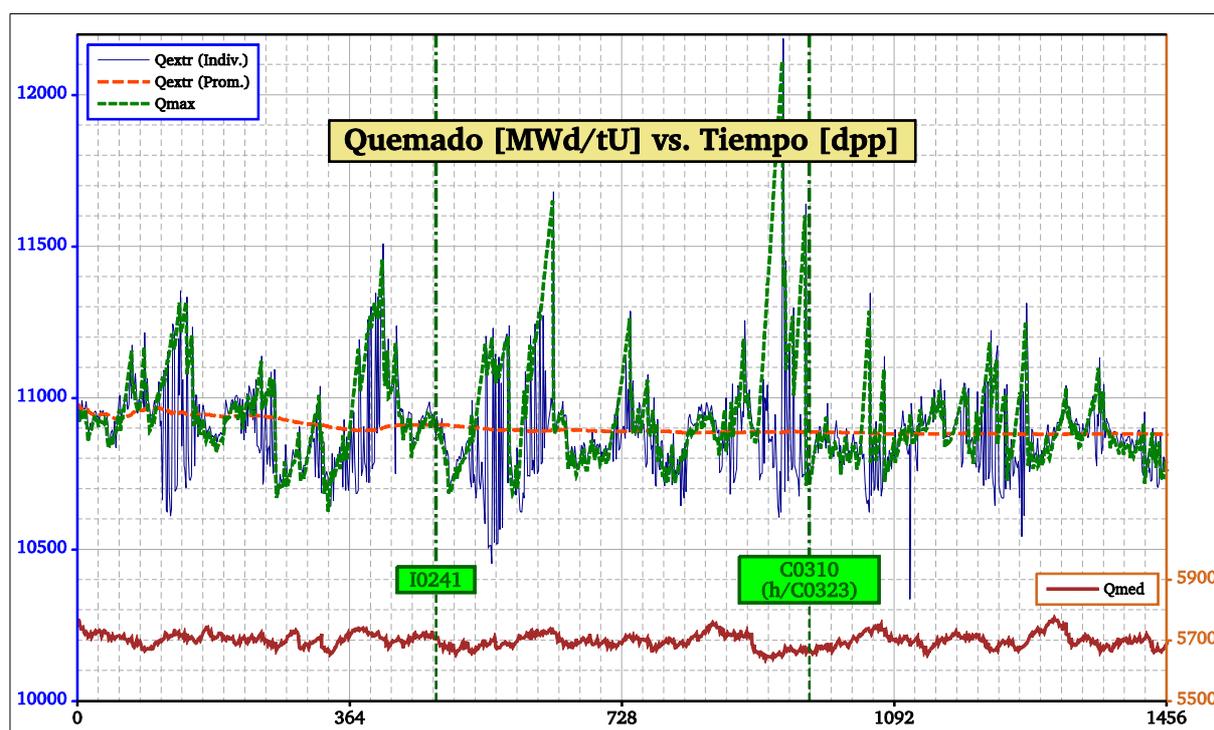


Figura 6: Quemados. Escala izquierda: quemado de extracción (valores individuales y promedio histórico), y quemado máximo del núcleo (post-recambio). Escala derecha: quemado medio del núcleo.

Casos #recs / lapso	Frec. [rec/dpp] (×365)	Qsal [MWd/tU] (±1σ)	Rangos (valor más limitante arriba, menos limitante abajo)									
			Max.PL [W/cm]	Mínimo Margen por zona hidráulica [%]								
				ZH1	ZH2	ZH3	ZH4	ZH5	ZH6	ZH7	ZH8	
0001 – 1969 984recs/1456,57dpp	0,676 (246,6)	10879±147	465,1 436,4	2,18 10,11	0,34 10,21	-0,05 6,70	2,84 10,75	-0,27 4,02	-0,10 5,96	0,38 5,06	0,50 5,77	
0649 – 1969 660recs/976,84dpp	0,676 (246,6)	10863±146	464,7 437,1	2,18 9,58	0,34 10,21	-0,05 6,70	4,08 10,47	-0,27 4,02	0,15 5,96	0,44 5,06	0,50 5,27	
1325 – 1969 322recs/477,59dpp	0,674 (246,1)	10861±111	464,7 440,3	2,18 9,58	0,34 9,69	1,15 6,70	4,08 10,47	-0,27 4,02	0,27 5,96	0,44 5,06	0,55 5,18	
TAV 241	0,669 (244,4)	10965	—	10,49	10,03	6,19	11,02	4,08	5,55	5,15	5,58	

Tabla 5: Comparación de los principales resultados de la Simulación Detallada (en 3 instancias, respectivamente: historia completa, historia posterior a la extracción del núcleo inicial, núcleo en equilibrio) y del cálculo TAV.

La cantidad de visitas recibidas por canal a lo largo de toda la simulación va desde un mínimo de 6 (canales E30, P04, T16, J02) hasta un máximo de 36 (canales L30, R22). Se produjeron 88 rezonificaciones automáticas a las zonas de salida además de las 7 manuales a zonas intermedias, sumando 95 rezonificaciones (9,7% de un total de 984 recambios). Cabe mencionar que el canal K21 fue rezonificado en 15 de 20 visitas y, en menor medida, el canal J14 fue rezonificado en 9 de 16 visitas; los demás casos de rezonificación fueron ocasionales (5 de 14 visitas el canal M15, 4 de 13 visitas el canal H13, o menos). El estudio del impacto de modificar la estrategia para cambiar de zona los canales K21 y J14 (uno o ambos) o de mejorar la simulación detallada incorporando de manera sistemática el intercalado de un paso adicional en una zona en vez de la rezonificación de un canal, excede el alcance de este trabajo.

5 CONCLUSIONES

Se ha diseñado una estrategia de recambio de combustible para el núcleo de 241 canales que mejora la estrategia actual, utilizando el método Time-Average del código de reactor PUMA-4. Los resultados Time-Average de las potencias de canal de la estrategia elegida presentan márgenes a las potencias límites por Z.H. superiores al 4%.

El programa REC_AUT (versión para CNA1) permitió llevar a cabo una simulación detallada de 984 recambios abarcando 4 años de plena potencia con un algoritmo simple de selección de recambios. La simplicidad del algoritmo implica a priori que los resultados obtenidos resultarían subóptimos respecto de los que podría obtener la gestión humana del personal de planta, pudiendo entonces considerarse como una aproximación conservativa al problema. Esta simulación detallada confirmó la factibilidad de la estrategia.

Desde el punto de vista del usuario, sería deseable incorporar al algoritmo del programa REC_AUT la posibilidad de: prever (y descartar recambios) si la evolución resulta en márgenes no admisibles, identificar situaciones en las cuales correspondería agregar un paso adicional en una misma zona (“permutación”) para evitar recurrir a rezonificaciones, e identificar situaciones en las que cabría relajar transitoriamente los márgenes admisibles para admitir recambios que pudieran evitar rezonificaciones o permutaciones previsibles.

REFERENCIAS

- Clavero, F., y Silva, M.S., Cálculo de distribuciones de quemado realistas para la CNA-UI y la CNA-UII mediante Simulated Annealing. *XII Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2016)*, sesión 24: aplicaciones a reactores nucleares de potencia, UTN Facultad Regional Córdoba, noviembre 2016.
- Grant, C.R., Manual del Código “PUMA 4” Versión 4. CNEA.C.RCN.MUS.059, CNEA, 2005.
- Halsall, M.J., WIMSD, A Neutronic Code for Standard Lattice Physics Analysis. NEA 1507/02, NEA Databank, 1997.
- Higa, M., Modelo de Cálculo de Reactor con PUMA 4 para la CNA I en Geometría Cartesiana. IT-FA/08/008, Gerencia de Ingeniería y Servicios, NA-SA, 2008.
- Leszczinsky, F., López Almada, D., and Trkov A. (Editors), WIMS-D Library Update: Final Report of a Coordinated Research Project. STI/PUB/1264, Nuclear Data Section, IAEA, 2007.
- Mollerach, R., Higa, M., Silva, M. y Fink, J., Revision of the fuel management studies of the Atucha-2 reactor. Implementation of an automatic refuelling simulation program. *23rd CNS Nuclear Simulation Symposium*, Ottawa, Canada, 2008.
- Pérez, R., Piñeyro, J., y Fink, J., Revisión de los Criterios para Prevenir Fallas por Interacción Pastilla-Vaina con Combustible Levemente Enriquecido en la CNA I. Utilización de los Mismos para la Operación y la Gestión de Combustible. Informe del Proyecto ULE A1: IF-1200-ULE-IE-004, NA-SA, 1995.
- Villar, J., Elemento Combustible de 37 Barras para la CNA I. Cálculos Neutrónicos, de Actividad y de Calor de Decaimiento. IT-FN/00/002, Gerencia de Ingeniería y Servicios, NA-SA, 2000.