

DISEÑO DE UNA ESTRATEGIA DE RECAMBIO DE COMBUSTIBLE DE URANIO LEVEMENTE ENRIQUECIDO PARA LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA II

G. Fernandez

*Dept. Física y Análisis, Subgca. Diseño de 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;
gdfernandez@na-sa.com.ar; <http://www.na-sa.com.ar>*

Palabras clave: CNA-UII, PUMA, ULE, TIME-AVERAGE, GESTION DETALLADA.

Resumen. La Central Nuclear Atucha II opera en la actualidad con combustible de Uranio Natural. Dadas las ventajas económicas que se obtienen con la utilización de Uranio Levemente Enriquecido, se planteó realizar un estudio de factibilidad de utilización de combustibles de Uranio enriquecido al 0,85 % en peso. Uno de éstos estudios, que es el objetivo del presente trabajo, consiste en diseñar una estrategia de recambios que permita realizar la gestión del combustible, una vez alcanzado el quemado de equilibrio, sin superar los límites de seguridad con los que se protege la integridad de los elementos combustibles. Mediante el método iterativo Time-Average se evaluó una gran cantidad de estrategias y se seleccionó una con 3 caminos y 3 zonas de quemado. En una segunda instancia, se analizaron los parámetros de interés para la seguridad mediante la simulación de la evolución del núcleo. Ésta se hizo con una combinación de la selección automática de recambio mediante el programa REC_AUT.EXE y una selección manual realizando un traslado adicional. Como resultado se presenta la estrategia diseñada y los parámetros calculados en la evolución del núcleo durante 1685,8 días de operación a plena potencia.

1 INTRODUCCIÓN

La Central Nuclear Atucha II (CNA-UII) es del tipo PHWR (Pressurized Heavy-Water Reactor) con 451 canales verticales distribuidos en una red triangular contenidos en un recipiente de presión. Los canales contienen los elementos combustibles (EE.CC.) que se recambian durante la operación a potencia para mantener a largo plazo la criticidad del núcleo y para tener una distribución de flujo neutrónico suficientemente aplanada. A corto plazo, el control de la reactividad y la distribución axial y azimutal de potencia se hace en forma automática, con la inserción controlada de un conjunto de barras agrupadas en 4 bancos de barras de control llamados G10, G20, G30 y S10. Adicionalmente, un conjunto de barras de hafnio agrupadas en los bancos S20 y S30 permanece fuera del núcleo durante la operación normal y se utilizan para el corte del reactor.

Los combustibles se refrigeran con agua pesada (D2O) que circula por los canales en dirección ascendente. El flujo de refrigerante se reduce en los canales de la periferia, donde la potencia es menor que en la región central, con restrictores de caudal ubicados en la entrada de los canales. De esta forma, el núcleo se divide en 5 zonas hidráulicas (ZZ.HH.) numeradas en orden ascendente de la periferia hacia el centro, i.e. de la Zona Hidráulica 1 (ZH1, máxima restricción) a la Zona Hidráulica 5 (ZH5, sin restricción).

La gestión del combustible se realiza siguiendo una estrategia preestablecida, que consiste en definir conjuntos de canales llamados caminos. Los caminos se dividen en subconjuntos llamados zonas. Estas no tienen canales en común y por convención se numeran en forma ascendente en cada camino, comenzando por la número 1 (zona de salida) hasta la Nz (zona de entrada). En una operación de recambio se extrae un combustible gastado de un canal de salida, se reposicionan otros dentro del núcleo y se ingresa un combustible fresco en un canal de entrada. El reposicionamiento o traslado de combustibles permite el control de la distribución de potencia y la generación de una vacancia en un canal de entrada para el ingreso del combustible fresco.

Resulta fundamental que la estrategia sea convenientemente definida para tener una distribución de flujo que permita realizar la gestión de combustible respetando los límites de seguridad con los que se protege la integridad del mismo. En la actualidad se utiliza combustible de Uranio Natural (UN) y la gestión se hace con una estrategia de 3 caminos con 2 zonas cada uno, i.e., una zona de salida y una de entrada. Dadas las ventajas económicas que tiene la utilización de Uranio Levemente Enriquecido (ULE), como lo demuestra la experiencia de la operación de la Central Nuclear Atucha I con este tipo de combustible, se inició un estudio de la factibilidad de utilizar Uranio enriquecido al 0,85 % en peso en la CNA-UII. El análisis requiere de la realización de una gran variedad de estudios, entre los que se encuentra el de diseñar una estrategia para la gestión del combustible y es el objetivo del presente trabajo.

Como resultado, se obtuvo una estrategia de recambio que permite realizar la gestión del combustible del núcleo de equilibrio sin superar, en cada operación de recambio, los límites de seguridad establecidos para la potencia de canal en las 5 zonas hidráulicas. También se verificó que no se superan los límites para la potencia lineal y para su incremento, lo que asegura la protección de la integridad del elemento combustible al reducir la probabilidad de que ocurran daños por la interacción pastilla-vaina (PCI por su acrónimo en inglés). El cumplimiento de los criterios de seguridad se verificó para la operación con núcleo en equilibrio mediante la simulación de la evolución temporal del núcleo en condiciones nominales, con la que además se estimaron parámetros de interés como el factor de multiplicación efectivo, el quemado promedio de los combustibles que se extraen del núcleo

para ser enviados a piletta, la evolución de la máxima potencia de canal (MPC), la máxima potencia lineal (MPL) y la frecuencia de recambio de combustible.

2 CRITERIOS DE SEGURIDAD PARA EL COMBUSTIBLE

Para evitar que se produzca DNB (Departure from Nucleate Boiling) durante un transitorio de parada de bombas del primario y para limitar la fracción de vacío a la salida de los canales de combustible, se establecen valores máximos para la potencia de canal (P_{Clim}) que no deben ser superados en condiciones nominales de operación. Para cada zona hidráulica (ver Figura 1) se tiene un valor límite para la potencia de canal. Dado que a la fecha no se cuenta con límites establecidos para el combustible de ULE, para este trabajo se toman los establecidos para el combustible de UN (Schivo, 2012) mostrados en la Tabla 1.

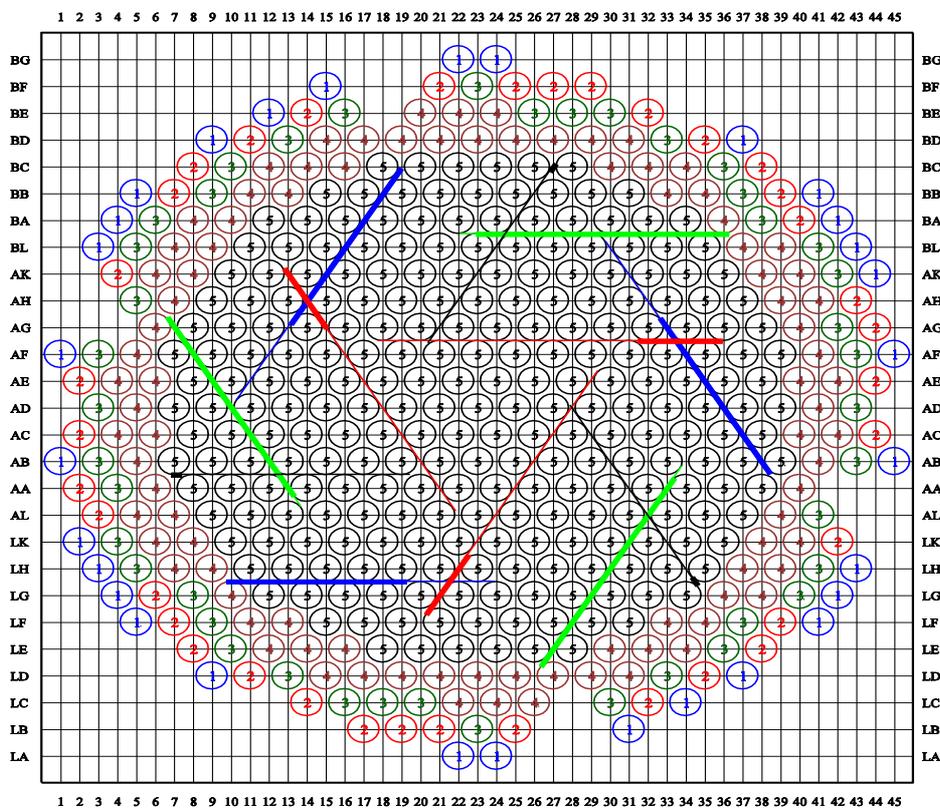


Figura 1: Zonas hidráulicas de la CNA-UII. La línea gruesa en verde representa el banco G10, en azul el banco G20, en rojo el banco G30 y en negro el banco S10.

ZH	P _{Clim} [MW]
1	2,524
2	3,158
3	4,036
4	5,565
5	7,062

Tabla 1: Límites para la potencia de canal (P_{Clim}) según la zona hidráulica.

La potencia lineal (*PLIN*) y su variación (*DPLIN*) también tienen limitaciones para reducir la

probabilidad de que se produzcan daños por la interacción pastilla-vaina (PCI o Pellet Cladding Interaction). Estas limitaciones se resumen de la siguiente manera:

1. $PLIN \leq 510$ W/cm.
2. $DPLIN \leq 100$ W/cm son admisibles en cualquier caso.
3. Si no se cumple 2, se debe cumplir que la potencia lineal final ($PLIN_{final}$) no supere la potencia lineal crítica ($PLIN_{crit}$).
4. Si no se cumplen 2 y 3, se debe cumplir que la fracción de potencia en que se superan los 100 W/cm o la $PLIN_{crit}$ se realiza con una velocidad de aumento de 12 W/cm.h.

La potencia lineal crítica para el trozo en la posición z se calculó a partir del quemado medio $Q_{medio}(z)$ del trozo con la fórmula, extraída de (Perez et al, 1995), siguiente:

$$PLIN_{crit}(z) = 644,744 - 0,0222127 * Q_{medio}(z)$$

3 NÚCLEO DE EQUILIBRIO Y MÉTODO TIME-AVERAGE

Los 451 canales del núcleo se dividen en conjuntos llamados caminos y estos se subdividen en conjuntos más pequeños llamados zonas. Los diferentes caminos no tienen canales en común, es decir, no se intersectan. Tampoco las zonas se intersectan entre sí. Un combustible que ingresa al núcleo por un camino dado, permanece siempre en éste, trasladándose en distintas operaciones de recambio entre las zonas hasta que finalmente es extraído del núcleo. La forma en que los EE.CC. transitan por el núcleo se denomina estrategia de combustible y queda preestablecida con la elección de los caminos y sus zonas.

Al recambiar los combustibles siguiendo una dada estrategia por un periodo prolongado de tiempo, el núcleo alcanza un estado de equilibrio en el que la tasa de recambios y los promedios temporales de parámetros como el flujo, la potencia de canal, la potencia lineal y los quemados de extracción en cada zona de quemado son estacionarios. Estos parámetros se pueden estimar en un cálculo rápido mediante el método Time-Average (TAV) implementado en el código de reactor PUMA (Grant, 2005). Dada la estrategia utilizada, i.e, la definición de caminos y zonas y el quemado de extracción para cada camino, el programa calcula mediante un método iterativo los parámetros mencionados y también los quemados de extracción de cada zona de quemado.

Si bien el método es útil para tener una rápida estimación de la potencia y el factor de multiplicación efectivo del núcleo de equilibrio, el cálculo TAV no brinda información sobre los valores que se tendrían en un núcleo con una distribución de quemado instantánea como la que se encuentra durante operación. Por lo tanto, en la evaluación de una estrategia, es necesario realizar una simulación detallada de la operación considerando los recambios de combustible correspondientes.

4 SIMULACIÓN AUTOMÁTICA DE RECAMBIOS

La simulación detallada de la evolución del núcleo se realizó mediante el programa REC_AUT.EXE (Mollerach et. al., 2008) que permite simular operaciones de recambio durante largos periodos de tiempo en forma automática, con la ventaja de reducir el tiempo de cálculo que insume una gestión de combustible con selección manual de los canales a recambiar.

El programa ejecuta el código PUMA y evalúa las necesidades de recambio para mantener la reactividad del núcleo en un valor dado como referencia. De ser necesario el ingreso de un combustible fresco, genera una lista ordenada de operaciones de recambio compatibles con la estrategia y las evalúa en orden hasta que se cumplen los siguientes criterios:

1. No se superan las máximas potencias de canal permitidas por zona hidráulica.
2. No se supera la máxima potencia lineal en cada canal.
3. La fracción de potencia en cada sexto se encuentra en una banda de aceptación.

La lista de operaciones está basada en el quemado de los combustibles ubicados en los canales de cada zona de la estrategia. La prioridad en la lista la tiene el combustible más quemado en todos los canales de salida.

Una vez aceptada una operación de recambio, el programa estima el tiempo a evolucionar con PUMA para alcanzar la reactividad de referencia y ejecuta el paso de evolución calculando la nueva distribución de quemados. El proceso de simulación de recambios y posterior evolución en el tiempo se repite en forma automática hasta que el programa no encuentra recambios que cumplan los criterios de aceptación o se alcanza un valor de corte dado por el usuario para la cantidad de casos de PUMA ejecutados.

Para realizar la simulación automática se le dan al programa los siguientes datos de entrada:

1. Definición de caminos y zonas de la estrategia a seguir.
2. Distribución de sectores para el control azimutal de potencia.
3. Distribución de zonas hidráulicas para evaluación de criterios de seguridad para el combustible.
4. Estado inicial de quemados instantáneos consistentes con el núcleo de equilibrio para la estrategia dada.
5. Factor de multiplicación efectivo de referencia.
6. Pérdida de reactividad por dpp para estimar el tiempo a evolucionar para alcanzar el valor de referencia del k-efectivo luego de una operación de recambio.
7. Margen mínimo aceptable a la potencia de canal límite por zona hidráulica.
8. Quemado mínimo aceptable por zona de quemado para considerar el canal en la lista ordenada de operaciones de recambio.
9. Límites de potencia de canal para las 5 zonas hidráulicas y para la potencia lineal máxima.
10. Banda (valores mínimo y máximo) de aceptación para la fracción de potencia en cada sector.
11. Número máximo de operaciones de recambio aceptadas.

5 DESARROLLO Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados para la estrategia de recambio obtenida y otros parámetros de interés. Tanto los cálculos TAV para evaluar distintas estrategias como la simulación de recambios se hicieron a plena potencia (2160 MW térmicos) y con los bancos de barras fijos en la posición nominal. El factor de multiplicación efectivo de referencia, para el que se considera que el reactor se encuentra crítico, se tomó de la gestión con Uranio Natural (Mollerach, 2008) y tiene el valor de 0,99714 (es distinto de la unidad debido a las incertezas y aproximaciones en el modelo con que se representa el núcleo).

La distribución de quemado instantáneo inicial para el programa REC_AUT.EXE se generó mediante el módulo Gendist implementado en DINO (Clavero, 2016), que utiliza la distribución de quemados TAV correspondiente a la estrategia seleccionada.

5.1 Modelos de cálculo

En PUMA se representó el reactor completo en geometría cartesiana X-Y-Z, con 105 planos en la dirección X, 121 planos en la dirección Y y 33 en la dirección Z. La celda de combustible se representó con 4x4 regiones en el plano X-Y. La zona activa, se dividió axialmente en 20 trozos de 26,5 cm.

Las secciones eficaces (XS) de la celda de combustible en función del quemado, utilizadas en los cálculos estáticos de la simulación detallada, se calcularon con el código neutrónico de celda WIMS-D5 (Halsall, 1997) a 2 grupos de energía, utilizando ULE 0,85% en peso y sin ^{135}Xe para el combustible fresco. Los datos nucleares que utiliza el código se tomaron de la biblioteca IAEA.lib (Leszczinsky et al, 2000) a 69 grupos de energía. A partir de éstas, se calcularon XS integradas para los cálculos Time-Average.

El modelo de PUMA incluyó la corrección en las secciones eficaces por heterogeneidad de la celda.

Las XS incrementales con las que se representan las barras de control y los separadores de Inconel se calcularon con el código DRAGON (Marleau et al, 2000). Para el resto de los internos del reactor, i.e., materiales en los reflectores superior e inferior y lanzas de detectores, se utilizaron las secciones eficaces incrementales calculadas para el diseño de la estrategia para UN.

5.2 Diseño de la estrategia de combustible para el ULE

La metodología utilizada para encontrar una estrategia adecuada para la operación con ULE consistió en los siguientes pasos:

1. Definir una estrategia, es decir, dividir el núcleo en caminos y zonas.
2. Evaluar mediante el método Time-Average la distribución de potencia de canal y de potencia lineal del núcleo de equilibrio consistente con la estrategia definida y evaluar que no se superen los límites de seguridad.
3. Si no se cumplen los criterios de aceptación, volver al paso 1 y definir una nueva estrategia.
4. Evaluar las fluctuaciones de la distribución de potencia durante la evolución temporal del núcleo mediante una simulación detallada con selección automática y/o manual de las operaciones de recambio.
5. Si no se encuentra un recambio sin que se superen los límites de seguridad, volver al paso 1 y definir una nueva estrategia.

En la selección de la estrategia se tuvo preferencia por la que tiene la menor cantidad de zonas por camino y el mayor margen mínimo. Luego de evaluar un gran número de estrategias se concluyó que la estrategia de 3 caminos con 3 zonas esquematizada en la Figura 2 es adecuada para la gestión del combustible ULE. El color identifica el camino y las zonas se numeran de 1 a 3 para cada camino. En una operación de recambio siguiendo la estrategia, se extrae un combustible de un canal de salida (Zona 1) y en su lugar se introduce un combustible trasladado desde la zona intermedia (Zona 2). En la vacancia generada en la Zona 2 se introduce un combustible trasladado desde la zona de entrada (Zona 3) y se coloca un combustible fresco en su lugar. Esta operación se puede esquematizar de la siguiente manera: Pileta ← Zona 3 ← Zona 2 ← Zona 1 ← Combustible fresco.

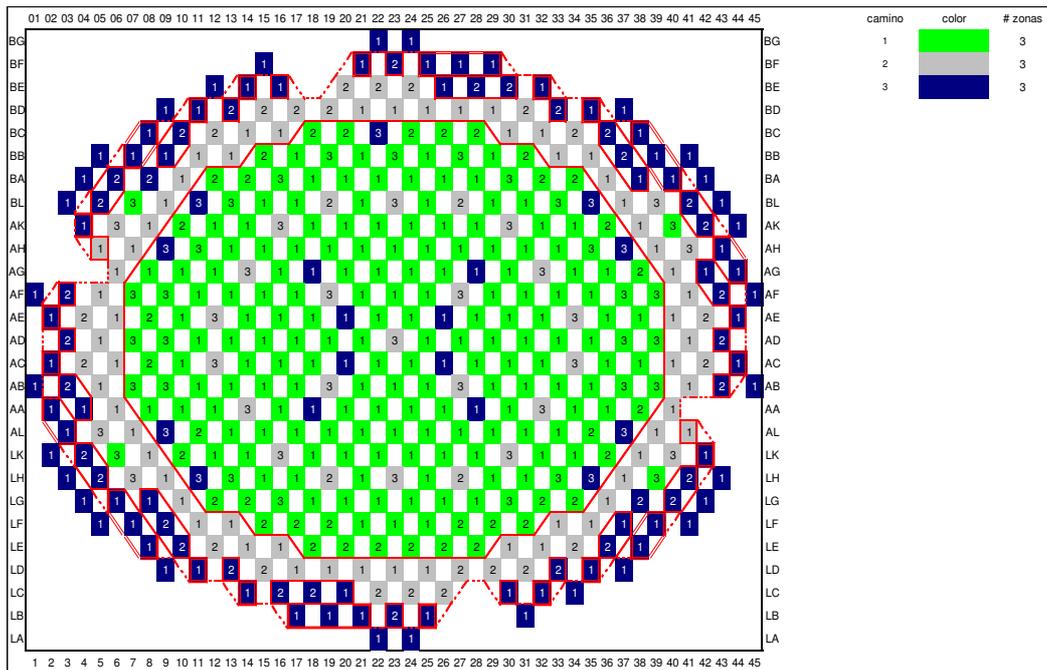


Figura 2: Caminos y zonas de la estrategia con 3 caminos y 3 zonas cada uno para la gestión del combustible ULE.

5.3 Resultados del cálculo TAV

Los parámetros neutrónicos obtenidos en el cálculo Time-Average con la estrategia de combustible seleccionada para la gestión del ULE se muestran en la Tabla 2. En ésta se dan el factor de multiplicación efectivo, el quemado promedio de entrada y salida de cada zona, el tiempo promedio de permanencia del combustible en cada zona y la frecuencia con que se recambian los EE.CC. por día a plena potencia (dpp) y por año, junto con el k-efectivo de referencia y el consumo estimado de combustible por año de operación a plena potencia (PP).

k-efectivo		0,99712					
Reactividad		-289,2 pcm					
Consumo a PP		324,9 EE.CC./año					
Visitas de MC		2,67 visitas/dpp					
Camino	Zona	Quemado [MWd/tonU]		Tiempo de permanencia [dpp]		Frecuencia de recambio	
		Entrada	Salida	Zona	Camino	EE.CC./dpp	EE.CC./año
1	1	3883	12840	289,46	415,98	0,522	190,5
	2	1697	3883	70,93			
	3	0	1697	55,59			
2	1	6593	12840	277,05	520,66	0,209	76,5
	2	3748	6593	124,19			
	3	0	3748	119,42			
3	1	5302	12840	529,84	788,45	0,159	57,9
	2	1768	5302	201,84			
	3	0	1768	56,77			
Total					0,890	324,9	

Tabla 2: Principales resultados del cálculo TAV para la estrategia de recambios.

La utilización de ULE reduce en aproximadamente 40 % la cantidad de EE.CC consumidos por año respecto del consumo de UN, reduciendo el volumen de combustible

gastado a almacenar. La cantidad de visitas por día que debe realizar la máquina de carga (MC) a los canales a recambiar se reduce en 8,9 % comparada con la operación con UN.

En la Figura 3 se muestra el margen a la potencia límite de canal por zona hidráulica. El margen mínimo de 4,7 % ocurre en el canal AB27, perteneciente a la zona de entrada del camino 2. El resto de los canales tiene un margen superior a 5,1 %.

En la Tabla 3 se muestran el margen mínimo por zona hidráulica, junto con el canal donde se encuentra el mínimo. También se muestra la máxima potencia lineal. La zona hidráulica 5 tiene el margen más bajo.

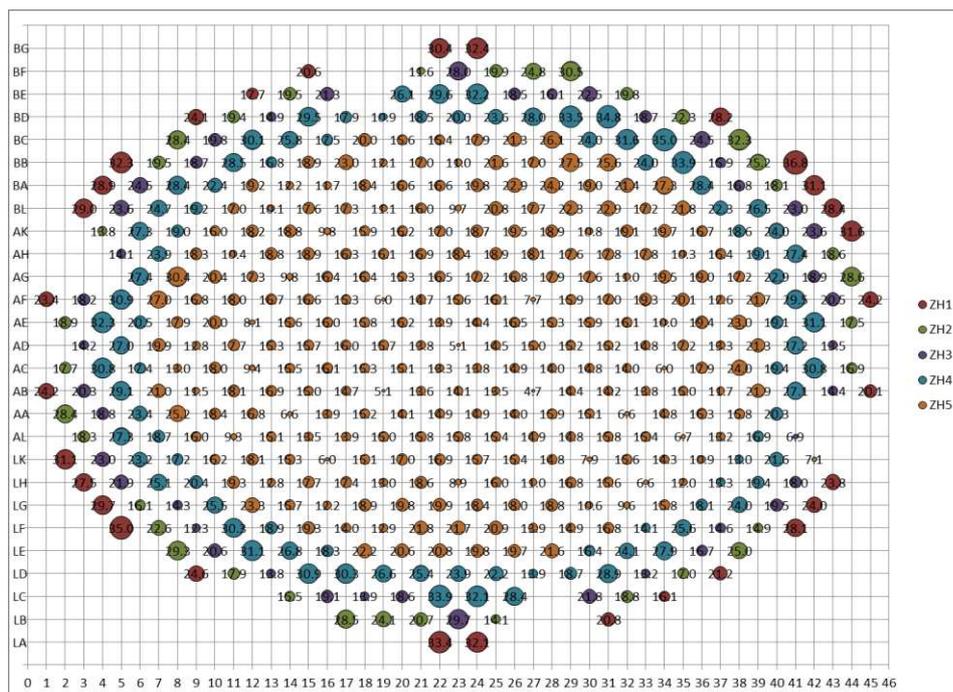


Figura 3: Margen [%] a la potencia de canal límite por zona hidráulica para el núcleo en equilibrio.

ZH	Margen Mínimo [%]	PLIN Max. [W/cm]
1	16,1 LC34	135,9
2	7,1 LK42	190,7
3	6,9 AL41	245,6
4	10,9 BD19	331,4
5	4,7 AB27	437,9

Tabla 3: Margen mínimo y potencia lineal máxima (PLIN Max.) por zona hidráulica.

5.4 Simulación detallada

La simulación detallada de la gestión de combustible con selección automática se hizo con el programa REC_AUT.EXE. En las ocasiones en que el programa se detuvo por no encontrar recambios que respeten los límites de seguridad, se hizo un recambio con selección manual y posteriormente se reinició la selección automática. De ser necesario, el recambio manual se hizo con un paso adicional en la zona donde se superaba la potencia límite, por ejemplo, Pileta ← Zona 3 ← Zona 3 ← Zona 2 ← Zona 1 ← Combustible fresco.

Partiendo de la distribución de quemados instantánea compatible con la estrategia de 3

camino seleccionada, se evolucionó hasta los 83,30 dpp con criterios relajados para acelerar la simulación. Esto se hizo para tener una estimación de la pérdida de reactividad por día de plena potencia, dato que se tiene que dar como entrada al programa. Este primer tramo de la simulación se descartó y se inició una nueva simulación con criterios más restrictivos y utilizando el valor actualizado para la pérdida de reactividad, partiendo desde el estado de quemado instantáneo correspondiente a los 83,30 dpp.

En la Tabla 4 se muestra un resumen de los parámetros relevantes obtenidos en la simulación detallada. Durante la simulación se realizaron 84 operaciones manuales con un paso adicional en la zona de salida, 8 con un paso adicional en la zona de entrada y 2 con un paso adicional en la zona de salida y en la zona de entrada. No fueron necesarios pasos adicionales en la zona de traslado.

Parámetro	Valor	Unidad
k-efectivo de referencia	0,99714	
k-efectivo promedio	0,99740	
Tiempo total simulado	1685,8	dpp
Frecuencia promedio de recambio	0,90	EE.CC./dpp
Ganancia de reactividad por recambio		
Máxima	0,82	mk
Mínima	0,18	mk
Promedio	0,56	mk
Pérdida de reactividad debida al quemado		
Máxima	0,63	mk/dpp
Mínima	0,44	mk/dpp
Promedio	0,51	mk/dpp
Cantidad de operaciones de recambio		
Total	1612	
Automáticas	1435	
Manuales	177	
Con 1 paso adicional	92	
Con 2 pasos adicionales	2	
Quemado promedio de extracción		
Camino 1	12659,2	MWd/tU
Camino 2	12537,0	MWd/tU
Camino 3	12567,9	MWd/tU
Máximo quemado alcanzado		
Camino 1	14983,6	MWd/tU
Camino 2	13827,9	MWd/tU
Camino 3	13971,8	MWd/tU

Tabla 4: Resumen de parámetros relevantes obtenidos en la simulación detallada.

En total, se realizaron 92 operaciones con un paso adicional sobre un total de 1615 operaciones de recambio, es decir, el 5,7 % de las operaciones de recambio requirieron un paso adicional.

La evolución de la máxima potencia de canal en las zonas hidráulicas se muestra en la Figura 4. Se respetaron los límites durante toda la simulación salvo en 8 casos (1 en la ZH1, 5 en la ZH2 y 2 en la ZH5) donde se superaron por escaso porcentaje (0,07 % en la ZH1, 0,58 % en la ZH2 y 0,31 % en la ZH5) y que corresponden a la evolución posterior al recambio. Esto se debe a que el programa REC_AUT.EXE verifica el cumplimiento de los criterios de seguridad inmediatamente después de cada recambio pero no lo hace al evolucionar. En la práctica, el físico de la planta encargado de realizar la gestión elegirá otro recambio si resulta

por cálculo que se va a superar alguno de los límites de potencia en la evolución posterior. Por lo tanto, resulta aceptable en una simulación automática que se superen esporádicamente los límites de potencia al evolucionar en quemado y no se justifica desechar la simulación completa.

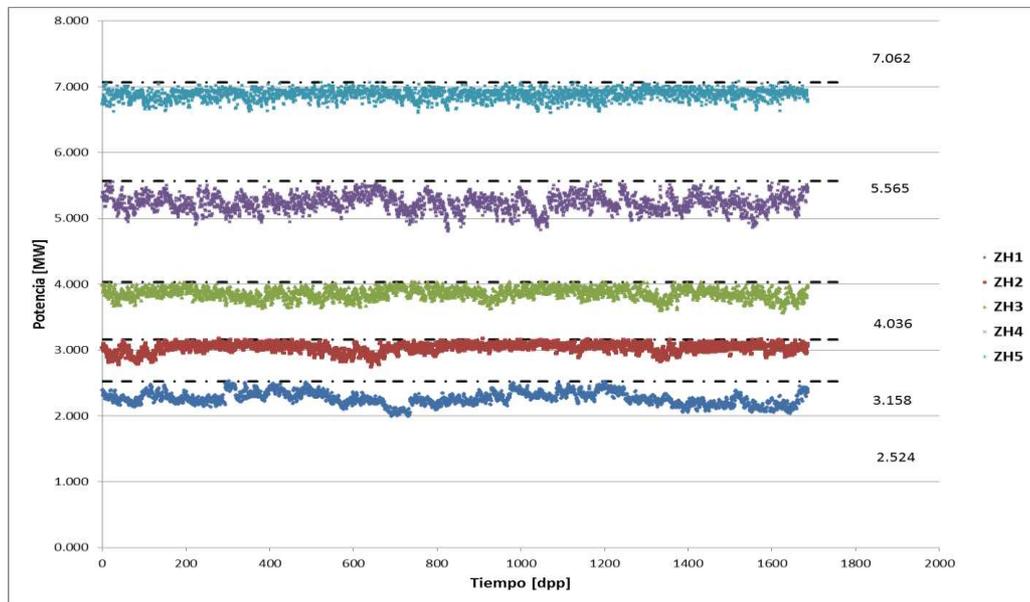


Figura 4: Evolución de la máxima potencia de canal por zona hidráulica para núcleo en equilibrio.

La evolución de la máxima potencia lineal se muestra en la Figura 5 junto con el valor límite de 510 W/cm en línea de trazo y punto. En ningún caso se superó la potencia lineal máxima admisible.

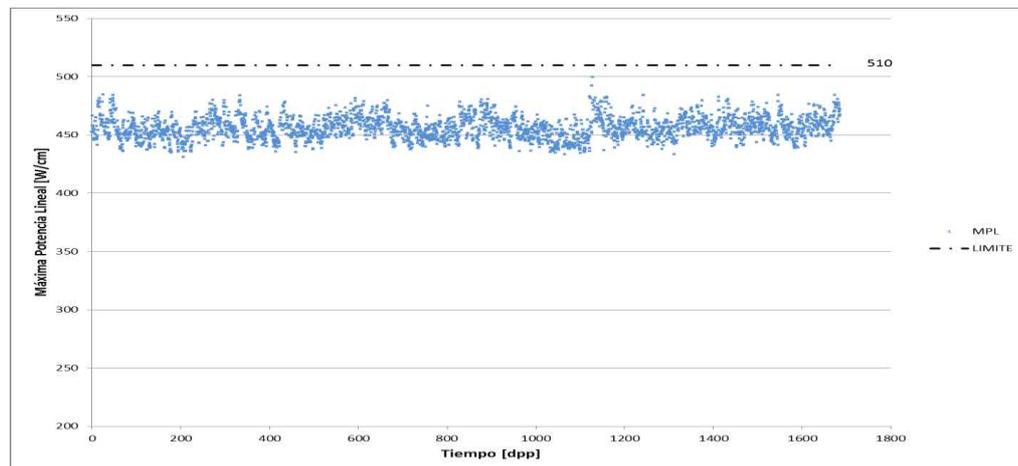


Figura 5: Evolución de la Máxima Potencia Lineal (MPL).

En la Figura 6 se muestra la evolución del quemado de extracción, promediado desde el inicio de la simulación, para los 3 caminos de irradiación de la estrategia seleccionada. Alcanza con promediar en un intervalo de tiempo mayor a 300 dpp (aproximadamente) para obtener valores estables del quemado promedio de extracción. También se muestra el quemado de extracción promedio total y el valor estimado en el cálculo TAV (en línea de trazo y punto).

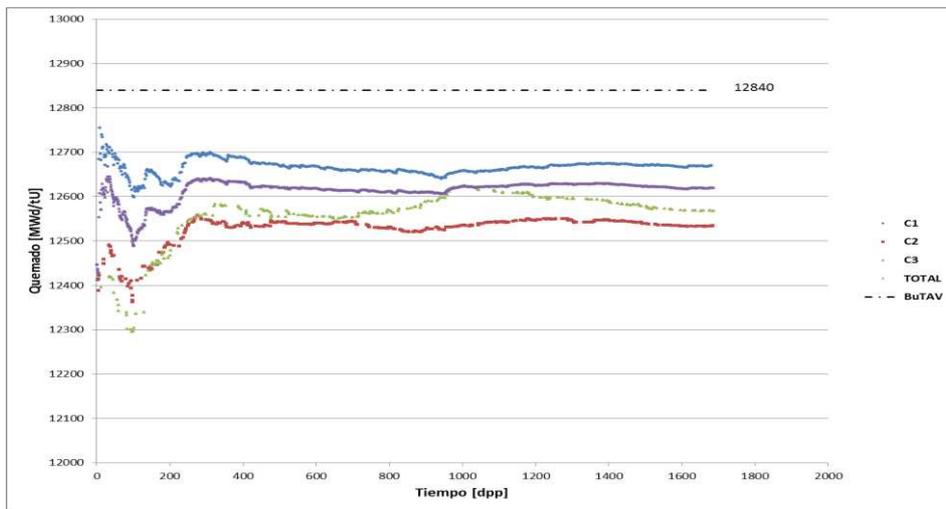


Figura 6: Evolución del quemado promedio total y por camino de irradiación.

El número de veces en que fue recambiado cada canal, i.e., la cantidad de veces que se extrajo un combustible del canal para ser trasladado a otra zona de quemado o para ser enviado a la piletta de combustibles gastados, según corresponda, se muestra en la Figura 7. Los valores en color negro corresponden a canales de la zona hidráulica 5, en marrón a la zona 4, en verde a la zona 3, en rojo a la zona 2 y en azul a la zona 1.

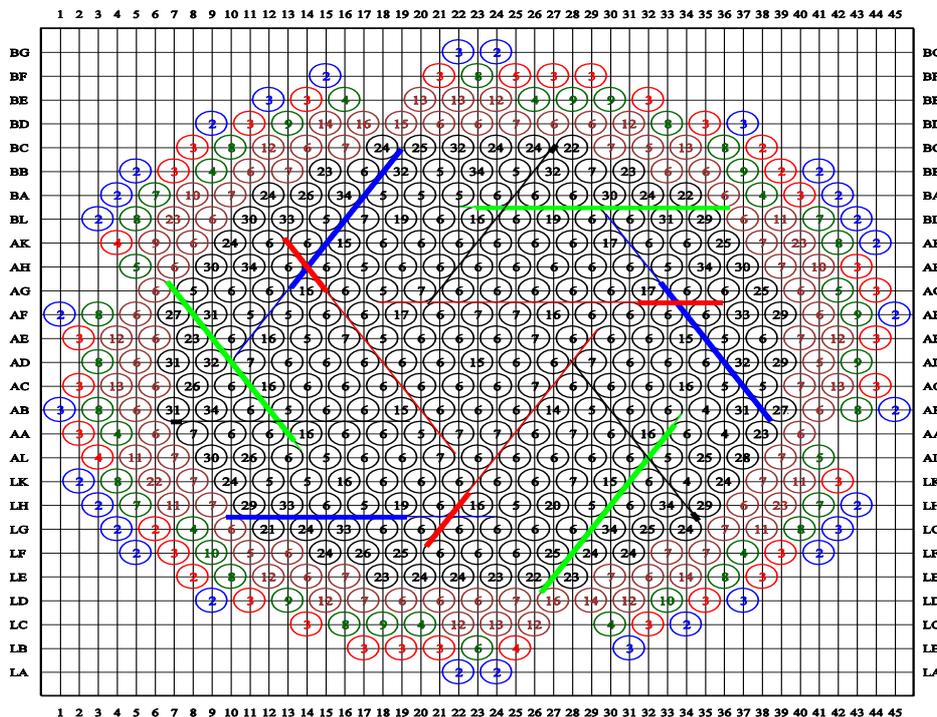


Figura 7: Cantidad de recambios durante la evolución completa.

Los canales de la periferia tienen la menor cantidad de recambios debido a que son en su mayoría canales de salida y la potencia es baja en el borde del núcleo, por lo tanto, los combustibles en estos canales se queman lentamente permaneciendo un tiempo prolongado en el canal. En cambio, la mayoría de los canales de entrada y de traslado del camino de irradiación 1 (ubicados en la periferia de la zona hidráulica 5) tienen gran cantidad de recambios debido a dos factores que generan una alta demanda de traslados de combustibles

desde estas zonas: el primero es que los canales de salida del camino 1 se encuentran en una región del núcleo de alta potencia y el segundo es que la cantidad de canales de salida en este camino es mucho mayor que la cantidad de canales en la zona de entrada y que la cantidad en la zona intermedia.

6 CONCLUSIONES

Se diseñó una estrategia de recambio para la gestión de combustible de Uranio Levemente Enriquecido al 0,85 % en peso para la Central Nuclear Atucha II. Esta consiste en 3 caminos de irradiación con 3 zonas cada uno, i.e, una zona de entrada, una de traslado y una de salida.

Se mostró mediante el método Time-Average y también con la simulación detallada de operaciones de recambio durante 1685,8 dpp (aproximadamente 4,6 años) que con núcleo en equilibrio, en el estado estacionario posterior a las operaciones de recambio, no se superan los límites de seguridad establecidos para la potencia de canal en las zonas hidráulicas y la máxima potencia lineal en todo el núcleo. Los límites considerados en este trabajo son los que se tienen actualmente para el combustible de Uranio Natural. Si el diseño del combustible levemente enriquecido implica que se deben ajustar los límites entonces se deberá reevaluar la estrategia diseñada.

Debido al incremento del quemado de extracción con la utilización de combustible ULE, se aumenta la cantidad de energía que se puede extraer diariamente por tonelada de Uranio. Esto redundaría en una reducción de aproximadamente 40 % en el consumo anual de EE.CC y por lo tanto, en la reducción del volumen de material irradiado. Además, la cantidad de visitas que debe hacer la máquina de recambio a los canales a recambiar se reduce en 8,9 % aproximadamente. Esto puede implicar una reducción en el costo por mantenimiento de la máquina y en la tasa de dosis recibida por el personal que realiza dichas tareas.

En la simulación detallada se realizaron cálculos estáticos con PUMA y por lo tanto, en este trabajo no se brinda información sobre los transitorios ocurridos durante una operación de recambio. Tampoco se analizaron fenómenos como el aumento de la moderación neutrónica al vaciar un canal durante una operación de recambio y el crecimiento del Xenón 135 en los combustibles que son extraídos momentáneamente para ser trasladados a otro canal que pueden conducir a establecer márgenes de seguridad para preservar la integridad de los elementos combustibles.

REFERENCIAS

- Clavero, F., Desarrollo de un programa para generar distribuciones de quemado instantáneas para el diseño de gestión de combustible ULE, BN-ND-014-2016; Gerencia de Análisis de Seguridad y Diseño del Núcleo, Unidad de Gestión Proyectos Nucleares, NA-SA, 2016.
- Grant, C., PUMA versión 4, Manual del Usuario, Reporte interno, CNEA, Buenos Aires, 2005.
- Halsall, M.J., WIMSD, A Neutronic Code for Standard Lattice Physics Analysis, NEA 1507/02, NEA Databank, 1997.
- Leszczynsky, F., López Almada, D. y Trkov A. (Editors), WIMS-D Library Update: Final Report of a Coordinated Research Project, STI/PUB/1264, Nuclear Data Section, IAEA, 2007.
- Marleau, G., Herbert A. y Roy R., A user guide for DRAGON_000331 release 3.04, Technical Report, IGE-174 Rev. 5, 2000.

- Mollerach, R., CNA-2: Update or the Fuel Managment Strategy due to a Reduction of the Outer Hydraulic Zones Channel Power Limit, Informe Técnico IT-FA/08/011, NA-SA, 2008.
- Mollerach, R., Higa, M., Silva, M., Fink, J., Revision of the fuel management studies of the Atucha-2 reactor. Implementation of an automatic refuelling simulation program, 23rd Canadian Nuclear Society's Nuclear Symposium, Ottawa, Canada, 2 al 4 de noviembre, 2008.
- Perez R., Piñeyro J., 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, IF-1200-ULE-IE-004, Proyecto ULE-AI, NA-SA, 1995.
- Schivo, M., Final Safety Analysis Report Chapter 4, Documento L-MA FSAR-000005 Rev. 1, NA-SA, 2012.