

SIMULACIÓN DE LA GESTIÓN DE COMBUSTIBLE DE EMBALSE CON SELECCIÓN AUTOMÁTICA DE CANALES

Martín S. Silva¹ y Ricardo J. Mollerach¹

¹Departamento Física y Análisis, Nucleoeléctrica Argentina S.A., Arribeños 3619, 1429 Buenos Aires, Argentina, msilva@na-sa.com.ar, <http://www.na-sa.com.ar>

Palabras Clave: Embalse, CANDU, gestión, combustible, recambio, automático.

Resumen. El reactor de la Central Nuclear Embalse (CNE) utiliza uranio natural como combustible y agua pesada como moderador y refrigerante. La operación de este tipo de reactores requiere el recambio de combustible en potencia para mantener la reactividad del núcleo. Como resultado de ese proceso las distribuciones de quemado y potencia se van modificando diariamente.

La estrategia de recambio de combustibles usada puede analizarse desde dos perspectivas. La primera consiste en estudiar el estado promediado en el tiempo del núcleo (método *Time Average*). Esa técnica permite analizar el efecto en el quemado de extracción y en la reactividad insertada por elementos de control, por cambios en el tipo de combustible o por otras perturbaciones del núcleo.

Para analizar los efectos locales en la distribución de potencia, sin embargo, es necesario simular explícitamente el proceso de recambio de combustibles. En general, una buena simulación debe demostrar que es posible recambiar todo el núcleo, lo que significa abarcar un período de tiempo equivalente a un año de plena potencia; del orden de 600 recambios.

Esa simulación es una tarea laboriosa ya que requiere la selección de canales para recambiar utilizando criterios bien establecidos, la prueba del recambio, simulando con el programa PUMA y, finalmente, la verificación del cumplimiento de requisitos operacionales (límites de potencia, niveles de controladores zonales, etc). La elección del mejor recambio, muchas veces, debe basarse en la experiencia de la operación. Normalmente, esta tarea se realiza de forma manual, ocupando al especialista gran cantidad de horas de trabajo.

En este trabajo se desarrolló un programa con capacidad para elegir canales candidatos al recambio y decidir mediante diferentes criterios cuál es el más adecuado para recambiar. Luego, simula el recambio con el programa PUMA y evalúa la nueva condición para verificar que se cumplen los requisitos operacionales.

Este proceso se repite de manera automática, permitiendo la simulación de la gestión de combustibles para períodos más o menos largos de tiempo, siempre que el programa encuentre candidatos que satisfagan los criterios de selección y los requisitos operacionales.

Los criterios utilizados, pueden modificarse de acuerdo a la situación del núcleo y están basados en la experiencia operativa. De alguna manera, intentan suplir el juicio experto del especialista. Una parte importante del trabajo presentado consiste en definir estos criterios.

La aplicación del programa desarrollado ha permitido simular hasta un año de plena potencia, realizando del orden de 600 recambios cumpliendo los requisitos operacionales, sin intervención del usuario, partiendo de diferentes situaciones iniciales. Se observa que, si bien la evolución depende del caso inicial, un ajuste adecuado de los criterios de selección garantiza el éxito de la simulación.

1. INTRODUCCIÓN

El reactor de la Central Nuclear Embalse (CNE) utiliza uranio natural como combustible y agua pesada como moderador y refrigerante. Este tipo de reactores requiere el recambio de combustible en operación a potencia para mantener la reactividad del núcleo. Como resultado de ese proceso de gestión del combustible las distribuciones de quemado y potencia en el núcleo se van modificando diariamente.

La gestión de los combustibles no solo es un medio para mantener crítico al núcleo sino que permite ajustar la distribución de potencia para maximizar la energía extraída a los combustibles, i.e. el quemado de extracción. El modo en que se recambian los combustibles se denomina estrategia de recambio.

La estrategia de recambio de combustibles usada puede analizarse desde dos perspectivas. La primera consiste en estudiar el estado promediado en el tiempo del núcleo (método *Time Average*). Esa técnica permite analizar el efecto en el quemado de extracción y en la reactividad insertada por elementos de control, por cambios en el tipo de combustible o por otras perturbaciones que son prácticamente independientes de la distribución de quemados instantánea del núcleo. Dicho de otro modo, el método *Time Average* permite analizar parámetros globales del reactor.

Para analizar los efectos locales en la distribución de potencia, sin embargo, es necesario simular explícitamente el proceso de recambio de combustibles. Esa simulación es una tarea laboriosa ya que requiere la selección de canales para recambiar utilizando criterios bien establecidos; luego, la prueba del recambio simulando con el programa **PUMA** (Grant, 2005) y, finalmente, la verificación del cumplimiento de requisitos operacionales (límites de potencia, niveles de controladores zonales, etc).

La elección del mejor recambio, muchas veces, debe basarse en la experiencia de la operación. Normalmente, esta tarea se realiza de forma manual, ocupando al especialista gran cantidad de horas de trabajo. En general, una buena simulación debe demostrar que es posible recambiar todo el núcleo, lo que significa abarcar un período de tiempo equivalente a un año de plena potencia; del orden de 600 recambios.

Para los trabajos de diseño nuclear de Atucha-II (CNA-2) se desarrolló el programa **REC_AUT** (Mollerach et al., 2008) capaz de simular la selección y el recambio de combustibles automáticamente. Sin embargo, el diseño del reactor, las estrategias de recambio y las formas de operación de CNA-2 y CNE son diferentes. En este trabajo se desarrolló un nuevo programa de recambio automático basado en **REC_AUT** y adaptado a las particularidades de CNE.

El programa desarrollado en este trabajo, llamado **REC_CNE**, elige canales candidatos al recambio y decide mediante diferentes criterios cuál es el más adecuado para recambiar. Luego, simula el recambio con el programa **PUMA** y evalúa el nuevo estado del núcleo para verificar que se cumplen los requisitos operacionales.

Este proceso puede repetirse de manera automática, permitiendo la simulación de la gestión de combustibles para períodos más o menos largos de tiempo, siempre que el programa encuentre candidatos que satisfagan los criterios de selección y los requisitos operacionales.

Los criterios utilizados, pueden modificarse de acuerdo a la situación del núcleo y están basados en la experiencia operativa. De alguna manera, intentan suplir el juicio experto del especialista. Una parte importante del trabajo presentado consistió en definir estos criterios.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL REACTOR DE CNE

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.

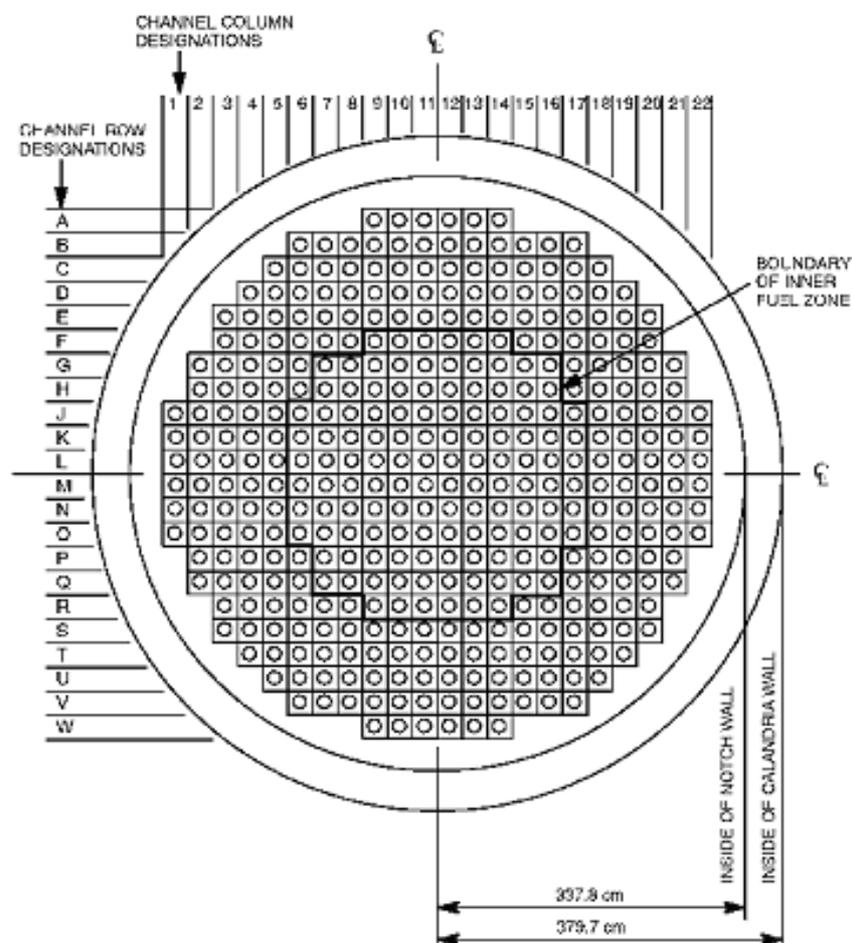


Figura 1: Disposición de los canales combustibles en un reactor CANDU

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). 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.

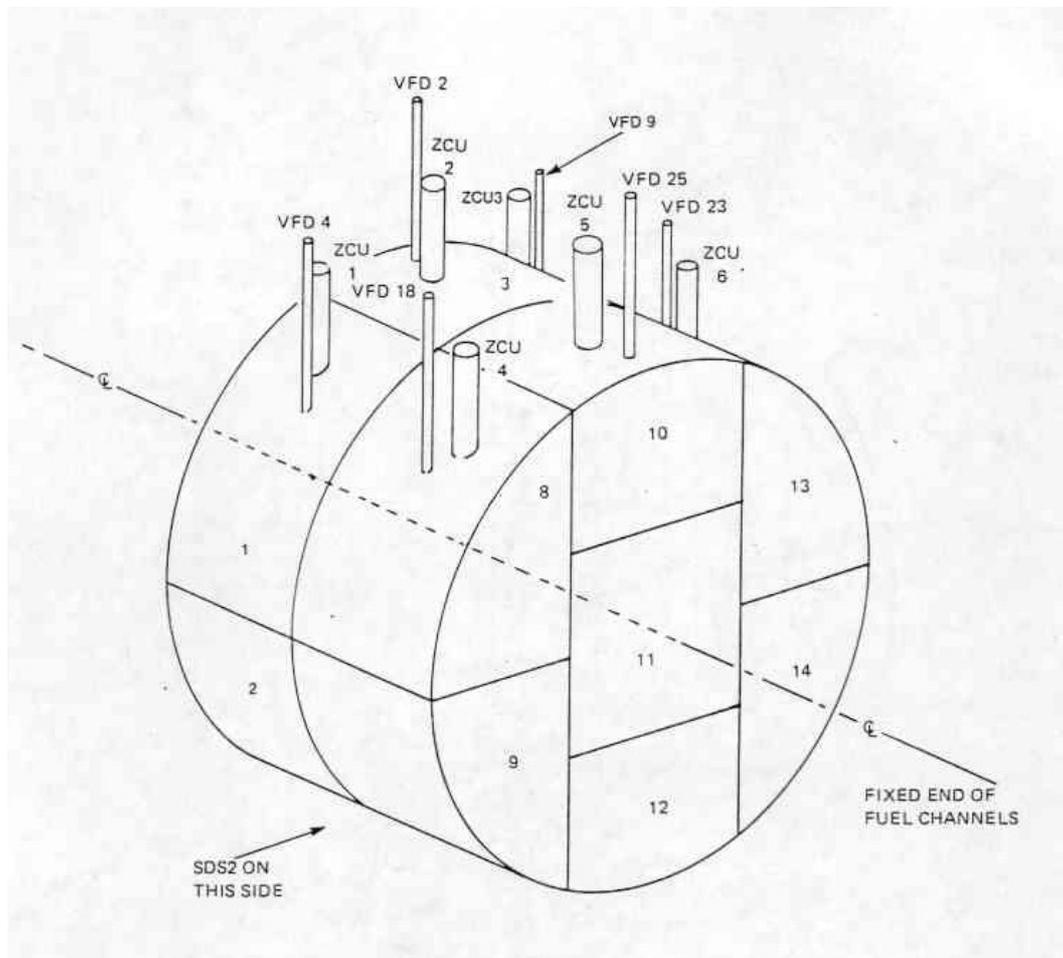


Figura 2: División del núcleo en zonas de controladores líquidos

3. METODOLOGÍA

El programa de selección automática fue desarrollado para trabajar acoplado con **PUMA** de modo que toda la información de potencias, flujos, quemados, irradiaciones y niveles de zonas líquidas son obtenidos directamente de sus resultados. **REC_CNE** no realiza ningún cálculo de propiedades sino que evalúa criterios basados en los estados de núcleo calculados por **PUMA** y almacenados en su base de datos (archivo MAESTRO).

3.1. Datos de entrada

Para iniciar el cálculo entonces es necesario contar con el estado inicial del reactor previamente calculado con **PUMA** y resguardado en su archivo MAESTRO. **REC_CNE** extrae de ese archivo toda la información del modelo y el estado de partida. Información sobre lado de carga de combustibles y agrupamientos de canales por zonas de influencia de controladores líquidos

y zonas de quemado es leída de archivos de datos adicionales. Esta información, en general es fija y no varía para diferentes estados del núcleo.

Finalmente, **REC_CNE** necesita los criterios de selección y de aceptación de recambios: niveles deseados de zonas líquidas, quemados de salida de cada zona, márgenes de potencias máximas de canales vecinos al candidato, porcentajes mínimos aceptables de quemados de extracción, etc. Todos estos datos se leen de un archivo. Adicionalmente, se puede leer una base de datos de cambios de niveles de zonas líquidas en función de la ganancia de reactividad de cada canal. Esta última información es útil para acelerar los cálculos.

3.2. Proceso de cálculo

Una vez leído el estado inicial del reactor del MAESTRO de **PUMA** se compara el nivel promedio de zonas líquidas con el nivel buscado. Si el nivel promedio es mayor que el nivel buscado se hace evolucionar al reactor. Si es menor se busca introducir un recambio. Esta comparación sólo se hace con el primer caso. Luego, siempre se evoluciona después de cada recambio.

El proceso de selección de canales para recambiar se presenta más adelante en la sección Selección de candidatos. Con el candidato seleccionado se realiza la simulación del recambio con **PUMA** y se evalúan los criterios de aceptación. Si no se cumplen, se busca otro candidato. Si el recambio es aceptado, se guarda el MAESTRO de ese caso y se procede a evolucionar en el tiempo.

El tiempo de evolución entre dos recambios se estima con el cambio de nivel promedio de las zonas líquidas por día de plena potencia (dpp) dado como dato. Se estima cuánto tiempo se debe evolucionar desde el nivel de zonas líquidas actual hasta el nivel buscado, con una banda de aceptación hacia abajo.

Una vez definido el tiempo de evolución, se ejecuta el caso de **PUMA** correspondiente, se revisan los niveles de zonas líquidas resultantes y se comienza el proceso de selección de recambios para el nuevo estado.

Este proceso se repite hasta que se haya realizado la cantidad de recambios requerida en la entrada de datos a menos que ningún candidato cumpla los requisitos pedidos, en cuyo caso el programa se detiene.

Ajuste del tiempo de evolución mínimo

El tiempo de evolución entre recambios se calcula partiendo del decremento de nivel promedio de zonas líquidas por día de plena potencia. Se estima cuánto tiempo se puede operar sin recambiar antes de que las zonas alcancen el nivel mínimo requerido.

Si el tiempo de evolución estimado es mayor que un máximo estipulado o menor que un mínimo, se utilizan esos valores extremos. Además, si el nivel mínimo de alguna zona líquida está por debajo del umbral mínimo aceptado se evoluciona el tiempo mínimo para evitar que la zona caiga demasiado.

Por cuestiones numéricas, y para evitar errores de redondeo, el tiempo de evolución mínimo debe ser lo suficientemente grande como para que los resultados del cálculo luego de la evolución se diferencien de los valores antes de la evolución. Esto último es importante sobre todo para el ajuste de zonas líquidas. Se observa de las simulaciones, que un tiempo de 0,2 dpp a veces produce incrementos en el nivel promedio de zonas líquidas cuando debería ocurrir lo contrario. Cuando el tiempo de evolución es de 0,3 dpp, los resultados responden de manera adecuada a la física del problema.

Por otro lado, considerando los tiempos típicos de la planta, se toma como valor máximo de evolución 0,7 dpp ya que, en operación normal, se deben hacer 2 recambios por día para mantener el nivel de zonas líquidas. Si se permiten tiempos de evolución mayores, puede suceder que algunas zonas individuales caigan demasiado, no pudiéndose recuperar luego.

3.3. Selección de candidatos

La selección de candidatos comienza con la revisión de la lista de canales más quemados en la zona definida por el par de controladores líquidos anterior y posterior (ver Figura 2). Para cada una, se buscan los canales que verifican los siguientes requisitos:

1. Quemado de los ocho manojos que salen mayor que el límite inferior de quemado de extracción.
2. Potencia de los primeros cuatro canales vecinos menor que el límite.
3. Potencia de canal de los cuatro segundos vecinos menor que el límite anterior más el 1 %.
4. Potencia de manajo de los ocho primeros vecinos menor que el límite.
5. Separación en días de plena potencia desde el último recambio en canal vecino, menor que el límite.

Los criterios 2 al 5 tienen por objetivo evitar recambios que produzcan sobrepotencias en los canales vecinos. En general, la elección de canales que no cumplen esos requisitos implica simular con **PUMA** estados que, muy probablemente, fallarán en los criterios operacionales a posteriori. Excluirlos en esta etapa evita cálculos innecesarios y acelera la simulación.

A continuación se estiman los parámetros relevantes luego del recambio: niveles de zonas líquidas y potencias máximas de canal y de manajo. La ganancia en reactividad luego del recambio y la potencia del canal después de recambiado; los niveles de zonas líquidas se obtienen interpolando linealmente en una base de datos con la ganancia en reactividad. Si el canal no figura en la base de datos o no se estimaron las ganancias en reactividad, se simula el recambio con **PUMA**. Si los niveles de zonas líquidas estimados o calculados cumplen los criterios impuestos, el canal queda preseleccionado como candidato a ser recambiado.

Si una zona tiene pocos candidatos (menos de 5), se pueden conseguir más relajando los criterios. Esos criterios relajados son dados también en la entrada de datos. Los canales que quedan preseleccionados de esta forma son penalizados a posteriori para que queden con menores posibilidades de selección.

3.4. Elección del canal a recambiar

El objetivo primordial de la gestión de combustible, además de mantener el reactor crítico, es conservar una distribución de potencia lo más plana posible, de modo que todos los combustibles tengan la misma utilización. En coincidencia con ese objetivo, los niveles de controladores líquidos se ajustan automáticamente para que la potencia promedio de la zona se mantenga estable e igual a un valor de referencia.

A medida que el combustible se consume, la reactividad disminuye. Esa pérdida de reactividad es compensada automáticamente por el descenso en el nivel de agua de los controladores líquidos. Ese proceso ocurre tanto global como zonalmente. Aquellas zonas con combustible más quemado, i.e. con menor reactividad, tendrán niveles zonales más bajos.

Uno de los objetivos principales para elegir candidatos es tratar de mantener los controladores zonales parejos y por encima de cierto nivel, garantizando una reserva de reactividad adecuada. Cuando se introduce reactividad en una zona por medio del recambio de combustible, los controladores zonales aumentan su nivel, sobre todo, el de la zona de influencia del canal recambiado.

Por otro lado, es importante extraer los combustibles con quemado lo más cercano posible al de extracción para asegurar una buena utilización del combustible y para maximizar la ganancia de reactividad del núcleo luego del recambio.

Teniendo en mente estas premisas, se desarrolló el algoritmo de selección de canales para recambiar. En una primera etapa del trabajo, siguiendo el modelo de CNA-2, se recambiaba el canal más quemado dentro de la zona con menor nivel. Esta estrategia, sin embargo, no resulta adecuada debido a que se descuidan los controladores de las demás zonas, produciendo una deriva de sus niveles hasta la saturación. Más aún, en zonas con bajo quemado, rápidamente se agotan los candidatos que cumplen los criterios de quemados y el programa ya no tiene posibilidad de encontrar recambios posibles.

Para evitar esta situación se modificó la metodología de manera que el programa busque candidatos entre todos los canales que cumplen los requisitos de recambio en todas las zonas y, luego, mediante algún criterio, elige cuál es el recambio más conveniente.

3.4.1. Desviación estándar de los niveles de controladores

Una forma de mantener los niveles de zonas líquidas cercanos a los valores de referencia es realizar el recambio que minimiza la diferencia cuadrática media (RMS) entre el nivel de zona luego del recambio y el nivel de referencia. Se puede tomar como referencia el nivel de zonas promedio buscado.

Este criterio asegura que el recambio elegido será el que deje los niveles de zonas más cerca del promedio o, dicho de otro modo, que ninguna zona se alejará demasiado de las otras, de modo que no se producirán grandes desbalances.

La desventaja de utilizar sólo este criterio es que no asegura que se levantarán los niveles de las zonas más bajas. Las simulaciones realizadas demuestran que si el nivel de algún controlador cae demasiado porque la zona está muy quemada, aun manteniendo un bajo error RMS, se agrava el desbalance de zonas con cada recambio.

Adicionalmente, si se permiten criterios relajados, ocurre, en general, que el recambio de canales con quemado menor que el necesario resulta en un menor error RMS y, por lo tanto son elegidos frente a canales con alto quemado. El resultado final es que el quemado medio del núcleo disminuye mientras que algunos canales permanecen en el núcleo con quemados muy altos, del orden del 150 % del de extracción.

3.4.2. Incremento en el nivel de la zona más baja

De la experiencia anterior surge que es necesario priorizar canales que aumenten el nivel de la zona líquida más baja. Para eso, se evalúa el incremento en la zona líquida más baja de cada recambio. Este criterio se suma al del error cuadrático medio y al criterio de quemado máximo. La lista de candidatos obtenidos se ordena por cada uno de los criterios y, luego, se suman los números de orden para obtener un único valor. Aquel que tiene el valor más pequeño, de alguna manera, ha quedado en los primeros puestos de cada una de las listas y, por lo tanto, califica

como mejor candidato. Esta forma de ordenamiento no prioriza ninguno de los criterios sino que es una ponderación integral.

3.4.3. Distancia de la zona recambiada al promedio

En algunas situaciones ocurre que se introducen recambios en zonas con un nivel muy alto respecto al promedio, resultando en una gran elevación del nivel de la zona y un descenso de las zonas bajas. Para evitar este efecto, se incluye un criterio que evalúa la distancia de la zona recambiada al promedio. Aquellas zonas que estén más bajas respecto del promedio, serán privilegiadas a la hora de elegir. Por el contrario, las zonas que tengan un nivel muy alto quedarán abajo en el orden de mérito.

3.4.4. Desbalance axial de los niveles en la zona recambiada

Los resultados de las simulaciones aplicando los criterios hasta aquí mencionados muestran un buen comportamiento. Sin embargo, pueden observarse desbalances axiales de las zonas líquidas anteriores y posteriores que pueden darse alternados de tal forma que no pueden recuperarse. Es por esto que se incorporó un parámetro que es el desbalance de nivel de las dos zonas recambiadas, dándole prioridad a aquellos recambios que lleven los niveles zonales a un estado lo más equilibrado posible.

La utilización de este criterio mejora la evolución global de las zonas, sin embargo no puede lidiar con el efecto tardío del pico de plutonio de los canales recién recambiados. Por otro lado, en ocasiones, puede penalizar los canales con alto quemado que introducen grandes cambios en los niveles zonales.

3.4.5. Penalización por criterios relajados

Los canales pueden ser elegidos como candidatos utilizando criterios relajados, es decir, permitiendo quemados menores que el quemado de salida buscado o admitiendo potencias de canales vecinos mayores que las estipuladas o vecinos recambiados recientemente. Estos canales pueden ser recambiados si cumplen los requisitos adecuados, sin embargo, en igualdad de condiciones, siempre se prefiere un canal que cumple los criterios más restrictivos. Para penalizar a los canales que fueron elegidos con criterios relajados, se agrega un nuevo parámetro que vale 1 o 0 dependiendo si hubo o no relajación de criterios. Luego, se suma con su peso respectivo al orden de mérito.

En general, alcanza con el peso básico unitario. Ya que el orden de mérito de quemados deja relegados a los canales con quemados bajos y los que exceden límites de potencia son rechazados durante la simulación del recambio.

3.4.6. Ganancia en reactividad

En ocasiones puede ser necesario priorizar canales que maximicen la ganancia en reactividad luego del recambio. Este parámetro también se incluye como criterio aunque, en general, no es necesario su uso.

3.5. Orden de méritos

Para evaluar la conveniencia de recambiar el combustible en cada canal candidato se evalúan los parámetros mencionados en los párrafos anteriores:

1. Quemado medio de los 8 manojos que salen ($qsal$).
2. Incremento del nivel de la zona más baja ($dzmin$).
3. Dispersión cuadrática media de zonas respecto del promedio (RMS).
4. Diferencia entre el nivel de la zona recambiada y el promedio ($zimax$).
5. Desbalance entre los niveles de zona anterior y posterior (axi).
6. Criterios relajados ($relax$).
7. Ganancia de reactividad ($deltaro$).

Luego, a cada canal preseleccionado se le da un número de orden por cada uno de esos parámetros. Es decir, se ordenan en orden decreciente de quemado de modo que el más quemado tiene el número 1, el segundo el 2, etc.; luego, se ordenan por el incremento (o decremento) de nivel que el recambio produce en la zona líquida más baja, donde el que mayor incremento produce tiene el número 1 y el que menos, el número de candidatos; etc. En la Tabla 1 se presentan los parámetros evaluados y el ordenamiento correspondiente de los candidatos.

Tabla 1: Criterios de selección de canales y su modo de ordenamiento

	Parámetro	Orden	Primer elemento
1	Quemado	decreciente	Más quemado
2	Incremento ZL	decreciente	Mayor incremento
3	Error RMS	creciente	Menor RMS
4	Distancia	decreciente	Zona más baja
5	Desbalance axial	decreciente	Menor desbalance
6	Crit. relajado	creciente	No relajados
7	Ganancia	decreciente	Mayor ganancia

Cada uno de estos parámetros puede ser utilizado como criterio de selección y puede ser activado, desactivado o darle un peso por medio de la entrada de datos. El valor de peso cero indica criterio desactivado.

Una vez que los candidatos tienen un orden de mérito por cada parámetro evaluado, se genera un orden de méritos general realizando la suma pesada de los méritos de cada parámetro.

El canal que obtiene la menor suma es el candidato elegido para el recambio. Se realiza la simulación del recambio y se verifica que cumpla niveles de zonas líquidas y potencias admitidas. Si se cumplen, se acepta el recambio y se evoluciona. Si no, se sigue con el candidato que haya tenido el segundo menor valor de suma y así hasta completar todos los candidatos. Si se acaban los candidatos y no se consiguió ningún recambio adecuado, se inicia nuevamente el proceso desde el primer candidato del orden de méritos relajando un 1 % los niveles permitidos de zonas líquidas. Este proceso de relajación de niveles de zonas se puede realizar mientras las zonas estén en un rango límite permitido (usualmente de 5 % a 90 %). Si aún así no se encontraron recambios el programa se detiene.

3.5.1. Peso adicional para zonas con nivel bajo

En muchas situaciones con niveles muy bajos en las zonas (por debajo del límite operativo) el programa elige recambios que, si bien levantan la zona en cuestión, también aumentan los niveles de zonas opuestas, manteniendo la disparidad global. En estos casos es preferible que se introduzcan recambios en la zona baja aun desatendiendo los demás criterios.

Para esto, se incluyó la adición de un peso adicional al criterio de zona con nivel bajo, de manera de priorizar a los canales que más aumentan el nivel del controlador más bajo; en general son canales que están en esa misma zona.

El efecto del peso adicional es la separación de los candidatos en el orden de mérito por zona líquida, haciendo que los demás parámetros tengan menor influencia. De los estudios realizados se concluyó que un peso igual a 4 da los mejores resultados.

Este peso adicional también se activa en el caso en que alguna zona haya bajado muy rápido entre dos casos sucesivos. Se calcula la tasa de disminución de nivel por dpp y se compara con un valor de referencia dado por entrada de datos. Si se supera la derivada máxima, se activa el peso adicional por nivel de zona baja.

3.5.2. Tratamiento para canales con quemado muy alto

Cuando aparecen canales que se queman demasiado y no son recambiados porque quedan relegados en el orden de méritos, se aplica un peso adicional al criterio del quemado. De esta manera, se consigue que el canal ascienda en el orden de méritos. Se plantea una estrategia de aumento de pesos escalonada. En particular, se duplica el peso para cuando hay canales con quemados mayores al 120 % de extracción y se triplica si el quemado alcanza el 130 %. Si bien esto tampoco asegura que se introduzcan inmediatamente los canales más quemados, aumenta su prioridad.

Inicialmente se probó multiplicando por 4 el peso del quemado cuando hay canales con quemados mayores al 120 %. El resultado fue un rápido recambio de muchos canales muy quemados. Sin embargo, al haber algunos canales que a pesar de su alto quemado no pueden recambiarse porque violan algunos criterios, el peso adicional se mantiene durante mucho tiempo, privilegiando el recambio de canales con alto quemado y sin prestarle atención a los demás criterios. El resultado neto no es mejor que en los casos anteriores.

Luego, se trabajó con un factor 2. En este caso, los niveles de zonas líquidas mejoraron aunque se mantuvieron canales con alto quemado.

Finalmente, se decidió utilizar la estrategia escalonada antes mencionada, que mejoró los resultados. Con esta última estrategia se logró simular el recambio de todos los canales del núcleo.

3.6. Impresión de resultados

El programa **REC_CNE** entrega dos archivos principales de salida con el resumen de las operaciones de recambio y los criterios tomados. Además guarda registro de los estados de cada caso simulado.

Los primeros dos archivos consisten en una salida detallada y una tabla de operaciones. La salida detallada presenta el detalle de la elección de cada candidato a ser recambiado, la evaluación de los criterios y su resultado y, finalmente, la elección del candidato adecuado a ser recambiado. Esta salida es muy extensa y no es práctica para la rápida visualización de los resultados. Para eso se presenta la tabla de operaciones que presenta un detalle de cada operación de

recambio o de evolución efectuada. En el caso de los recambios, se muestra el nombre y quemado del canal recambiado, los niveles de zonas líquidas luego del recambio, potencias máximas y ubicación, etc. En el caso de la evolución, se muestran los mismos parámetros relevantes de potencias y zonas líquidas y se muestra el tiempo de evolución.

4. RESULTADOS

El programa desarrollado fue utilizado para simular la gestión de combustibles de manera automática partiendo de diferentes estados iniciales realistas de la planta.

En el primer caso analizado (G8520) se lograron simular 334,8 dpp, con 594 operaciones de recambio en 380 canales, es decir, se recambiaron todos los canales del núcleo. En 214 canales se realizaron dos operaciones de recambio. La Figura 3 muestra el mapa del núcleo con la cantidad de recambios en cada canal.

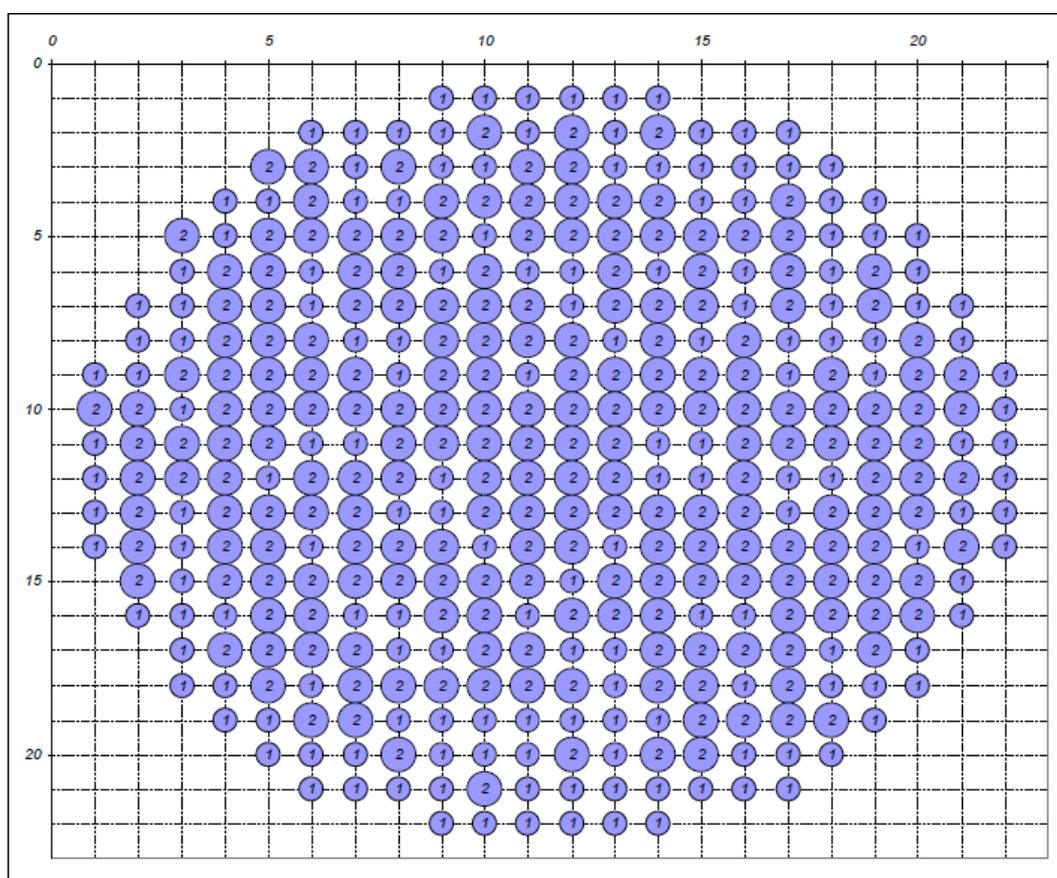


Figura 3: Mapa de operaciones de recambio realizadas en el núcleo para el caso 8520

En la Figura 4 se presenta la evolución del quemado medio del núcleo y del quemado de extracción de los combustibles recambiados. En la Figura 5 se muestran los niveles promedio, máximo y mínimo de los controladores zonales.

Las Figuras 6 a 8 muestran los mismos resultados anteriores iniciando la simulación con el caso de planta G8670. Este caso se inicia con un quemado medio del núcleo alto, es decir, con poca reactividad, y se evoluciona reduciendo el quemado medio aumentando el nivel promedio de zonas líquidas. Esta simulación consiste de 575 operaciones de recambio en 376 canales (302 dpp), con 199 canales recambiados dos veces.

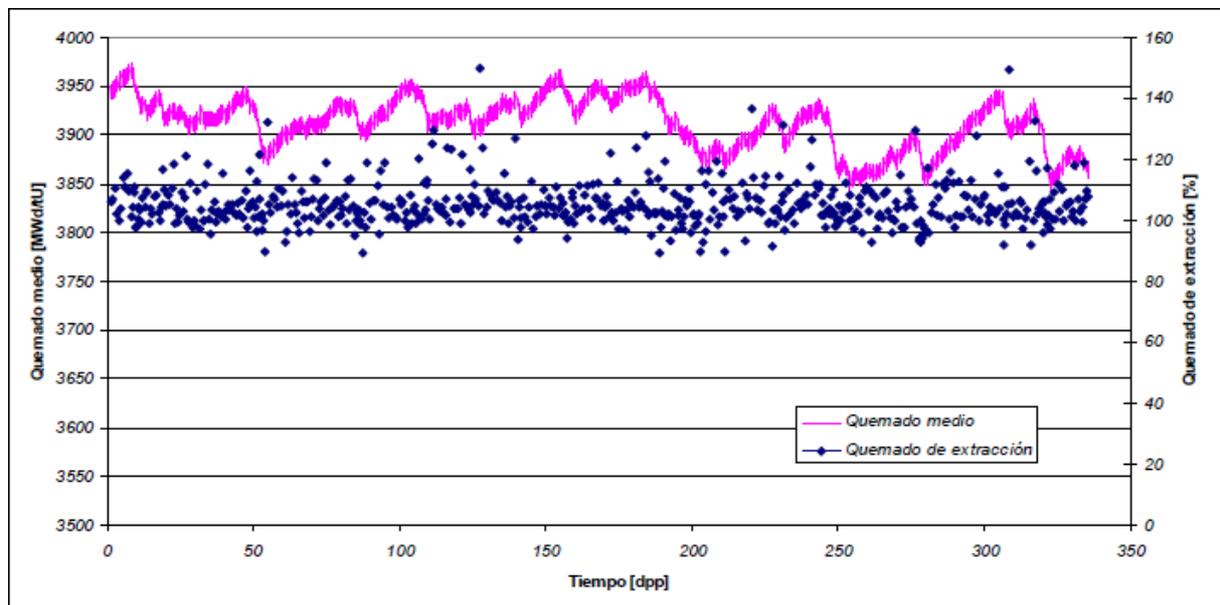


Figura 4: Evolución del quemado medio y de extracción para la simulación del caso 8520

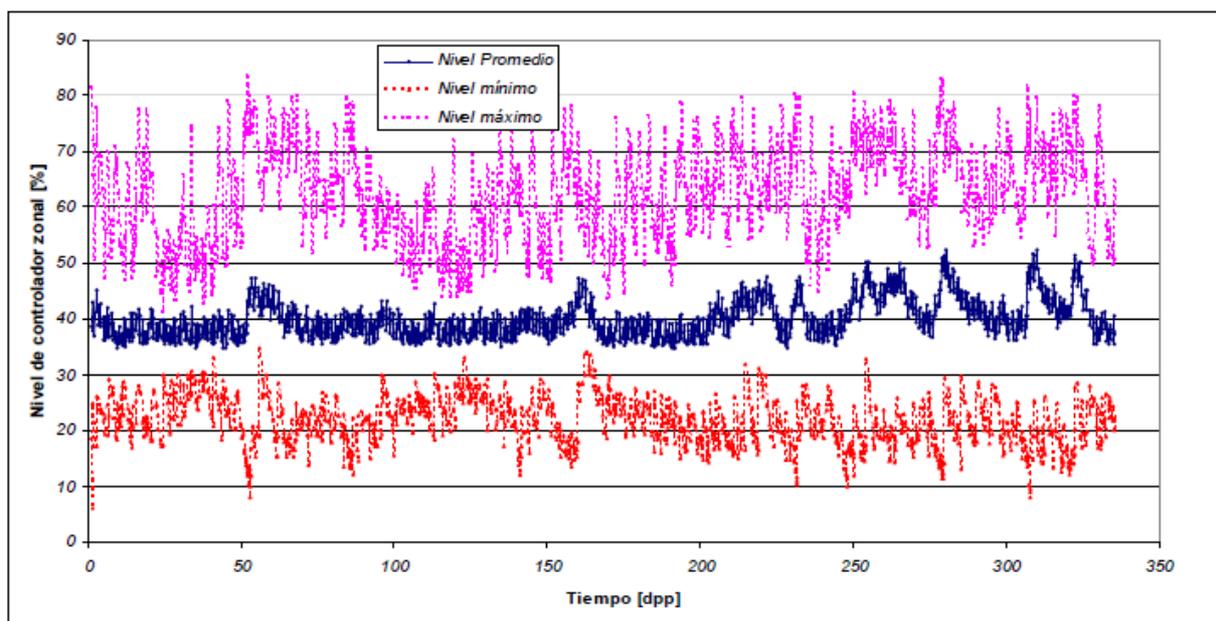


Figura 5: Evolución de los controladores zonales para el caso 8520

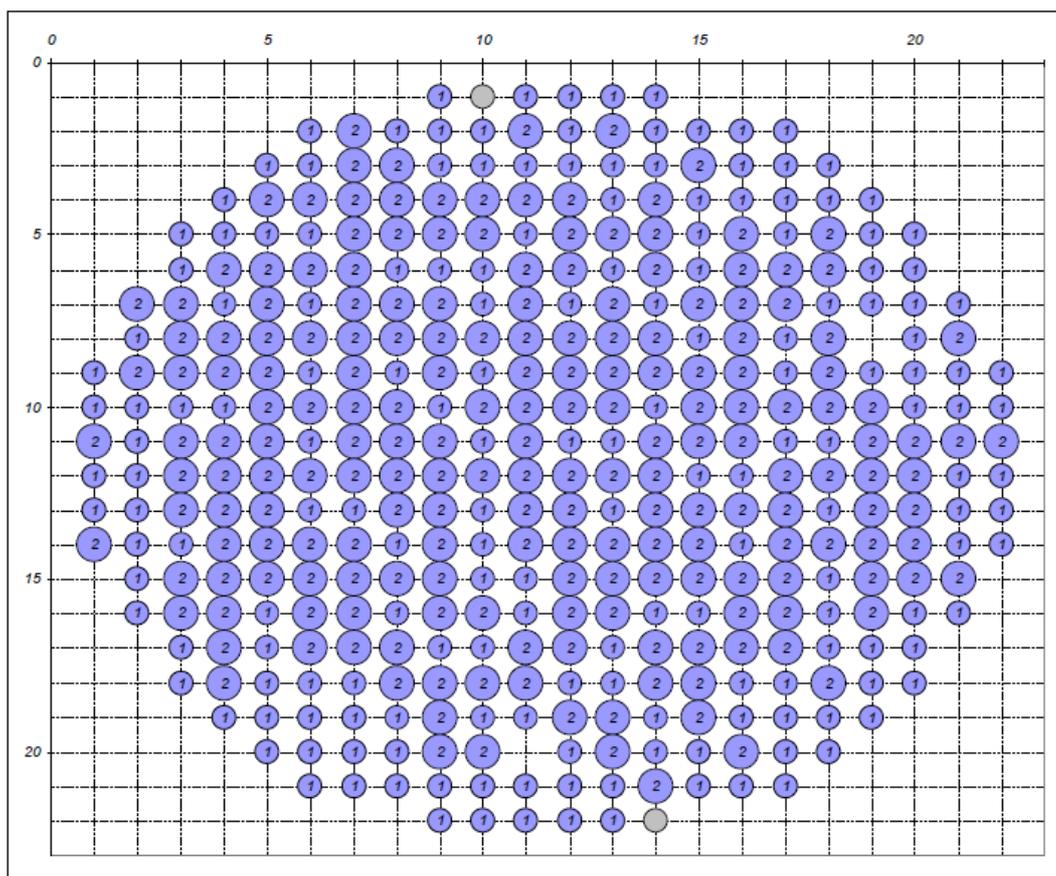


Figura 6: Mapa de operaciones de recambio realizadas en el núcleo para el caso 8670

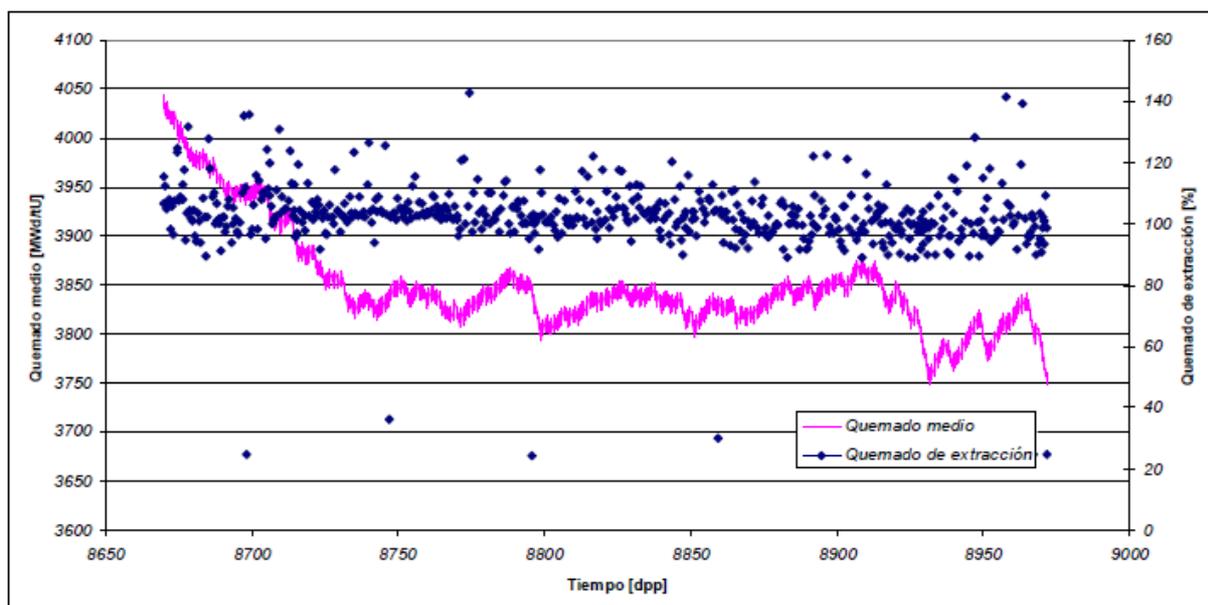


Figura 7: Evolución del quemado medio y de extracción para la simulación del caso 8670

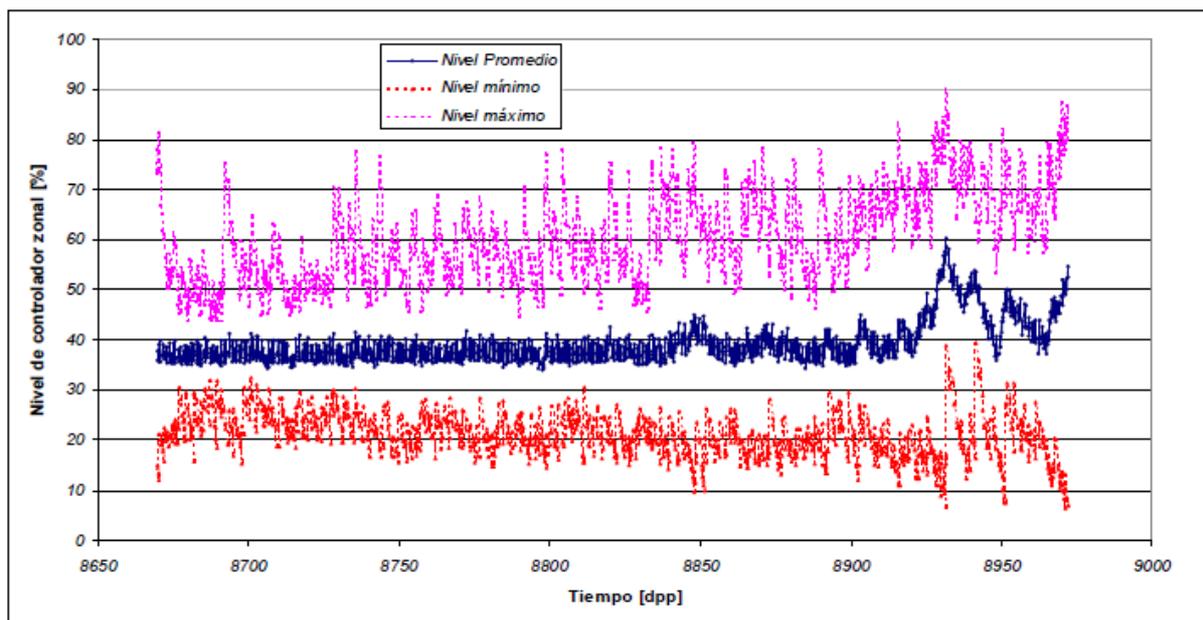


Figura 8: Evolución de los controladores zonales para el caso 8670

5. CONCLUSIONES

El programa desarrollado en este trabajo, llamado **REC_CNE**, elige canales candidatos al recambio y decide mediante diferentes criterios cuál es el más adecuado para recambiar. Luego, simula el recambio con el programa **PUMA** y evalúa el nuevo estado del núcleo para verificar que se cumplen los requisitos operacionales.

Este proceso puede repetirse de manera automática, permitiendo la simulación de la gestión de combustibles para períodos más o menos largos de tiempo, siempre que el programa encuentre candidatos que satisfagan los criterios de selección y los requisitos operacionales.

Los criterios utilizados, pueden modificarse de acuerdo a la situación del núcleo y están basados en la experiencia operativa. De alguna manera, intentan suplir el juicio experto del especialista. Una parte importante del trabajo presentado consiste en definir estos criterios.

La aplicación del programa desarrollado ha permitido simular el recambio de todos los combustibles del núcleo, realizando del orden de 600 recambios cumpliendo los requisitos operacionales, sin intervención del usuario, partiendo de diferentes situaciones iniciales. Se observa que, si bien la evolución depende del caso inicial, un ajuste adecuado de los criterios de selección garantiza el éxito de la simulación.

REFERENCIAS

- Grant C. Manual del código puma versión 4. Manual C.RCN.MUS.059, CNEA, 2005.
 Mollerach R., Silva M., Higa M., y Fink J. Revision of the fuel management studies of the atucha-2 reactor. implementation of an automatic refuelling simulation program. En *23 Canadian Nuclear Society's Nuclear Simulation Symposium*. 2008.