



MX0500305

XVI Congreso Anual de la SNM y XXIII Reunión Anual de la SMSR
XVI SNM Annual Meeting and XXIII SMSR Annual Meeting
Oaxaca, Oaxaca, México, Julio 10-13, 2005 / Oaxaca, Oaxaca, México, July 10-13, 2005

Desarrollo de un Programa de Cómputo de Cálculo Rápido para el Prediseño de Celdas de Combustible Nuclear Avanzado 10x10 para Reactores de Agua en Ebullición

R. Perusquia, J. L. Montes, J. J. Ortiz
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Km. 36.5 Carr. México-Toluca, Ocoyoacac, Edo. De Méx.
mrpc@nuclear.inin.mx; jlmt@nuclear.inin.mx; jjortiz@nuclear.inin.mx

Resumen

En el ININ se desarrolla una metodología para optimizar el diseño de celdas 10x10 de ensambles combustibles para reactores de agua en ebullición o BWR. Se propuso una fórmula de cálculo lineal basado en una matriz de coeficientes (de la razón de cambio de la potencia relativa debido a cambios en el enriquecimiento de U-235) para estimar las potencias relativas por pin de una celda. Con ésta se desarrolló el programa de cómputo de cálculo rápido PreDiCeldas. El cual mediante un algoritmo de búsqueda sencillo permite minimizar el pico de potencia relativo máximo de celda o LPPF. Esto se logra variando la distribución de U-235 dentro de la celda, manteniendo a su vez fijo su enriquecimiento promedio. La precisión en la estimación de las potencias relativas por pin es del orden del 1.9% al compararlo con resultados del código "best estimate" HELIOS. Con el PreDiCeldas fue posible, en un tiempo de cálculo mínimo, re-diseñar una celda de referencia disminuyendo el LPPF, al inicio de la vida, de 1.44 a un valor de 1.31. Con el diseño de celda con bajo LPPF se pretende diseñar ciclos aún más extensos que los alcanzados actualmente en los BWR de la Central Laguna Verde.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha desarrollado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares un programa de cómputo de cálculo rápido para apoyar en las tareas del diseño de ensambles combustibles nucleares avanzado para las recargas de núcleo de los reactores de agua en ebullición (o BWR's por sus siglas en inglés) de la Central Laguna Verde (CLV).

La operación de los BWR, se divide en ciclos, al término de cada ciclo se detiene la operación del reactor e inicia la etapa de recarga de combustible. Del orden de un cuarto de los combustibles del núcleo, preferentemente los más gastados, son remplazados por ensambles combustibles frescos.

En los siguientes apartados se explicarán los principales aspectos del diseño de un ciclo de combustible de los BWR's. Después, se expone la metodología de cálculo rápido formulado para estimar la potencia relativa de cada uno de los elementos combustible (pin) de una celda 10x10. Estas celdas forman parte del combustible nuclear avanzado del tipo actualmente utilizado en los

reactores de la CLV. Posteriormente se comentan aspectos del código de cómputo PreDiCeldas desarrollado de acuerdo al método de cálculo establecido en el apartado anterior. Para después mostrar los resultados obtenidos con PrediCeldas al re-diseñar una celda de combustible típica. La celda diseñada se simuló con el código “best estimate” HELIOS y con base a sus resultados se estimó la precisión de PreDiCeldas para calcular las potencias relativas por pin. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas al aplicar al programa PreDiCeldas al prediseño de celdas de combustible nuclear para la CLV y las perspectivas que se generan con el desarrollo del método de cálculo matricial en el análisis de las celdas de combustible nuclear.

2. DISEÑO DEL CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR

Durante la etapa del diseño del ciclo se determina la distribución dentro del núcleo de los ensambles combustibles tanto frescos como gastados, de forma tal, que cumplan con las metas de obtención de energía impuestas para el ciclo en el programa de utilización de energía (PUE) de la CLV junto con las estrategias de operación requeridas por la planta. Además para llevar a cabo el diseño del ciclo es necesario establecer los márgenes de diseño a los límites de los principales parámetros termohidráulicos y de reactividad que garanticen, en toda circunstancia previsible, una operación segura del reactor.

Los diseñadores del ciclo disponen de códigos de cómputo para la simulación de la operación del ciclo en condicione estáticas y dinámicas. Con ellos pueden estimar los márgenes de seguridad a los límites de las principales variables, tanto termohidráulicos como de reactividad, y llevar a cabo los análisis de transitorios anticipados impuestos por normatividad.

El diseñador debe contar con el seguimiento operativo de los ciclos previos para determinar el estado de los ensambles combustibles al final del ciclo previo. Con base a esto, en una primera instancia, fija el número de ensambles gastados a descargar seleccionando preferentemente los más gastados (o menos reactivos) y remplazándolos con combustibles frescos de recarga. Deberá establecer las características “promedio” del combustible de recarga, como son el enriquecimiento de U-235 promedio del ensamble así como el contenido y concentración promedio de gadolinia (Gd_2O_3) o veneno quemable que se coloca dentro de los elementos combustibles para controlar el exceso de reactividad durante el ciclo.

Una vez fijado el número de ensambles combustibles frescos, el enriquecimiento de U-235 y del gadolinio, el diseñador, mediante códigos de tres dimensiones, simula la operación del ciclo tratando de cumplir con las metas de producción de energía y controlar durante todo el ciclo la reactividad del núcleo. Un exceso de reactividad en el núcleo no permitiría un apagado rápido y seguro del reactor. Mientras que un defecto no permitiría alcanzar los requerimientos de energía programados. Además, en todo momento de la operación, se deberá garantizar que los principales parámetros termohidráulicos estén dentro de los márgenes de diseño establecidos.

La complejidad del diseño del ciclo conlleva a tener que dividirlo en etapas. En una primera aproximación al diseño del ciclo se tienen las siguientes:

- a) Diseño del ensamble combustible, relacionado con la distribución del enriquecimiento de U-235, y contenido de la gadolinia dentro de las celdas de combustible y la zonificación axial del ensamble,

- b) Diseño de la recarga del núcleo, que involucra determinar la fracción de recarga y la distribución de los combustibles en el núcleo.
- c) Diseño operacional del ciclo, donde se aborda la formación del patrón de barras de control y del caudal de recirculación durante el ciclo en operación nominal, y de baja paulatina de la potencia o coastdown.
- d) Pre-diseño de ciclos futuros ó análisis de multiciclos.

El análisis de multiciclos es indispensable llevarlo a cabo debido a que un combustible permanece durante tres o cuatro ciclos dentro del núcleo del reactor. Por lo que es necesario estudiar los siguientes ciclos y demostrar que el combustible (en particular el fresco introducido en el ciclo de diseño) será descargado con quemados menores a los máximos permisibles y que la reactividad de los combustibles gastados será adecuada para cumplir con las metas de energía programadas en el PUE. Un quemado excesivo o deficitario del combustible podría hacer inviable cumplir con las metas de generación de energía de los ciclos futuros.

A través de la experiencia acumulada en la operación de ciclos de los BWR en todo el mundo se van estableciendo las estrategias de operación y de diseño que a la larga se convierten en modos estándar. En la CLV en los ciclos más recientes se están aplicando las siguientes estrategias:

- a) Diseño de núcleos con baja fuga o estrategia LLL (Low Leakage Loading)
- b) Diseño y operación de Núcleos con Celdas de Control, estrategia CCC (Control Cell Core).
- c) Diseño y operación con desplazamiento espectral o estrategia SS (Spectral Shift).

La estrategia LLL relacionada con la fuga axial de neutrones en el núcleo se logra al colocar en los extremos de los ensambles combustibles uranio natural como zonas tapón. Esto tiene como objeto disminuir la fuga axial de neutrones y disminuir los costos de enriquecimiento del ensamble combustible. La estrategia LLL relacionada con la fuga radial de neutrones en el núcleo se alcanza al colocar los ensambles combustibles más gastados en la periferia del núcleo. Esto a su vez mitiga la fluencia de neutrones sobre la vasija de presión del reactor contribuyendo a alargar su vida útil.

La estrategia SS se cumple principalmente mediante dos técnicas. La primera es operacional y consiste en operar la primera mitad del ciclo con caudales de recirculación bajos en operación a plena potencia. Con esto se aumenta la fracción de vacíos en el núcleo, lo que trae como consecuencia una mayor producción de energía en la parte baja de los ensambles combustibles. Esto conduce a que al final del ciclo en la mitad alta del núcleo se produzca la mayor cantidad de la energía debido a una menor cantidad de vacíos promedio en el núcleo. Lo que propicia una mayor reactividad al final del ciclo extendiéndose la operación a plena potencia. Lo cual es muy deseable para lograr obtener mayores factores de capacidad durante el ciclo y de esta forma minimizar costos de producción de energía eléctrica. Además la estrategia SS produce una baja reactividad al inicio del ciclo cuando el núcleo tiende a presentar un exceso de reactividad difícil de mitigar, sobre todo, cuando se diseñan ciclos extensos (ciclos mayores a 12 meses).

Otra forma de producir el desplazamiento espectral es concentrar el U-235 en la parte baja de los ensambles combustibles frescos de recarga. Actualmente en la CLV se utilizan combustibles avanzados constituidos por arreglos de celdas 10x10 que contienen dos barras de agua centrales. El diseño axial del ensamble combustible es tal que el número de elementos combustibles con

uranio va disminuyendo en las regiones superiores del ensamble. Esto se traduce en tener mayor contenido de uranio en la parte inferior del núcleo que en la superior. Los ensambles combustibles constan de 25 nodos axiales. Cada nodo tiene una altura de 15.24 cm de altura (6 pulgadas). El combustible (dióxido de uranio) está contenido en 92 barras o elementos combustibles o pines, 14 de estas barras de combustible son parciales axialmente. El enriquecimiento de U-235, la concentración de gadolinio y el número de barras con gadolinio puede variar en las diferentes zonas axiales del ensamble aunque en diseños recientes se tiende a evitar variaciones axiales en el enriquecimiento. Los primeros ensambles combustibles eran axialmente uniformes es decir el enriquecimiento de U-235 era único y no se usaba gadolinio como veneno quemable. Posteriormente se comenzó a dividir el ensamble combustible en zonas con diferentes contenidos axiales del U-235. Por ejemplo se estandarizó que el primer nodo inferior y los dos últimos nodos superiores se cargaran con uranio natural. Con esto se cumplía con la estrategia de baja fuga axial de neutrones.

3. ZONAS AXIALES DEL ENSAMBLE COMBUSTIBLE

En la actualidad el combustible 10x10 suele dividirse en 7 zonas axiales. Tres de ellas son denominadas *zona tapón inferior*, *zona tapón superior baja* y *zona tapón superior alta*. Estas zonas tapón, de un solo nodo, son los tapones de uranio natural ya mencionadas. Estas zonas difieren entre ellas en el número de barras conteniendo uranio natural. El resto del ensamble combustible se divide en cuatro zonas, las cuales difieren en el número de barras con dióxido de uranio enriquecido de U-235 y de barras vacías o ausentes.

En la zona inferior no extrema, es denominada *zona de configuración del perfil de potencia*, el número de barras de combustibles que conforman la celda es de 92.

La siguiente zona hacia arriba, se llama *zona dominante*, el número de barras con uranio disminuye en 14 barras las que están vacías y sólo 78 contienen uranio.

En las siguientes dos zonas axiales, o región superior, las 14 barras vacías no continúan, razón por la que se le denomina también región de barras parciales. La región superior se suele dividir en dos zonas; la parte baja se denomina *zona del margen de apagado en frío (SDM)* donde frecuentemente se introduce gadolinio adicional ya que esto es muy efectivo para aumentar el margen de apagado en frío del reactor.

Por último a la zona alta de la región superior, antes de los dos nodos tapón de uranio natural, se encuentra la denominada *zona de declive*. En esta zona se solía disminuir el enriquecimiento de U-235 y así contribuir a decrecer la fuga axial de neutrones.

La finalidad de las barras parciales es aumentar, en lo más posible, en la parte superior del núcleo del reactor, la presencia de agua para que propicie una mejor moderación de neutrones cuando se opera a potencia. En esta forma se aumenta la producción de energía en la región superior, la cual tiende a ser relativamente baja respecto a la parte inferior del combustible en los BWR. Esto debido al aumento de la fracción de vacíos al ir subiendo el caudal del agua a lo largo del núcleo cuando el reactor opera a potencia. En contraposición en esta región superior, la producción de

plutonio es mayor propiciado por la baja densidad de moderación, lo que, endurece el espectro neutrónico induciéndose una mayor producción de plutonio.

Otra consecuencia, debido a la ebullición del agua dentro del núcleo en los BWR, resulta cuando el reactor opera a potencia con un pico axial en la parte inferior del núcleo y en un momento dado es llevado a condición de baja potencia. En estas circunstancias el núcleo se llena totalmente de agua en estado líquido trasladándose el pico de la potencia axial a la parte superior del núcleo. Esto aumenta sustancialmente la reactividad en la parte superior del núcleo sobre todo en condición de apagado en frío. Para controlar este exceso de reactividad se solía aumentar en la región superior de los ensambles combustibles el contenido de gadolinio preferentemente en la *zona del margen de apagado en frío (SDM)*. En la región superior de los ensambles combustibles también se solía aumentar el enriquecimiento de U-235 de la zona cuando se requería aumentar el enriquecimiento promedio del ensamble. Pero en los diseños recientes se tiende a no variar axialmente el enriquecimiento de U-235 de las barras de combustible de los ensambles, excluyendo obviamente las zonas tapón. Lo anterior facilita el proceso de diseño y de fabricación de los ensambles combustibles aunque se pierde flexibilidad en el diseño. Aún así el diseñador se enfrenta con un amplio conjunto de variables de decisión cuando se aborda el diseño radial de las celdas de los ensambles de combustible.

El proceso de diseño radial de las celdas involucra distribuir diferentes enriquecimientos de U-235 y de gadolinio que cumplan con las expectativas generales de energía y control de la reactividad. Además, debido a su relación directa con las variables termohidráulicas relacionadas con la seguridad, es indispensable evitar que se generen picos de potencia indeseables dentro de la celda. Esto durante toda la vida útil del ensamble combustible. El diseño de las celdas de combustible se realiza con códigos de cómputo “best estimate” capaces de simular con gran detalle el comportamiento de las celdas durante el proceso de quemando del ensamble. Códigos como el sistema HELIOS son usados en este propósito. Con ellos es factible estimar la reactividad y las potencias relativas por pin (elementos combustibles) en condiciones calientes y frías y con diferentes condiciones de vacíos (usualmente 0, 40 y 70 %) con y sin presencia de barras de control y en diferentes puntos de exposición o quemado de la celda.

En resumen, el diseñador del ciclo de combustible deberá primero estimar el número de ensambles de recarga, su enriquecimiento promedio y posteriormente distribuir radial y axialmente los enriquecimientos de U-235. El número y concentración de elementos combustible con gadolinio de las diferentes zonas axiales. Todo esto cumpliendo con lo siguiente: las metas de energía, las estrategias operacionales y los márgenes de diseño a los límites de seguridad impuestos para el ciclo. Se tendrán que realizar múltiples ajustes y análisis para lograr cumplir con todas estas metas y al mismo tiempo disminuir los costos de producción, y de esta forma, obtener la mejor opción de diseño del ciclo.

Como parte básica del diseño del ciclo está el diseño de la celda del combustible. Usualmente los fabricantes de combustible tienen en sus bases de datos gran cantidad de celdas ya diseñadas y de ensambles combustibles que se han perfeccionado a través de muchos ciclos de diseño real realizados para las diversas centrales nucleares en el mundo. Por lo que el diseño del ciclo, realizado por los fabricantes, consiste principalmente en seleccionar, para un ciclo específico, las celdas de combustible y conformar el diseño axial del mismo que mejor cumpla con las especificaciones del PUE de la central nuclear.

En el caso de la Central Nuclear de Laguna Verde se realizan esfuerzos tendientes a tener una capacidad independiente del fabricante de combustibles de realizar el diseño de los ciclos de los reactores de la CLV, en una primera etapa de pre-diseño. En este contexto en el ININ se realizan diferentes estudios para apoyar a la CFE en esta dirección. Específicamente, se han abordado los problemas involucrados en la búsqueda óptima del patrón de carga de referencia del núcleo y de los patrones de barras de control para la operación del reactor en condiciones nominales [1, 2, 3].

4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO RÁPIDO Y ALGORITMO DE BÚSQUEDA (PROGRAMA PreDiCeldas)

A continuación se expone la metodología de cálculo rápido que se desarrolló para estimar la potencia relativa de cada uno de los elementos combustible (o pins) dentro de una celda 10x10 del combustible nuclear.

Desde el punto de vista del diseño de celdas, los principales parámetros son la distribución de enriquecimiento de U-235 y la concentración y contenido de gadolinia dentro de ella. Las variables a determinar son la reactividad de la celda y la potencia por pin. El código de cómputo para el cálculo de celda HELIOS proporciona la constante de multiplicación infinita (k_{inf}) de la celda, así como la potencia relativa por pin. Para el análisis de la celda es importante el comportamiento del pico de potencia relativa máxima de la celda o LPPF (por sus siglas en inglés). Este es calculado para las condiciones de temperatura estipuladas para la operación a potencia nominal y de las fracciones de vacíos (densidad del moderador) representativas. Para cubrir la vida útil de la celda, el cálculo se hace en diferentes puntos de exposición establecidos.

La k_{inf} de la celda está relacionada con la reactividad y la longitud del ciclo de los núcleos donde la celda de combustible será usada. Mientras que el LPPF está relacionado con los márgenes de seguridad a los límites térmicos del núcleo del reactor. El diseño de la celda, en primera instancia, está determinado por el enriquecimiento promedio de U-235 que se estima será necesaria para cumplir las expectativas de energía en los ciclos donde la celda estará involucrada. Mientras que el número de pines con gadolinio y su concentración está relacionado con las necesidades de control de la reactividad del núcleo durante el ciclo y con la extensión que se pueden alcanzar en el primer ciclo de uso de la celda.

La información a procesar durante el diseño de un ciclo es basta y compleja. Con el fin de simplificar el análisis de la celda que se intenta diseñar se toma como dato de entrada el enriquecimiento promedio de U-235 de la celda y el número y concentración de los pines con gadolinia. Con esto el diseñador deberá encontrar la distribución por pin de U-235 y Gadolinia que produzcan la k_{inf} y LPPF objetivo que se desea cumplir. Deberá en principio comenzar con el análisis de la k_{inf} y el LPPF al inicio de la vida o BOL (por sus siglas en inglés). La k_{inf} y el LPPF en el BOL son determinantes en el proceso de diseño de la celda. Por fortuna para el diseñador, lo usual (y natural) es que el máximo LPPF en una celda se presente en el BOL lo que facilita su análisis. En el diseño de una celda es fundamental el uso de un código de cálculo de celda “best estimate” como es el código HELIOS. Sin embargo, su tiempo de cálculo puede resultar una limitante en el caso de pretender optimizar el diseño de la celda mediante procesos exhaustivos de búsqueda. Por este motivo, es deseable poder contar con una herramienta de cómputo para

optimizar la celda en el BOL mediante cálculos rápidos. Una condición esencial para obtener resultados adecuados es que el cálculo rápido resulte lo suficientemente preciso.

En el método de cálculo rápido desarrollado en el ININ se tomó como base una celda 10x10 correspondiente a la zona denominada de perfil de la potencia. Este tipo de celda, como se mencionó antes, está constituida por un total de 92 pines. Pero al considerar la simetría diagonal tipo espejo, establecida para las celdas de los combustibles 10X10 usados en la CLV, sólo 51 de los pines son independientes. Es decir se tiene la libertad de definir el grado de enriquecimiento de U-235 y de concentración de gadolinia. Los valores que puede tomar el enriquecimiento de U-235 y de la concentración de la gadolinia están constreñidos a valores preestablecidos tanto por razones de seguridad como de fabricación.

El método de cálculo rápido de las potencias relativas de la celda consiste en la formación de una matriz cuadrada de 51x51 coeficientes. Esta matriz se genera al ejecutar con HELIOS una celda BASE y una celda idéntica a la celda BASE pero en el cual en un pin (y si es el caso también su simétrico) se le cambia ligeramente el enriquecimiento. Con base a las potencias relativas resultantes se calculan los 51 coeficientes correspondientes al pin alterado que consiste en obtener la diferencia de las potencias y dividirla entre la diferencia del enriquecimiento de U-235 del caso perturbado respecto al caso base. De forma consecutiva se perturba uno a uno cada pin y se van generando los 51 renglones de la matriz que denominaremos *matriz de cambio de potencia por enriquecimiento* A(51x51). Si definimos $U_b(51)$ como el vector de enriquecimiento de U-235 de la celda BASE y $P_b(51)$ el vector de potencia relativas calculados con HELIOS, y $U_c(51)$ el enriquecimiento de una celda de enriquecimientos de U-235 llamada CANDIDATA, entonces es posible calcular linealmente, (usando la *matriz de coeficientes del cambio de potencia por enriquecimiento*) al vector de potencia relativa de la celda CANDIDATA mediante la siguiente fórmula matricial

$$P_c(51) = P_b(51) + A(51 \times 51) \times (U_c(51) - U_b(51)) = P_b(51) + A(51 \times 51) \times (\Delta U) \quad (1)$$

La exactitud de este cálculo depende de qué tan próxima está la celda candidata de la celda base. Sin embargo las primeras pruebas indicaron que una vez que se formaba una matriz a partir de una celda BASE al ejecutar los 52 casos HELIOS, y con ella obtener una celda CANDIDATA1, la cual posteriormente era verificada al ejecutar HELIOS; el resultado de HELIOS podía ser usado como caso de REFERENCIA y éste junto con la Matriz BASE original generar una nueva CANDIDATA2 con una precisión de cálculo suficiente. Evitando de esta forma el tener que generar una nueva matriz BASE2 lo que implicaría ejecutar 51 casos HELIOS. Trasladando lo dicho anteriormente se puede generalizar la Ecuación (1) en la fórmula siguiente:

$$P_c(51) = P_r(51) + A(51 \times 51) \times (U_c(51) - U_r(51)) = P_r(51) + A(51 \times 51) \times (\Delta U) \quad (2)$$

En donde $U_r(51)$ es el vector de referencia de enriquecimiento y $P_r(51)$ su correspondiente vector de potencia relativa calculadas con HELIOS. Es posible generar un conjunto de matrices A(51x51) el cual junto con un conjunto, más extenso, de casos de referencia permitan formar una base de datos adecuada para tratar de cubrir el universo de diseño de celdas deseado.

Para complementar la formulación propuesta, en una primera instancia se establece un algoritmo de búsqueda del mínimo pico de potencia (LLPF) dejando fijo el enriquecimiento promedio de la celda. Este algoritmo sencillo y directo consiste en lo siguiente.

1. Establecer los enriquecimientos de U-235 por pin a considerar durante el proceso de optimización [VU(Un)].
2. Fijar la matriz de coeficientes a ser usados durante el proceso [A(51x51)].
3. Fijar el vector de enriquecimiento de referencia [Ur(51)].
4. Fijar un enriquecimiento de U-235 promedio de celda Objetivo [Up].
5. Proponer un vector de enriquecimiento de U-235 inicial [Ui(51)].
6. Calcular con la Ecuación (2) el vector de potencias relativas Pi(51) correspondiente al vector de enriquecimiento de U-235 inicial y almacenar el valor de LPPF(itera).
7. Calcular el enriquecimiento promedio de la celda U1(51) [UPi].
8. Si $UPi \geq Up$ buscar el pin con el pico de potencia máximo (LPPF) de Pi(51) y bajar su enriquecimiento al próximo inmediato de acuerdo a los valores disponibles en VU(Un), formulando una nueva celda Ui(51). En caso de que el enriquecimiento del pin sea el mínimo permitido, seleccionar el pin cuyo pico de potencia sea el siguiente más alto en Pi(51).
9. Si $UPi < Up$ buscar el pin con el pico de potencia mínimo de Pi(51) y subir su enriquecimiento al próximo inmediato de acuerdo a los valores disponibles en VU(Un), formulando una nueva celda Ui(51). En caso de que el enriquecimiento del pin sea el máximo permitido, seleccionar el pin cuyo pico de potencia sea el siguiente más bajo en Pi(51).
10. Repetir la búsqueda con la nueva celda UPi repitiendo los puntos 6, 7, 8 y 9 hasta que se encuentre que el valor de LPPF converge.
11. Buscar en el vector LPPF(itera) el valor mínimo encontrado y así determinar a qué vector de enriquecimiento Ui(51) corresponde, el cual se usa para formar la celda con el menor LPPF encontrado en el proceso de búsqueda.

Partiendo de la formulación de cálculo de la potencia relativa y del algoritmo de búsqueda del LPPF mínimo se desarrolló el programa PreDiCeldas. El programa fue creado con el sistema Visual-Basic versión 6.0 de Microsoft.

5. RESULTADOS DEL PROGRAMA PreDiCeldas

Con el fin de estimar la precisión del modelo de cálculo de PreDiCeldas se tomó una celda típica de los ensambles combustibles 10x10 de la CLV de la llamada ***zona de configuración del perfil de potencia***. Esta celda, que llamaremos celda TIPICA, tiene un enriquecimiento promedio de 4.107 % de U-235. En esta celda, 14 barras contienen gadolinia, 9 barras contienen 4.0% de concentración de gadolinio y 5 barras contienen 5.0% de gadolinia.

Usando HELIOS, se generó una matriz de cambio de potencias por enriquecimiento A(51x51), tomando como base una celda homogénea con un enriquecimiento de 3.60 % de U-235 y con idéntica distribución de gadolinia que la celda TIPICA. A esta nueva celda la llamamos CELDA HOMOGENEA360. Se generaron las 51 celdas perturbadas alterando cada uno de los 51 pines aumentando su enriquecimiento a 3.7% de U-235. La matriz generada que llamaremos MATRIZ HOMOGENEA360 se introdujo al programa PreDiCeldas.

También se simuló con HELIOS, la celda TÍPICA y se introdujo al programa PreDiCeldas como celda de Inicio. Se ejecutó PreDiCeldas y se le pidió que tomara la MATRIZ HOMOGENEAA360 como matriz base. Como celda de referencia se usó la CELDA HOMOGENEAA360. Se calcularon las potencias relativas con nuestro modelo rápido.

A continuación en la Tabla I se presentan los resultados de las potencias relativas de la celda TÍPICA obtenidos con PreDiCeldas junto con los obtenidos con HELIOS, así como las diferencias absolutas porcentuales relativas entre los datos de PreDiCeldas respecto a los de HELIOS. Con estos últimos se obtiene el promedio de las diferencias absolutas relativas de las potencias relativas entre HELIOS y PreDiCeldas. También se reporta la desviación estándar de las diferencias relativas.

Tabla I. Diferencias absolutas porcentuales de las potencias relativas entre los resultados PreDiCeldas comparados con resultados HELIOS

Diferencias absolutas porcentuales de las potencias relativas entre los resultados PreDiCeldas comparados con resultados HELIOS				
Pin	U235%	Potencia Relativa		Dif Absolutas Pot. Rel. %
		HELIOS	PreDiCeldas	$100 \cdot \text{ABS}((H-P)/H)$
1	2	0.9092	0.962	5.49
2	3.6	1.2186	1.2046	1.16
3	4.4	1.0263	1.0417	1.48
4	3.95	1.1316	1.1092	2.02
5	3.95	0.2915	0.2788	4.56
6	4.4	0.6142	0.6315	2.74
7	4.4	1.1573	1.153	0.37
8	4.9	0.8213	0.8279	0.80
9	4.4	0.2949	0.2848	3.55
10	4.4	0.7311	0.7677	4.77
11	4.4	1.1553	1.1549	0.03
12	4.4	0.3182	0.3089	3.01
13	4.4	0.7142	0.7118	0.34
14	4.4	0.9104	0.8991	1.26
15	4.4	1.102	1.1469	3.91
16	4.4	1.2273	1.2287	0.11
17	4.4	0.8712	0.8812	1.13
18	4.4	0.3115	0.3016	3.28
19	4.4	1.0981	1.1492	4.45
20	4.4	1.3479	1.3429	0.37
21	4.9	1.0938	1.1179	2.16
22	4.4	0.9323	0.937	0.50
23	4.9	0.9974	1.01	1.25
24	4.4	0.3219	0.3295	2.31
25	3.95	1.39	1.3648	1.85
26	3.95	1.0351	1.0201	1.47
27	4.4	0.3533	0.3457	2.20
28	4.4	1.0188	1.0263	0.73
29	4.9	1.0923	1.1168	2.19

30	4.4	0.3174	0.3074	3.25
31	3.95	0.7053	0.7044	0.13
32	4.4	0.3236	0.3314	2.35
33	2.8	1.2338	1.2155	1.51
34	4.4	1.3905	1.3736	1.23
35	3.95	1.0766	1.0672	0.88
36	4.9	1.2169	1.2507	2.70
37	3.95	0.9897	0.9901	0.04
38	3.95	0.9355	0.939	0.37
39	4.9	1.1252	1.1538	2.48
40	3.95	1.0509	1.039	1.15
41	4.4	1.4086	1.4196	0.77
42	2	1.1291	1.1838	4.62
43	2.8	1.2541	1.2389	1.23
44	3.6	1.3506	1.3251	1.92
45	3.95	1.3449	1.3349	0.75
46	4.4	1.4071	1.4197	0.89
47	4.4	1.39	1.4012	0.80
48	4.4	1.4403	1.4418	0.10
49	3.6	1.345	1.3251	1.50
50	2.8	1.2697	1.2511	1.49
51	2	1.1514	1.2319	6.53
			Promedio (%) =	1.89
			Desviación(%) =	2.30

Para complementar los resultados, se ejecutó PreDiCeldas con el objeto de buscar el mínimo de Pico de Potencia Máximo (LPPF) fijando el enriquecimiento promedio de celda de U-235 idéntico al de la celda TIPICA. También se estableció que el vector de enriquecimientos disponibles, fuera formado con los diferentes valores de enriquecimiento presentes en la celda TIPICA. Se activó la opción de que las barras con gadolinia y el enriquecimiento máximo fuera de 4.4% de U-235. El programa PreDiCeldas realizó 48 iteraciones, en la fase de convergencia del pico de potencia relativa y posteriormente en 30 iteraciones calculó las condiciones del mínimo LPPF. El tiempo de cálculo fue menor de 5 segundos en total. La celda TIPICA tenía un LPPF de 1.4403 y con PreDiCeldas se logró disminuirlo a 1.3108, es decir una reducción del 9.3 %.

Con el programa PreDiCeldas, se encontró, como en estudios anteriores [6], que a una mayor disponibilidad de diferentes valores de enriquecimientos que se puedan colocar en una celda, menores valores de LPPF se podrán lograr. Con base a la celda TIPICA se ejecutó PreDiCeldas con una variedad de vectores de enriquecimientos mostrados en la Tabla II. En la Figura 1 se muestra la dependencia del LPPF con el número de valores diferentes de enriquecimientos disponibles.

Tabla II. LPPF en función de la disponibilidad de enriquecimientos de U-235% “Búsqueda Mínimo LPPF con Enriquecimiento promedio U235% fijo en 4.107%”

LPPF en función de la disponibilidad de enriquecimientos de U-235%. Búsqueda Mínimo LPPF con Enriquecimiento promedio U235% fijo en 4.107%			
Caso	Disponibilidad de Enriquecimientos	LPPF	Diferencia relativa % respecto TIPICA
TIPICO	6	1.4452	0.00
7	6	1.3108	9.30
6	7	1.3055	9.67
4	9	1.244	13.92
5	19	1.2196	15.61
2	32	1.2082	16.40

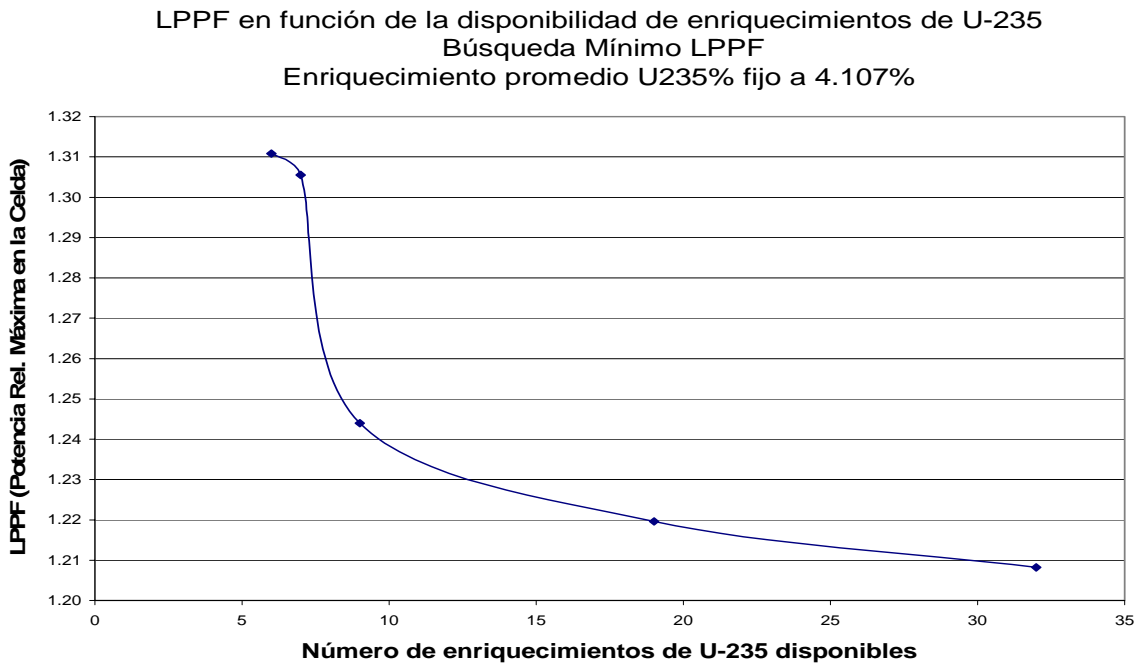


Figura 1. LPPF en función del número de valores de U-235 disponible.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Finalmente, se presentan las conclusiones y perspectivas obtenidas al usar el programa PreDiCeldas en el prediseño de celdas de combustible nuclear para la CLV. Las primeras estimaciones muestran que con PreDiCeldas, la precisión en el cálculo de las potencias relativas por pin es del orden del 1.9% en promedio, lo que se estima que es suficiente para los cálculos de prediseño. Además, la rapidez de cálculo es también suficiente, del orden de 1000 iteraciones por minuto lo que permite búsquedas exhaustivas. Lo que sí aparece como limitante, actualmente, es el hecho de no poder variar los parámetros de la gadolinia (posición y/o concentración) en caso de requerirse variar la posición de las barras de uranio con gadolinia o su concentración es necesario ejecutar HELIOS para 52 celdas homogéneas. En el futuro se espera mejorar el modelo de cálculo y superar la limitación relacionada con la gadolinia.

El algoritmo de Búsqueda de Mínimo LPPF con Enriquecimiento promedio U235% fijo aunque es simple dio excelentes resultados. Es posible integrar búsquedas más sofisticadas y considerando nuevos objetivos de búsqueda. Mientras tanto se logró disminuir el pico de potencia máxima de la celda en más del 9%. Y si se permite considerar una mayor diversidad de enriquecimientos de U-235 es posible disminuir el LPPF a valores tan bajos como 1.2. Puesto que el LHGR de los núcleos de los BWR es directamente proporcional al LPPF; un bajo LPPF permitiría alcanzar recargas dentro de un universo de posibilidades más vasto, ampliando la optimización de los ciclos de combustible. En el futuro se piensa ampliar las capacidades del PreDiCeldas y que abarque el cálculo completo de las celdas que constituyen un ensamble completo y así incidir en el diseño axial del ensamble combustible.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el soporte dado por parte del Departamento de Gestión de Combustible de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la realizar el presente trabajo.

REFERENCIAS

1. Castillo J. A., Alonso G., Morales L. B., E. del Valle; Martín del Campo C., Francois; J. L., “BWR Fuel Reloads Design Using A Tabu Search Technique”, *Annals of Nuclear Energy*, **Vol. 31**, p. 151-161 (2004).
2. J. L. Montes, J. J. Ortiz, I. Requena and R. Perusquía, “Searching for full power control rod patterns in a boiling water reactor using genetic algorithms”, *Annals of Nuclear Energy*, **Vol. 31**(16), p. 1939-1954 (2004).
3. Ortiz J. J., Requena I., “An Order Coding Genetic Algorithms to Optimize Fuel Reload in a Nuclear Boiling Water Reactor. Nuclear Science & Engineering”, *Nuclear Science & Engineering*, **Vol. 146**, p. 88-98 (2004).
4. Casal J.J., Stamm’ler R.J.J., Villarino E.A. and Ferri A.A., “HELIOS: Geometric capabilities of a new fuel-assembly program”, *Intl Topical Meeting on Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics*, Pittsburgh, Pennsylvania, April 28-May 2, Vol. **2**, 10.2.1 1-13 (1991).
5. Baechler J.C., Hendricks C.D., Marks J.S., Sarma B.U.B., Smith C.W., “Station Nuclear Engineering Manual”. GE Nuclear Energy, NEDE-24810. 1980.
6. G.F. Cuevas Vivas, T.A. Parish, G.L. Curry, “Optimization of MOX enrichment distribution in typical LWR assemblies using a simplex method-based algorithm”, *Annals of Nuclear Energy*, **Vol. 29**, p. 2001-2017 (2002).