



MX0500162

Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR/International Joint Meeting Cancun 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR
XV Congreso Anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR/XV SNM Annual Meeting and XXII SMSR Annual Meeting
Cancún, Q.R., México, 11-14 de Julio, 2004/Cancún, Q.R., Mexico, July 11-14, 2004

Obtención de Patrones de Barras de Control para un BWR Usando Búsqueda Tabú

Alejandro Castillo¹, Juan José Ortiz, Gustavo Alonso

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Km. 36.5 Carretera México-Toluca, Ocoyoacac, Estado de México 52245, México

jacm@nuclear.inin.mx, jjortiz@nuclear.inin.mx, galonso@nuclear.inin.mx

Luis B. Morales

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas

Ciudad Universitaria, D. F. 04510, México

lbm@servidor.unam.mx

Edmundo del Valle

Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Física y Matemáticas

Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col. Lindavista 07738, D. F., México

edmundo@esfm.ipn.mx

Resumen

Se presentan los resultados obtenidos al implementar la técnica de búsqueda tabú, para optimizar patrones de barras de control en un reactor tipo BWR, usando el código CM-PRESTO. Los patrones de barras de control se obtuvieron para los diseños de recargas de combustible obtenidos en un trabajo previo, utilizando la misma técnica. Los resultados obtenidos corresponden a un ciclo de 18 meses usando 112 combustibles frescos enriquecidos al 3.53 de U-235. La técnica de búsqueda tabú empleada, prohíbe movimientos recientemente visitados, en la posición, que corresponden a las posiciones axiales de las barras de control, adicionalmente se emplea la matriz *tiempo_tabu* para manejar un tamaño de lista tabú variable y se castiga la función objetivo con la frecuencia de los movimientos prohibidos. Los patrones de barras de control obtenidos mejoran la longitud del ciclo con respecto a los valores de referencia y cumplen las restricciones de seguridad.

1. INTRODUCCIÓN

En un trabajo previo, empleando la técnica de búsqueda tabú, se obtuvieron diseños de recargas de combustible nuclear para un reactor tipo BWR [1]. Dicho sistema tenía como finalidad maximizar la energía obtenida en un ciclo de operación, con la restricción de que se cumplieran

¹ Estudiante de doctorado en la Universidad Autónoma del Estado de México.

los límites térmicos de operación *Maximum Relative Nodal Power* (MRNP), *Linear Heat Generation Rate* (LHGR), *Minimal Critical Power Ratio* (MCPR), *Radial Power Peaking Factor* (RPPF) y *Maximum Power Generation Rate* (MPGR), y el margen de apagado en frío *Shutdown Margin* (SDM). En ese sentido, los resultados obtenidos permitieron la extensión del ciclo analizado, cumpliéndose los límites antes mencionados, tomando como referencia el diseño propuesto para la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV).

Con la idea de complementar el trabajo mencionado, ahora se obtienen patrones de barras de control empleando la misma técnica, utilizando las recargas generadas en el trabajo previo.

El problema de la generación de Patrones de Barras de Control (PBC) se ha resuelto utilizando diferentes métodos de optimización, por ejemplo, Algoritmos Genéticos [2], Colonias de Hormigas [3] y Lógica Difusa [4], por mencionar algunos. En todos los trabajos mencionados, el objetivo es obtener buenos diseños de PBC, que mejoren la longitud del ciclo de operación, cumpliendo además, los límites térmicos de operación LHGR y MCPR en cada paso de quemado. En este trabajo nuevamente se usó la técnica de búsqueda tabú para resolver el problema mencionado, aplicando, además, las estrategias de carga Control Cell Core (CCC) [5] y simetría. Adicionalmente se propone utilizar un arreglo llamado *tiempo_tabu* (TT), que representa los movimientos prohibidos en la posición y la frecuencia en la evaluación de la función objetivo.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para diseñar el sistema se tomó como base un reactor tipo BWR como los de la CNLV, cuyo núcleo contiene 109 barras de control representadas por el signo “+” en la Figura 1, cada una de las cuales puede ser colocada en 25 posiciones axiales diferentes. Un ciclo de operación típico considera 10 pasos de quemado², lo cual implica que se tienen $((25)^{109})^{10}$ diferentes posibles diseños de un PBC.

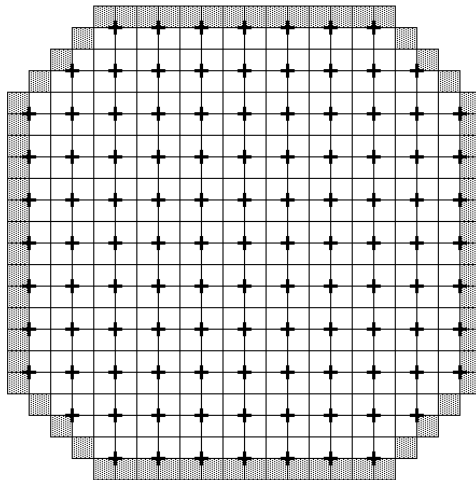
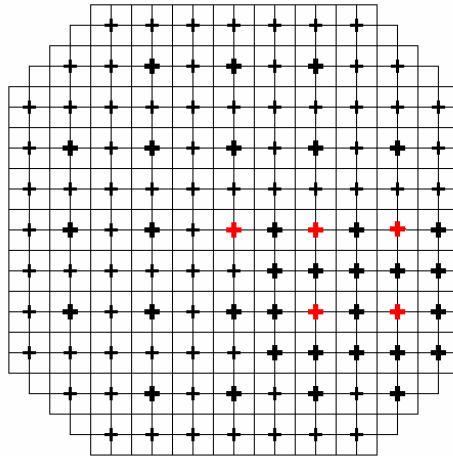


Figura 1. Distribución de las 109 barras de control.

² No obstante pueden existir ciclos de operación en los cuales se consideren más de 10 pasos de quemado.

A continuación se explica cómo reducir el espacio de búsqueda. Si se considera la simetría de 1/8 de núcleo, las posibilidades se reducen a $((25)^{19})^{10}$ debido a que existen 19 barras de control en cada octante del núcleo señalado. Adicionalmente se puede aplicar la estrategia CCC, con lo cual el número de posibilidades se reduce ahora a $((25)^5)^{10}$ debido a que únicamente es necesario mover 5 de las barras de control, las cuales están señaladas en color rojo en la Figura 2, resaltando que, las barras de control restantes permanecen fuera del reactor durante todo el ciclo.



**Figura 2. Esquema del núcleo de un reactor BWR.
Las barras de control en rojo son las únicas que intervienen para la optimización.**

Como ya se mencionó anteriormente, cada barra de control tiene 25 posiciones axiales diferentes, etiquetadas de la siguiente manera [00,02,04,06,...,44,46,48]. Las posiciones que se encuentran entre 00 y 18 se conocen como “posiciones profundas”, el rango de 20 a 30 se les llama “posiciones intermedias” y finalmente, al rango etiquetado entre 32 y 48 se les conoce como “posiciones someras”. Para la generación de los PBC las posiciones intermedias no se toman en cuenta, debido a que deforman el perfil axial de potencia [6]. Con las consideraciones anteriores, se tienen solamente 19 posiciones axiales en cada barra para el diseño de PBC, aunado a las restricciones ya hechas el número total de posibilidades es $((19)^5)^{10} \approx 10^{64}$.

3. LA TÉCNICA DE BUSQUEDA TABÚ

La búsqueda Tabú parte de la hipótesis de que es posible construir una vecindad $N(x)$ en el espacio muestra, durante el proceso iterativo. Cada x conducirá a una solución factible, en general, diferente. En el problema analizado se tienen 5 barras de control, cada una de las cuales se puede colocar en 19 posiciones diferentes. Por lo tanto, un punto x de la vecindad es un movimiento de alguna de las barras, en alguna de las posiciones posibles, lo cual implica que la vecindad es de tamaño $5 \times 19 = 95$. En el mismo sentido, una solución factible es un vector, al cual se denotará como RC, de tamaño 5, que representa un patrón de barras válido. Por ejemplo, en el vector RC(02,36,08,44,40), la componente 02 es la posición axial de la barra de control 1, la componente 36 es la respectiva posición axial de la barra de control 2 y así sucesivamente. Es importante mencionar que la búsqueda tabú inicia con una solución factible aleatoria.

También es necesario definir un conjunto M de movimientos simples $m \in M$. Un movimiento simple es el cambio en una barra de control de una posición axial a otra. Por ejemplo, el movimiento $RC(02,36,08,44,40) \Leftrightarrow RC(02,18,08,44,40)$ significa que la barra de control 2 se movió de la posición axial 36 a la posición axial 18.

Esta técnica es similar a un método de optimización local; no obstante, es posible moverse desde una solución x a una peor x^* . La característica anterior permite escapar de mínimos locales, esto con base en la asignación de ciertos movimientos prohibidos durante t iteraciones del proceso, $t_1 < t < t_2$, donde t_1 y t_2 se fijan de acuerdo a un análisis estadístico. A la variable t se le conoce como *tabu_tenure*.

En la implementación de la técnica se maneja un arreglo llamado *tiempo_tabu*, el cual tiene dos funciones de suma importancia. La primera es registrar el historial (frecuencia) de los movimientos realizados durante el proceso; en segundo lugar permite manejar la lista tabú de tamaño variable, esto es, el número de iteraciones que un movimiento permanece tabú. Dicho arreglo es una matriz de tamaño 5×19 donde la primera entrada representa las barras de control y la segunda entrada es la posición axial de dichas barras. La forma de asignar el estatus tabú a un movimiento realizado en una posición axial de una barra de control es el siguiente:

$$tabu_time(c,p) = iter + tabu_tenure \quad (1)$$

donde

- iter* : es la iteración actual.
- c* : es la barra que será movida.
- p* : es la posición axial de la barra *c*.

Por otro lado, debido a que la evaluación de la función objetivo es bastante cara por las ejecuciones del simulador CM-PRESTO, únicamente se evalúa un subconjunto V de $N(x)$ de tamaño $0.4 |N(x)|$, el cual se genera aleatoriamente. El porcentaje de la vecindad que se revisa para la búsqueda se tomó con base en dos criterios, el primero de ellos es un análisis estadístico; el segundo criterio tiene que ver con el costo de evaluación de la función objetivo. Es importante mencionar que dicho porcentaje puede ser modificado, dependiendo de los recursos disponibles.

Adicionalmente, se utilizó una función que registra los movimientos realizados en el pasado reciente; a dicha función se le conoce como *memoria larga*. El objetivo de dicha función es penalizar aquellos movimientos que tienen una frecuencia alta, con lo cual la búsqueda se puede enfocar hacia otras regiones no exploradas. En este caso, se trabajó un vector F_v de tamaño 95 que representa la memoria larga; donde cada una de las entradas indica la frecuencia de cada una de las posiciones axiales de las 5 barras que intervienen en el proceso. Dicho vector se inicializa con ceros al empezar el proceso; posteriormente se actualiza de la siguiente manera:

$$F_v = F_v + 2 \quad (2)$$

El valor empleado para la actualización se obtiene después de realizar un análisis estadístico con diferentes valores.

4. FUNCIÓN OBJETIVO

Como ya se mencionó, el objetivo de este trabajo es obtener diseños de PBC que satisfagan los límites térmicos LHGR y MCPR, además el reactor debe ser crítico y el perfil axial de potencia debe ajustarse a un perfil axial de potencia dado. Con lo anterior, la función objetivo propuesta es la siguiente:

$$F = w_1 |k_{eff,o} - k_{eff,t}| + w_2 \sum_{i=1}^{25} |P_{o,i} - P_{t,i}| + w_3 |LHGR_t - LHGR_o| + w_4 |MCPR_o - MCPR_t| \quad (3)$$

donde

- $k_{eff,o}$: factor de multiplicación efectiva calculado
- $k_{eff,t}$: factor de multiplicación efectiva objetivo
- $P_{o,i}$: perfil axial de potencia calculado en el nodo i
- $P_{t,i}$: perfil axial de potencia propuesto en el nodo i
- $LHGR_t$: límite máximo para LHGR
- $LHGR_o$: LHGR calculado
- $MCPR_o$: MCPR calculado
- $MCPR_t$: límite mínimo para MCPR

siendo w_1, \dots, w_4 factores de peso, con $w_i > 0, i = 1, \dots, 4$

Si los límites térmicos $LHGR$ y $MCPR$ se satisfacen, entonces los factores de peso son iguales a cero y sólo se minimiza sobre la diferencia entre los perfiles axiales de potencia calculado y propuesto (cálculo Haling); en otro caso, la función objetivo se penaliza con las diferencias entre los valores obtenidos y los límites propuestos. De este modo, la función objetivo se minimiza cuando los límites térmicos se cumplen. La Tabla I muestra los valores para $k_{eff,t}, MCPR_t, LHGR_t, \delta$ y ε , siendo estos últimos valores la tolerancia en las ecuaciones (4) y (5) respectivamente. El perfil axial de potencia propuesto para este problema será el obtenido mediante un cálculo Haling. Adicionalmente se impusieron las siguientes restricciones:

$$|k_{eff,o} - k_{eff,t}| \leq \delta, \quad \delta > 0 \quad (4)$$

$$|P_{o,i} - P_{t,i}| \leq \varepsilon P_{t,i}, \quad \varepsilon > 0; \forall i = 1, \dots, 25 \quad (5)$$

Tabla I. Límites manejados en el análisis.

Factor de multiplicación efectiva	k_t	1.0
Límite superior para LHGR	$LHGR_t$	425 (W/cm)
Límite inferior para MCPR	$MCPR_t$	1.45
Tolerancia (ecuación 4)	δ	1×10^{-3}
Tolerancia (ecuación 5)	ε	1×10^{-1}

5. RESULTADOS

Para probar el sistema se utilizaron los patrones de recarga obtenidos previamente (ver referencia [1]), los cuales se obtuvieron con base en el diseño propuesto por la CNLV para el Ciclo 5 de la Unidad 1. Estos patrones de recarga tienen 112 combustibles frescos enriquecidos al 3.53 de U-235. Por otro lado, también se trabajó con la recarga real de la CNLV del ciclo analizado, para proponer un patrón de barras de control alternativo.

Es importante resaltar que para cada paso de quemado se obtuvo un patrón de barras de control, por lo tanto, se realizó 9 veces el proceso de búsqueda tabú, debido a que en el último paso de quemado todas las barras deben estar afuera (posición axial 48).

Para cada recarga de combustible generada se obtuvo el respectivo patrón de barras de control. Cabe señalar que debido a limitaciones de espacio únicamente se presentan resultados completos de un diseño de patrones de barras de control obtenido con el sistema propuesto. Posteriormente se presentará un resumen de otros diseños de patrones de barras de control obtenidos con dicho sistema.

5.1. Ejemplo de un Diseño de Barras de Control

A continuación se muestran los resultados de un diseño de barras de control obtenido con el sistema. Las Figuras 3 a 5 muestran el comportamiento de la función objetivo a través del proceso de búsqueda, para los pasos de quemado de 1 a 3, 4 a 5 y 7 a 9 respectivamente. En las gráficas mencionadas se puede observar que los valores de la función objetivo no son estrictamente decrecientes, lo cual es una característica de la búsqueda tabú, pues con ello se logra salir de mínimos locales.

Por otro lado, conviene mencionar que un problema que en ocasiones surge al aplicar la búsqueda tabú es que al crecer el número de iteraciones puede suceder que la búsqueda se pierda. Esto se evita cuando el problema planteado tiene restricciones, lo cual sucede en el problema planteado en éste trabajo.

La Tabla II muestra los valores obtenidos para LHGR y MCPR en cada paso de quemado. De la misma forma muestra el factor de multiplicación efectiva observado ($k_{eff,o}$) y las diferencias entre éste y el factor de multiplicación objetivo ($k_{eff,t} = 1.0$) en pcm's, así como el número de iteraciones que se realizaron en cada paso de quemado.

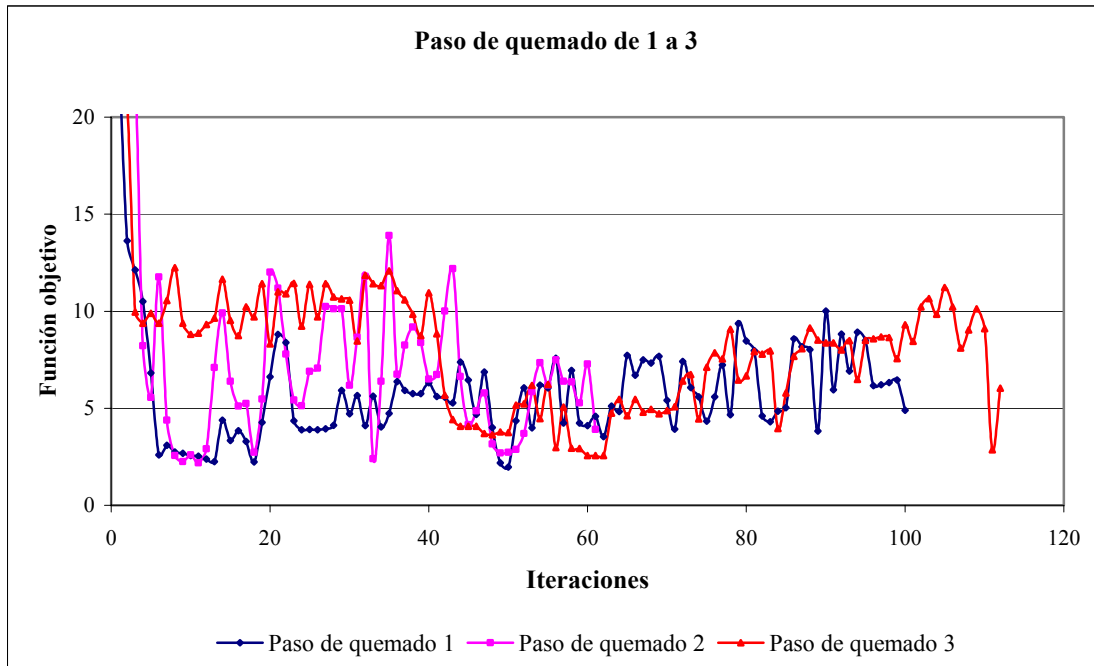


Figura 3. Comportamiento de la función objetivo a 1000, 2000 y 3000 MWD/TU.

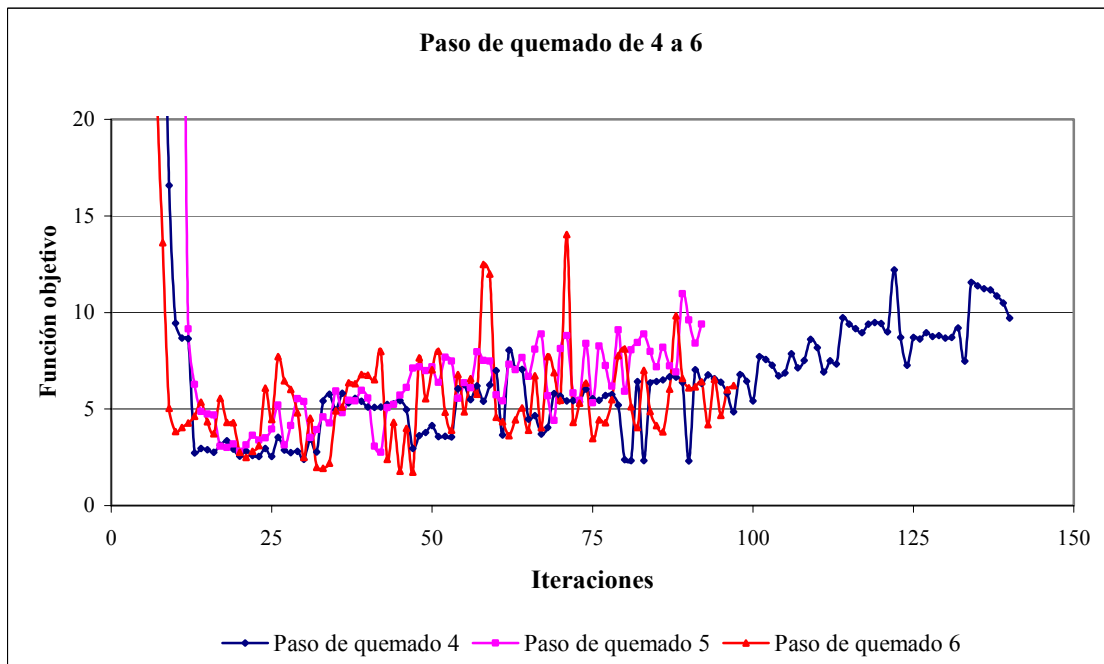


Figura 4. Comportamiento de la función objetivo a 4000, 5000 y 6000 MWD/TU.

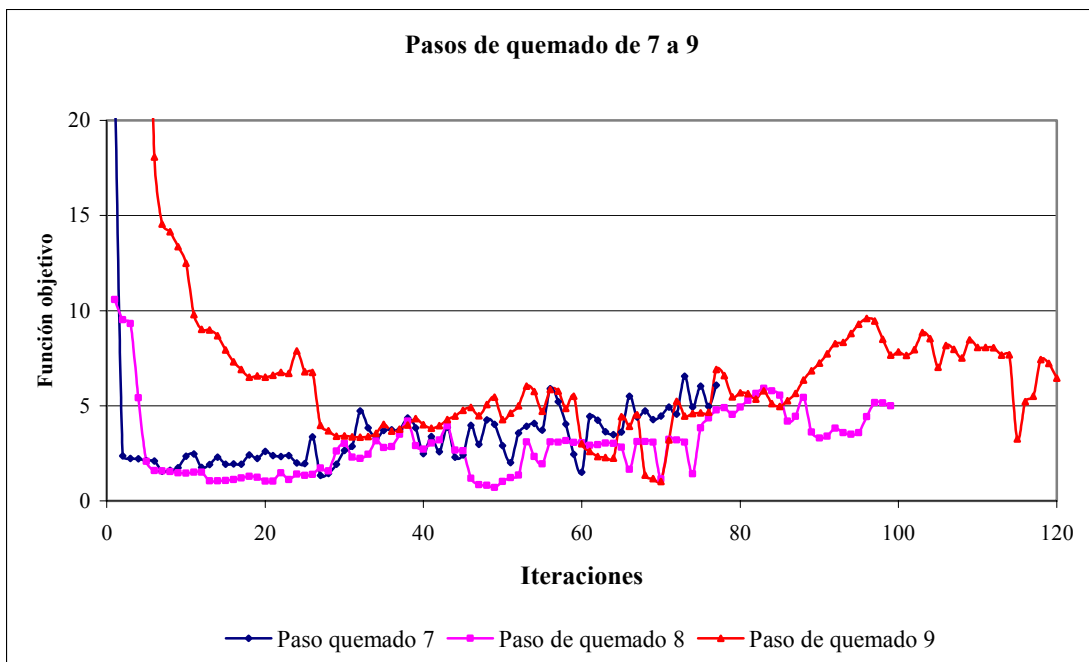


Figura 5. Comportamiento de la función objetivo a 7000, 8000 y 9000 MWD/TU.

Tabla II. Valores de los parámetros obtenidos.

Paso de quemado (MWD/TU)	LHGR (W/cm)	MCPR	$k_{eff,o}$	Diferencias en k_{eff} (pcm)	Iteraciones en cada paso de quemado
0-1000	415.02	1.5935	1.00198	198	100
1000-2000	423.34	1.4530	1.00131	131	61
2000-3000	392.91	1.6485	0.99814	186	112
3000-4000	404.82	1.5404	0.99934	66	140
4000-5000	415.06	1.5780	1.00193	193	92
5000-6000	424.04	1.4839	1.00182	182	97
6000-7000	420.26	1.5499	0.99986	14	77
7000-8000	408.83	1.4613	0.99922	78	99
8000-9000	412.98	1.4559	0.99806	194	120
9000-9993.8	358.43	1.6175	0.99909	91	1

En las Figuras 6 a 15 se muestran los patrones de barras de control obtenidos en cada paso de quemado, con la observación de que en el último paso sólo se realiza el cálculo con todas las barras afuera, de igual forma las celdas vacías corresponden a barras que no se mueven durante todo el proceso, esto es, tienen la posición 48.

Continuando con el ejemplo, las Figuras 16 a 25 muestran los perfiles axiales de potencia obtenidos con cálculos Haling y los obtenidos con los patrones de barras de control encontrados con la búsqueda tabú, para cada paso de quemado considerado. En dichas figuras se puede apreciar que el ajuste entre los perfiles es bastante aceptable.

4		48		
12		12		48
10		12		4

Figura 6. Patrón de barras de control en el paso de quemado 1.

14		10		
10		48		10
4		10		14

Figura 7. Patrón de barras de control en el paso de quemado 2.

48		16		
0		8		16
4		0		48

Figura 8. Patrón de barras de control en el paso de quemado 3.

48		12		
6		4		12
16		6		48

Figura 9. Patrón de barras de control en el paso de quemado 4.

48		12		
8		2		12
10		8		48

Figura 10. Patrón de barras de control en el paso de quemado 8.

48		4		
12		8		4
12		12		48

Figura 11. Patrón de barras de control en el paso de quemado 9.

46		8		
4		18		8
0		4		46

Figura 12. Patrón de barras de control en el paso de quemado 7.

46		2		
12		46		2
32		12		46

Figura 13. Patrón de barras de control en el paso de quemado 8.

48		6		
48		46		6
48		48		48

Figura 14. Patrón de barras de control en el paso de quemado 9.

48		48		
48		48		48
48		48		48

Figura 15. Patrón de barras de control en el paso de quemado 10.

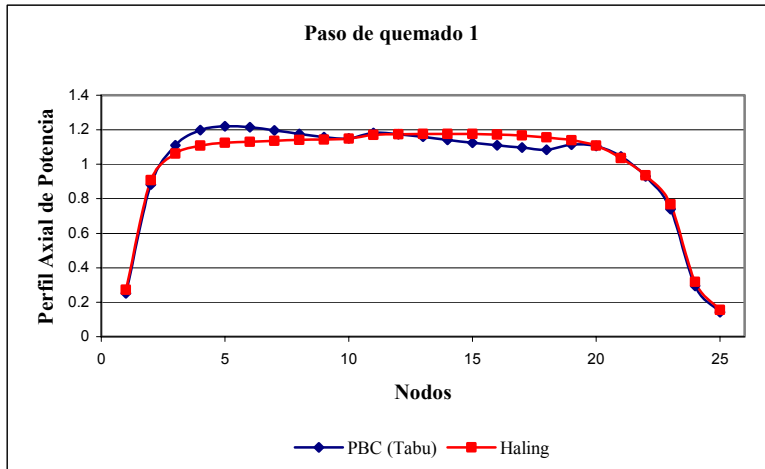


Figura 16. Perfil axial de potencia a 1000 MWD/TU.

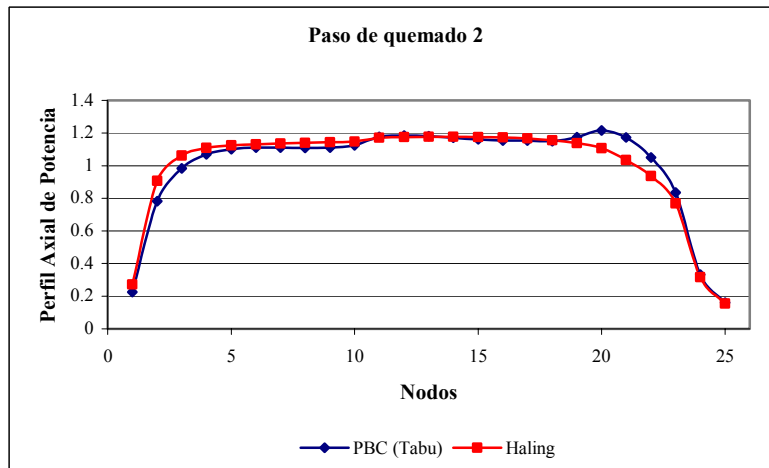


Figura 17. Perfil axial de potencia a 2000 MWD/TU.

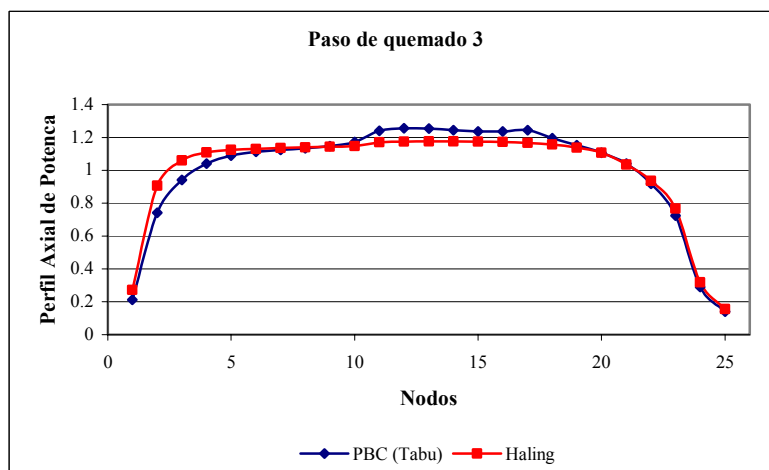


Figura 18. Perfil axial de potencia a 3000 MWD/TU.

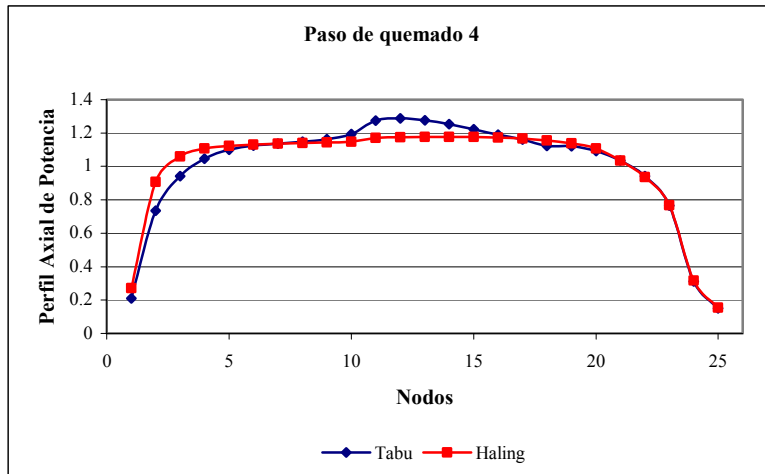


Figura 19. Perfil axial de potencia a 4000 MWD/TU.

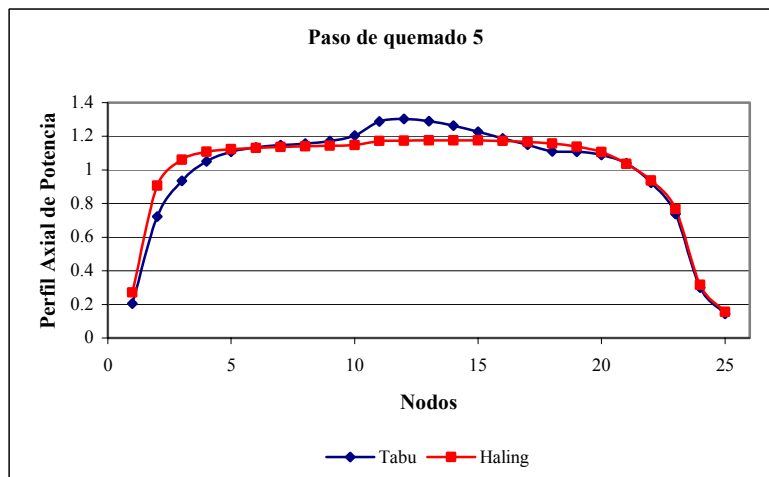


Figura 20. Perfil axial de potencia a 5000 MWD/TU.

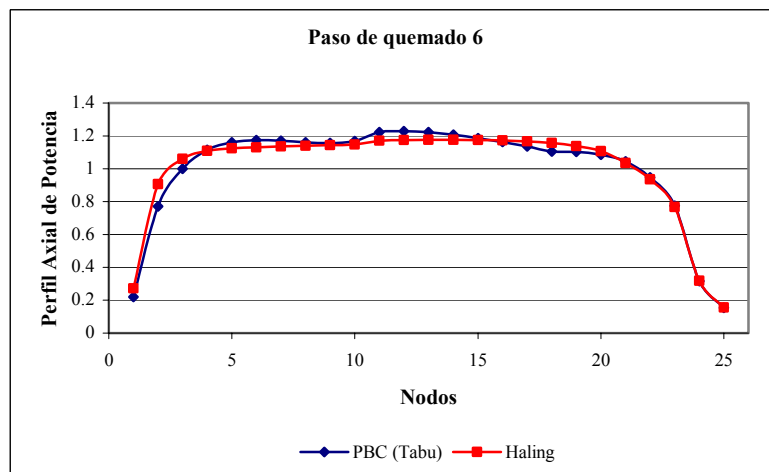


Figura 21. Perfil axial de potencia a 6000 MWD/TU.

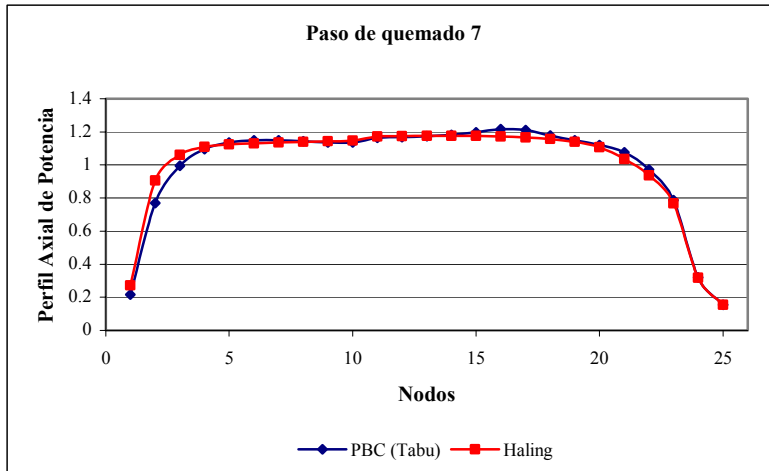


Figura 22. Perfil axial de potencia a 7000 MWD/TU.

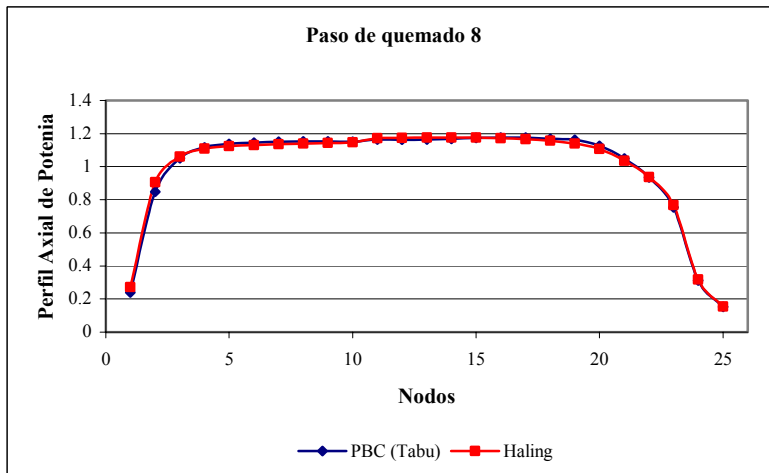


Figura 23. Perfil axial de potencia a 8000 MWD/TU.

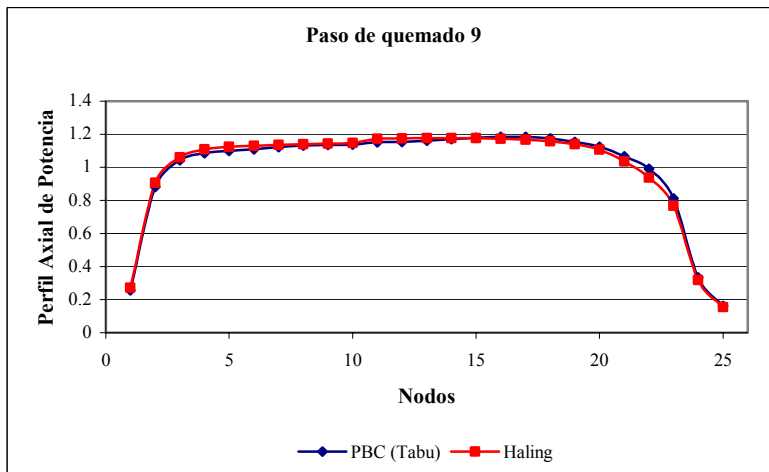


Figura 24. Perfil axial de potencia a 9000 MWD/TU.

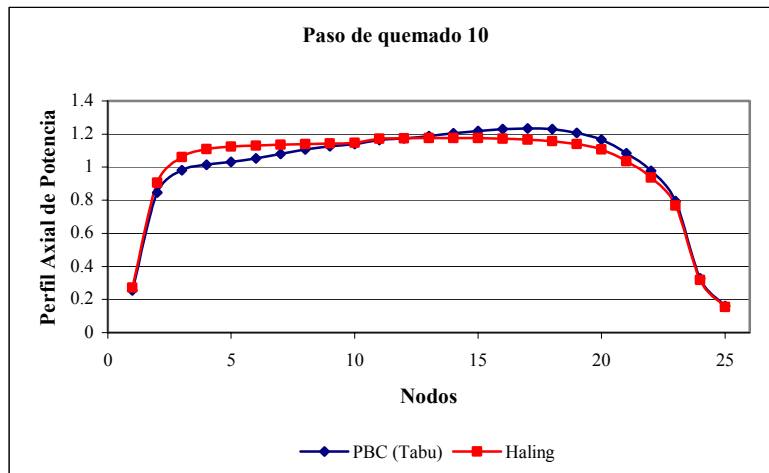


Figura 25. Perfil axial de potencia a 10000 MWD/TU.

En el ejemplo analizado anteriormente la función objetivo se evaluó 20744 veces, el tiempo de CPU que tomó dicho proceso fue de 6 horas aproximadamente, el número total de iteraciones durante la búsqueda fue de 898 (ver Tabla II) y finalmente, al realizar el cálculo de la energía para el patrón de barras obtenido, nos arrojó un incremento de 221 MWd/TU respecto al cálculo obtenido en el diseño de la recarga del trabajo previo. Es importante mencionar que en todos los pasos de quemado, excepto en el final, se utilizó un valor de 1.0 para $k_{eff,t}$, mientras que en el último paso de quemado se utilizó un valor de 0.997 para $k_{eff,t}$.

5.2. Breve resumen sobre otros ejemplos

A continuación se presenta un breve resumen de otros resultados obtenidos con el sistema, para los diseños de recargas de combustible generados en el trabajo previo (ver Referencia [1]), de igual forma se incluyen los resultados al trabajar con la recarga original de la CNLV.

La Tabla III muestra la energía obtenida en el trabajo previo con un cálculo Haling, la energía con los diseños de patrones de barras de control generados con el sistema, los valores máximos y mínimos de todo el ciclo para los límites térmicos LHGR y MCPR, el margen de apagado al inicio del ciclo, el número de iteraciones, así como el tiempo de CPU empleado y el número de evaluaciones realizadas, todo lo anterior para cada ejecución.

Tabla III. Resultados de otras ejecuciones.

Energía Haling (MWD/TU)	Energía con PBC (MWD/TU)	LHGR	MCPR	SDM	Iteraciones	CPU (horas)	Evaluaciones de la función
9706.9	9836.9	423.99	1.4899	1.0	843	6.10	18882
9821.1	10109.1	424.76	1.4807	1.2	962	6.90	21950
9621.3	9906.3	424.95	1.4809	1.2	750	5.23	16636
9684.9	9899.9	424.93	1.4551	1.7	953	6.85	21425
9734.7	9943.7	424.62	1.4741	1.8	795	5.84	18382

La Tabla IV muestra los resultados para el diseño de patrones de barras de control encontrado, empleando la recarga original de la CNLV en el ciclo analizado. Esta Tabla tiene la misma estructura que la anterior.

Tabla IV. Resultados utilizando la recarga original de la CNLV.

Energía con PBC (MWD/TU)	LHGR	MCPR	Iteraciones	CPU (horas)	Evaluaciones de la función
9890.0	438.945	1.4523	798	5.74	17958

Como ya se dijo, por cuestiones de espacio, en estos ejemplos no se mostrarán los patrones de barras de control obtenidos, ni las gráficas de los perfiles axiales de potencia. Cabe señalar que dichos resultados son similares a los mostrados en el ejemplo de la sección anterior.

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con el sistema demuestran que se puede extender la longitud del ciclo y a su vez obtener el patrón de barras de control respectivo, cumpliéndose los límites térmicos considerados. Adicionalmente se puede observar que la diferencia entre el perfil axial de potencia obtenido en cada paso de quemado y el perfil axial de potencia propuesto (cálculo Haling), no rebasan el 10% y en muchos casos es bastante menor dicha diferencia.

En cuanto a los patrones de barras de control propuestos para la recarga original del ciclo analizado, se observó que se tiene un incremento de la energía extraída, de aproximadamente un 3% con respecto a los patrones de barras diseñados para esa recarga.

Es conveniente señalar que los patrones de barras obtenidos con el sistema, contemplan un mínimo de intercambios entre posiciones someras y profundas de las barras. Lo anterior implica una operación más sencilla del reactor.

Finalmente, como trabajo futuro se pretende acoplar el sistema que optimiza las recargas de combustible con el sistema propuesto en este trabajo, utilizando otros perfiles axiales de potencia, con el objetivo de realizar la optimización integral de ambos problemas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el CONACYT a través del proyecto 33806-U para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Alejandro Castillo, Gustavo Alonso, Luis B. Morales, Cecilia Martin del Campo, J. L. François, Edmundo del Valle, "BWR fuel reloads design using a Tabu search technique", *Annals of Nuclear Energy* **Vol. 31**, p. 151-161 (2004).

2. Juan José Ortiz S., José Luis Montes T, Ignacio Requena R., “Una metodología para obtener los patrones de barras de control en un BWR usando algoritmos genéticos”, *XIV Congreso Anual de la SNM/XXI Reunión Anual de la SMSR*, Guadalajara, Jalisco, México, 10-13 de Septiembre, (2003).
3. Juan José Ortiz S., Ignacio Requena, “Una metodología para obtener los patrones de barras de control en un BWR usando sistemas basados en colonias de hormigas”, *XIV Congreso Anual de la SNM/XXI Reunión Anual de la SMSR*, Guadalajara, Jalisco, México, 10-13 de Septiembre, (2003).
4. J. L. François, C. Martin-del-Campo and Tavares, “Development of a BWR control rod pattern design based on fuzzy logic and heuristics”, *Annals of Nuclear Energy* **Vol. 31**, p. 343-356 (2004).
5. S. R. Specker, L. E. Fennern, R. E. Brown, K. L. Stark & R. L. Crowther, "The BWR control cell core improved design", *Transactions of American Nuclear Society* **Vol. 30**, p. 336-338 (1978).
6. K. Almenas & R. Lee, “*Nuclear Engineering. An Introduction*”, Springer-Verlag, USA (1992).
7. T. Kawai, H. Motoda, T. Kiguchi, M. Ozawa, “A method for generating a control rod program for boiling water reactors”, *Nuclear Technology* **Vol. 28**, p. 108-118 (1976).
8. Scandpower AS. User Manual CM-Presto. Version CM914B. Rev. 6, July 16 (1993).
9. F. Glover, “*Tabu Search Part I*”, ORSA, Journal of Computing 1, p. 190-206 (1968).