



MX0500347

# Algoritmos bio–inspirados para la obtención de patrones de barras de control en reactores BWR

*Ortiz Juan José, Perusquía Raúl, Montes José Luis*

*Departamento de Sistemas Nucleares, Gerencia de Ciencias Aplicadas*

## Resumen

*En el trabajo se presentan métodos basados en Algoritmos Genéticos y Sistemas basados en Colonias de Hormigas para la obtención de los Patrones de Barras de Control de un ciclo de equilibrio de 18 meses para la Central de Laguna Verde. Se presenta una comparación de resultados obtenidos con los métodos y con los de diseño de dicho ciclo de equilibrio. Como consecuencia del estudio, se encontró que el algoritmo basado en las Colonias de Hormigas logró disminuir el periodo de coastdown (disminución de potencia al final del ciclo) en cinco y medio días respecto al diseño original, lo que representa un ahorro anual de 100 000 \$US*

## Introducción

**A**ctualmente en el ININ se realizan estudios con algunas técnicas de optimización bio–inspiradas para mejorar el desempeño de los ciclos de combustible de los reactores de agua en ebullición (BWR) de la Central de Laguna Verde (CLV).

En el trabajo se aplicaron Algoritmos Genéticos (AG) y un Sistema basado en Colonias de Hormigas (SCH) con el fin de tratar de mejorar el desempeño de un ciclo de equilibrio de 18 meses [1] desarrollado para la CLV. Este ciclo de equilibrio en diferentes aspectos representa un ciclo óptimo propuesto a partir de la experiencia operacional de varias décadas de los reactores BWR. Intentar mejorar su desempeño es de antemano un reto difícil y pone a prueba la habilidad de estos métodos para el diseño de Patrones de Barras de Control (PBCs).

A continuación se describen brevemente las dos técnicas que se emplearán para la búsqueda de PBCs.

### Sistemas basados en colonias de hormigas

Los Sistemas basados en Colonias de Hormigas están motivados en la capacidad de las hormigas para encontrar la ruta más corta entre las fuentes de alimento y su nido. La habilidad de trazar el camino más corto se logra con la cooperación de toda la colonia de hormigas. El modelo artificial de una colonia de hormigas, imita el compor-

tamiento de las hormigas reales para encontrar la mejor solución a un problema específico. En concreto se utilizó el SCH propuesto por Dorigo[2].

El modelo de SCH para la obtención de PBCs se implementa como sigue: una colonia de M hormigas se “mueve” o salta entre las distintas barras de control y les asigna una posición axial utilizando una Regla de Transición de Estados. Una vez posicionadas todas las barras de control, cada hormiga de la colonia deposita una cantidad de feromona en la posición axial que asignó a cada barra, esto lo hace con la Regla de Actualización Local de Feromona. Posteriormente, los M PBCs son evaluados con CM-PRESTO [3] y las posiciones axiales del mejor PBC propuesto reciben otra aportación de feromona, por medio de la Regla de Actualización Global de Feromona. Toda la colonia repite este proceso hasta que el depósito de feromona sigue una tendencia. Después de varias iteraciones, las posiciones axiales con mayores cantidades de feromona corresponderán al mejor PBC. El sistema AZCATL-PBC fue implementado con este algoritmo y en la referencia 4 se pueden encontrar los detalles de las reglas que utiliza el SCH.

### Algoritmos genéticos

Los Algoritmos Genéticos (AG) [5,6] están inspirados en la evolución y reproducción de las especies biológicas. La Teoría de la Evolución sugiere que los individuos de una especie que están mejor adaptados a su ambiente, son los que sobreviven y se reproducen; por el contrario, los indivi-

duos menos adaptados mueren y no dejan descendencia. Con esto se asegura que las especies evolucionan hacia individuos mejor adaptados para la vida y constituyen lo mejor de su especie. Los AG artificiales toman algunas ideas y conceptos básicos de dicha teoría para crear un conjunto de buenas soluciones (a un problema específico) a partir de un conjunto de soluciones aleatorias.

Cada solución a un problema, que en este caso es un PBC, es codificada en forma de cromosomas que son vectores de longitud 5 y donde cada componente se denomina gen y representa a una barra de control. El valor del gen indica la posición axial de la barra de control asociada. La manera de crear nuevas soluciones o cromosomas es por medio de los mecanismos de cruce y mutación. En el cruce, los genes de dos cromosomas padre son combinados para crear dos nuevos cromosomas. En la mutación, los genes de un cromosoma pueden sufrir alteraciones de forma aleatoria. En [7] se muestran los detalles del sistema GACRP que utiliza un AG para la búsqueda de los PBCs.

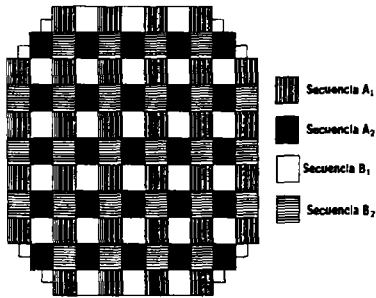


Fig. 1. Secuencias de barras de control en los reactores de la CLV.

Ambos sistemas maximizan la siguiente función objetivo:

$$F(k_{ef}, MCPR, MLHGR, P) = C - G(k_{ef}) - H(MCPR) - I(MLHGR) - J(P) \quad (1)$$

$$G(k_{ef}) = \begin{cases} w_1(k_{ef} - k_{obj}) & \text{si } (k_{ef} - k_{obj}) > \delta k \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

$$H(MCPR) = \begin{cases} \frac{1.45w_2}{MCPR} & \text{si } MCPR < 1.45 \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

$$I(MLHGR) = \begin{cases} \frac{w_3 MLHGR}{400.0} & \text{si } MLHGR > 400 \text{ W/cm} \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

$$J(P) = w_4 \sum_{i=1}^{25} (P^i - P_{Hal}^i)^2 \quad (5)$$

donde  $C$  es una constante arbitraria que se introduce para hacer positiva a la función;  $k_{obj}$  es el valor objetivo de  $k_{ef}$  que se tomó como 1.0000;  $\delta k$  es una tolerancia para la  $k_{ef}$ ;  $P_{Hal}^i$  es el PAP Haling en cada uno de los 25 nodos axiales en que se divide el reactor.  $w_i$  son constantes que se determinaron de forma experimental y tienen el propósito de dar o quitar importancia a las variables asociadas.

Los valores de las constantes involucradas en las Ecuaciones (2) a (5) fueron  $w_1 = 7000$ ,  $w_2 = 2$ ,  $w_3 = 5$ ;  $w_4 = 1$  para la primera mitad del ciclo y  $1/25$  para la segunda; la constante  $C$  de la Ecuación (1) se determinó en 50;  $\delta k = 0.001$ . En las Ecuaciones (3) y (4), se indican algunos umbrales para penalizar a los PBC's por límites térmicos; sin embargo, estos no son los valores límite para esas variables. Así para el MCPR el valor mínimo es 1.40, mientras que para el MLHGR es 430 W/cm.

## Metodología

El estudio con las técnicas bio-inspiradas se centró exclusivamente sobre la obtención de los PBCs y del caudal del refrigerante que superara el factor de capacidad del diseño original del ciclo. Para esto se utilizaron los mismos diseño de ensambles combustibles frescos, el mismo patrón de carga de combustible, los mismos márgenes de diseño a los límites térmicos y la misma longitud total del ciclo de equilibrio; lo cual implica que a la descarga del combustible, el quemado promedio resultara idéntico al ciclo de equilibrio original y, por lo tanto, el quemado de descarga durante el estudio no fuera un factor a optimizar.

La idea es que el único parámetro para evaluar la mejora del ciclo, debida a la propuesta de PBCs con métodos bio-inspirados, sea el aumento del período de operación a plena potencia y por consecuencia la disminución de los días de operación bajo régimen de *coastdown*. La disminución de la potencia nominal durante el *coastdown* reduce el factor de capacidad del ciclo y, cualquier disminución del periodo del *coastdown*, representa un aumento en el factor de capacidad del ciclo; que a su vez, disminuye la componente del costo capital anual.

Con el objeto de hacer una mejor comparación de ambas técnicas, se utilizó una población de 25 cromosomas en el AG y también una colonia de 25 hormigas para el SCH; de este modo ambas técnicas evalúan la misma cantidad de PBCs en cada generación o iteración. Los PBCs diseñados por el AG y el SCH, cumplen con las siguientes condiciones: mantener crítico al reactor dentro

de un intervalo de reactividad ( $\pm 100$  pcm), cumplir con los márgenes térmicos de diseño (Minimum Critical Power Ratio MCPR  $> 1.45$  y Maximum Linear Heat Generation Rate MLHGR  $< 430.0$  w/cm) y ajustar un perfil axial de potencia promedio objeto.

## Resultados

La búsqueda de los PBCs para el ciclo de equilibrio de 18 meses usando el AG requirió un poco más de 3 horas de CPU en una estación de trabajo alpha de DEC y se realizaron del orden de 10,000 evaluaciones de PBCs. En el caso del SCH se requirieron alrededor de 2.5 horas de CPU realizándose aproximadamente 8,000 evaluaciones. En ambos casos se usó como simulador del núcleo, el simulador CM-PRESTO en tres dimensiones.

La Tabla I muestra la longitud de quemado (Q) hasta el final de las condiciones a 100% de potencia y caudal (End of Rated EOR), alcanzada según un cálculo Haling [8], la obtenida con los PBCs de diseño original, los del sistema GACRP y los del Sistema Azcatl-PBC. La longitud de quemado para la etapa de incremento de caudal (Increased Core Flow, ICF) se mantuvo constante (440 MWD/T). Como consecuencia de las variaciones del quemado a condiciones nominales, la longitud del *coastdown* (CD en la tabla) también es variable. Se puede apreciar que los PBCs propuestos por Azcatl-PBC disminuyen el tiempo de quemado de esta etapa de operación, lo que permitiría al reactor operar a niveles más altos de potencia, sin disminuir el factor de capacidad.

Tabla I. Comparación de los Algoritmos Bio-inspirados con datos del diseño original				
Quemado (MWD/T)	Haling	Original	GACRP	Azcatl-PBC
Q EOR	9830	10896	10760	11000
Q ICF	440	440	440	440
Q CD	1575	509	645	405
Q Total	11845	11845	11845	11845

## Conclusiones

Se aplicaron dos algoritmos bio-inspirados: algoritmos genéticos y sistemas basados en colonias de hormigas, para la búsqueda de PBCs en un ciclo de equilibrio.

La evaluación se lleva a cabo a través de la comparación del periodo de *coastdown* del caso de referencia (diseño original) y los obtenidos con los sistemas utilizados. El resultado de la evaluación de los sistemas fue:

- Con Azcatl-PBC se logró una mejora, respecto del ciclo de equilibrio de 18 meses original, estimado en 100 000 \$US anuales de costo capital.

- Con el GACRP no se logró una mejora respecto del ciclo de equilibrio de 18 meses original, teniendo una penalización estimado en 130 000 \$US anuales de costo capital.

Como trabajo futuro se quiere meter el caudal de agua en el núcleo como parte del proceso de optimización en los sistemas GACRP y Azcatl-PBC ya que en este estudio se hizo variar de forma manual. Al hacer esta implementación, se espera que los resultados mejoren significativamente.

## Agradecimientos

Este estudio fue desarrollado en el Departamento de Sistemas Nucleares del ININ. Ello como parte de la asesoría institucional otorgada a la Gerencia de la Central Laguna Verde de la CFE, a la cual agradecemos su apoyo y aportación de información que hizo posible la realización del estudio presentado.

## Referencias

1. Hernández J. L., Perusquia R., Ramírez J. R.; 2001. Montes J. L. Cálculos con CM-PRESTO de los Ciclos de 18 Meses en Equilibrio Propuesta de GE para la CLV, IT.GCA/DSN-491, GCN-GC-049-01/R6.
2. Dorigo M. & Gambardella L. M.; 1997. *Ant Colony System: A Cooperative Learning approach to the Traveling Salesman Problem*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Vol. 1. Pp. 73-81.
3. Scandpower AS.; 1993. *User Manual CM-Presto. Version CM914B. Rev. 6*.
4. Ortiz J. J. y Requena I.; 2003. *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 Sociedad Nuclear Mexicana. Guadalajara, Mexico.
5. Davis. L.; 1991. *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold. New York. USA.
6. Goldberg D. E.; 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Learning Machine*. Addison-Wesley, USA.
7. Ortiz J. J.; Montes J. L. y Requena I.; 2003. *Una Metodología para obtener los Patrones de Barras de Control en un BWR usando Algoritmos Genéticos*. XIV Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana. Guadalajara, Mexico.
8. Haling R. K., 1964. *Operating Strategy for Maintaining an Optimum Power Distribution Throughout Life*, Topl. Mtg. Nuclear Performance of Power Reactor Cores, TID 7672. American Nuclear Society.
9. Graves H. W.; 1979, *Nuclear Fuel Management, Capítulo 5*, John Wiley Sons, Inc., New York.