

Propuesta de Tesis

Título

Diseño de recargas de combustible nuclear para un reactor de agua en ebullición utilizando sistemas avanzados de optimización.

Objetivo

Diseñar y optimizar una recarga de combustible para un reactor de agua en ebullición (BWR, por sus siglas en inglés), utilizando los diferentes sistemas que se han desarrollado para optimizar, de forma independiente, los diseños axial y radial del combustible, los planes de recarga y los patrones de barras de control dentro del núcleo.

Alcance

En este trabajo se pretende diseñar una recarga de combustible para un BWR partiendo de la información básica disponible como pueden ser la energía requerida, la extensión del ciclo y las condiciones de operación, así como información acerca de los parámetros denominados límites térmicos para el funcionamiento adecuado y seguro del reactor.

Esta información se alimentará a los diferentes sistemas de optimización, para obtener las propuestas más adecuadas en cuanto al diseño de combustible y a los patrones de carga y de barras de control dentro del núcleo.

En el proceso de diseño del combustible, se considerarán las características de los diseños actuales (10x10) ofrecidos por el proveedor [1], entre las que destacan la geometría y dimensiones de las celdas, el enriquecimiento diferenciado por zonas, la utilización de tapones de uranio natural en los extremos superior e inferior de los ensambles y el uso de gadolinia (Gd_2O_3) como veneno consumible distribuido a lo largo de algunas de las barras del ensamble combustible.

La recarga propuesta se utilizará para reproducir el ciclo 10 de la unidad 1 de la Central Nuclear Laguna Verde (CNLV), y se compararán los resultados obtenidos con los del diseño proporcionado por el fabricante del combustible y utilizado en la operación real.

Metas

- Realizar un análisis empleando el Modelo Lineal de Reactividad [2], para determinar el número de ensambles combustible que conformará la recarga, el enriquecimiento promedio en U^{235} de dicho combustible y la región de aplicación del diseño de acuerdo al quemado de descarga garantizado por el fabricante [1], y a la extensión del ciclo considerada en el plan de utilización de energía (PUE) [3].
- Optimizar el diseño radial de las celdas combustible, mediante el mejor acomodo o distribución de las barras, de acuerdo al enriquecimiento y a la concentración de gadolinia.
- Optimizar el diseño axial del ensamble combustible, para obtener la mejor distribución axial del combustible enriquecido y del veneno consumible con el fin de cumplir con los requerimientos de energía, reactividad y longitud del ciclo, verificando que no se violen los márgenes a los límites térmicos.
- Optimizar el diseño del patrón de colocación de los ensambles combustible en la recarga, buscando el óptimo acomodo tanto de combustibles ya utilizados, como de combustibles nuevos en el núcleo del reactor, para cumplir con las condiciones requeridas en la estrategia de operación de núcleo con celdas de control (en inglés Control Cell Core, CCC) [4], con el fin de incrementar los márgenes a los límites térmicos y mejorar la utilización del combustible así como el factor de capacidad.
- Optimizar el patrón de barras de control, buscando el mejor plan de movimientos de dichas barras para funcionar en la estrategia CCC, con el fin de obtener la máxima energía del ciclo, manteniendo los márgenes a los límites térmicos y manteniendo en todo momento durante el ciclo un adecuado margen de apagado.

Justificación

México cuenta con la CNLV desde hace 15 años, durante este tiempo ha funcionado de manera adecuada y segura, contribuyendo a la generación de energía eléctrica. Para que la CNLV continúe generando electricidad en forma eficiente y segura, es necesario desarrollar actividades que resulten en una mejor operación y un mejor rendimiento.

Una de estas actividades es precisamente el diseñar las recargas de combustible, y para tratar de obtener las recargas óptimas se han venido desarrollando herramientas que están dirigidas a realizar las diferentes tareas que constituyen el diseño de una recarga, de ahí que el trabajo que aquí se propone es utilizar estas herramientas para diseñar una recarga que cumpla con los requerimientos de energía, reactividad, márgenes a los límites térmicos y que esté pensada para

hacer una eficiente utilización del combustible, que reditúe en una operación segura y económica de la central.

Antecedentes

Los reactores tipo BWR, como los de la CNLV, funcionan en ciclos de operación que generalmente se extienden a 18 ó 24 meses, y al cabo de este tiempo deben detener su funcionamiento para intercambiar los combustible más agotados por ensambles nuevos, que permanecerán en el núcleo del reactor por 3 ó 4 ciclos de operación.

Dependiendo de la longitud del ciclo, de la energía que se requiere generar y de otros factores, el número de ensambles combustible que se intercambia es del orden de un cuarto a un tercio del número total que conforman el núcleo del reactor. Este número de ensambles nuevos que se cargan al núcleo, es la recarga de combustible y debe ser diseñada para cumplir diferentes condiciones que impactan en el adecuado y seguro funcionamiento del reactor.

El diseño óptimo de la recarga consta de varias etapas que se interrelacionan, a saber:

- Diseño radial de las celdas de combustible.
- Diseño axial de los ensambles de combustible.
- Diseño del patrón de carga en el núcleo de los combustibles nuevos, junto con los que fueron cargados en ciclos anteriores y que permanecen para el ciclo actual.
- Diseño del patrón de barras de control.

Cada etapa se considera como un problema de optimización combinatoria con restricciones que se deben cumplir y una determinada función objetivo que optimiza el proceso [5].

En la actualidad, para llevar a cabo las diferentes etapas del diseño de recargas, se ha incrementado la aplicación tanto de métodos de búsqueda, basados en reglas heurísticas, como de algoritmos de optimización, dentro de los más usados se encuentran:

- Sistemas expertos.
- Algoritmos genéticos.
- Búsqueda tabú.
- Recocido simulado.

Para desarrollar cada una de las etapas de que consta el diseño de una recarga de combustible, se han creado herramientas y procedimientos que fueron pensadas para realizar de manera óptima cada etapa.

Dichas herramientas y procedimientos son las que se propone utilizar en este trabajo para el diseño de una recarga.

Un ensamble combustible es un arreglo de 10x10 barras (para los diseños avanzados) que contienen combustible en forma de dióxido de uranio (UO_2) enriquecido en U^{235} y gadolinia (Gd_2O_3) como veneno consumible distribuido a lo largo de algunas de las barras.

Una celda de combustible es una de las diferentes secciones axiales que constituyen el ensamble, la diferencia entre las celdas estriba tanto en el enriquecimiento del combustible ($\% \text{ de } \text{U}^{235}$), como en la concentración de gadolinia.

Para diseñar las celdas se hace uso del código HELIOS [6], que desarrolla cálculos resolviendo la ecuación de transporte de neutrones en dos dimensiones utilizando del orden de 35 grupos de energía.

El proceso de optimización en el diseño radial de la celda [7], consiste en determinar las composiciones óptimas de enriquecimiento de combustible y de concentración de gadolinia, para obtener la óptima utilización del combustible, cumpliendo con las restricciones y objetivos que se imponen tanto desde el punto de vista de fabricación del ensamble, como de su operación segura y eficiente en el reactor.

El proceso de optimización del diseño axial del ensamble combustible [8, 9, 10], consiste en encontrar la óptima colocación axial de las celdas con diferentes composiciones tanto de enriquecimiento como de concentración de gadolinia, que minimiza el enriquecimiento promedio del ensamble combustible necesario para alcanzar la longitud del ciclo establecida en el PUE.

Dentro del proceso de optimización se hace uso del código COREMASTER-PRESTO (CM-PRESTO) [11], que es un simulador en 3 dimensiones del núcleo del reactor en estado estacionario que tiene acoplados los modelos neutrónico y termohidráulico, el primero basado en la ecuación de difusión de neutrones.

Con CM-PRESTO se realizan los cálculos para verificar que se cumple con la energía requerida y que no se violan los márgenes a los límites térmicos.

Con el propósito de agilizar los cálculos, se utiliza el principio Haling [12] para evitar en esta etapa generar patrones de barras de control.

El proceso de optimización del patrón de carga de ensambles combustible dentro del núcleo [13, 14], consiste en, una vez que han quedado identificados cuantos y cuales ensambles ya no entrarán en el siguiente ciclo, determinar el óptimo arreglo de colocación de ensambles nuevos y parcialmente consumidos, para cumplir las condiciones y requisitos impuestos para funcionar mediante la estrategia CCC, minimizar la presencia de picos de potencia en el núcleo y cumplir con las condiciones de generación de energía establecidas en el PUE, a la vez que se cumple con los márgenes a los límites térmicos. Dentro de este proceso también se hace uso del simulador del núcleo en 3D CM-PRESTO.

El proceso de optimización del patrón de barras de control [15, 16, 17, 18, 19], consiste en encontrar los movimientos adecuados de las barras de control para obtener la máxima energía del núcleo cumpliendo con las condiciones y restricciones impuestas para operar de manera segura.

Este proceso de generación del óptimo patrón de barras de control debe complementar al de generación del patrón de carga de combustibles para obtener patrones de carga óptimos más acordes con la operación real del reactor.

Metodología

Ha quedado de manifiesto que generar una recarga de combustible es un proceso complejo que requiere cubrir de manera sistemática 4 grandes etapas, cada una de las cuales es en sí un problema de optimización.

Para adentrarse en este proceso se plantea la siguiente hipótesis:

Es posible diseñar una recarga de combustible para un reactor tipo BWR, si se obtienen soluciones factibles de los diferentes procesos de optimización aplicados a cada etapa de que consta el diseño de la recarga.

Una parte de la metodología a emplear hace uso de la técnica de búsqueda Tabú (en inglés Tabu Search, TS), que es un procedimiento de búsqueda diseñado para evitar quedar atrapado en óptimos locales mediante la elaboración y actualización de una lista de movimientos prohibidos o tabú.

La búsqueda parte de una solución candidata inicial y se mueve hacia otra, \mathbf{x} , intentando llegar a un mínimo global de una determinada función objetivo $f(\mathbf{x})$.

Para cada solución candidata existe una vecindad, $\mathbf{N}(\mathbf{x})$, que es el conjunto de todas las soluciones candidatas que se pueden alcanzar desde \mathbf{x} con un solo movimiento.

Una característica especial de la Búsqueda Tabú estriba en que se puede pasar de una solución \mathbf{x} hacia otra \mathbf{x}^* que puede producir una solución peor de la función objetivo para escapar de un mínimo local. Para evitar regresar y hacer ciclos alrededor de un mínimo local, cualquier movimiento que regrese hacia un mínimo local recientemente visitado, se cataloga como tabú o prohibido y se ordenará en una lista tabú de movimientos recientes, donde permanecerá durante un número t , de iteraciones, después de las cuales sale de la lista y entra otro movimiento recientemente catalogado como tabú.

La diversificación es un mecanismo que mejora el desempeño de la búsqueda, llevando al método hacia regiones no exploradas. Esto se hace mediante una función que contabiliza la frecuencia con la que se realizan los movimientos, generándose una lista tabú de frecuencias, en la que un movimiento será tabú si su frecuencia excede un límite, que se adapta dinámicamente al incrementarse las iteraciones.

Las listas tabú podrían prohibir movimientos que lleven a una mejor evaluación de la función objetivo, con el fin de tratar de evitar esta situación, se introduce el criterio de aspiración, para sacar de la lista tabú un movimiento que puede ser útil.

El proceso de búsqueda se detiene cuando la función objetivo alcanza un valor menor a uno predeterminado, o cuando se alcanza un número máximo de iteraciones, o cuando se ha investigado el número total de soluciones.

La función objetivo se formula según la etapa del diseño de que se trate, de este modo, en el diseño radial [7] en que se requiere cumplir con los siguientes objetivos:

- Minimizar el enriquecimiento promedio de la celda combustible.
- Aproximarse lo más posible a un comportamiento predeterminado del factor de multiplicación infinito (k_{∞}) como función del quemado.
- Aproximarse lo más posible a un valor predeterminado de la concentración de gadolinia al inicio del ciclo.
- Mantener un factor de potencia pico (en inglés Power Peaking Factor, PPF), al inicio del ciclo, menor que un valor máximo, $PPF_{\text{máx}}$.

se formula la siguiente función objetivo global:

$$Z(x) = w_E * E(x) + w_S * S(x) + w_G * G(x) + w_P * (PPF_0(x) - PPF_{\text{máx}})$$

Donde w_E , w_S , w_G y w_P son factores de peso que se asignan a priori, para indicar la importancia relativa de cada objetivo.

En el diseño axial [9], donde el objetivo es minimizar el enriquecimiento promedio del ensamble combustible necesario para alcanzar la longitud del ciclo requerida, cumpliendo con las restricciones de seguridad a través de los límites térmicos MLHGR, XMPGR, MCPR, PPF y MRNP se formula la siguiente función objetivo:

$$f(e) = C - |\Delta\text{Energía}(e)| * w_1 + \Delta\text{Enriq}(e) * w_2 + \Delta\text{MLHGR}_k(e) * w_3 + \Delta\text{XMPGR}_k(e) * w_4 + \Delta\text{MRNP}_k(e) * w_5 + \Delta\text{PPF}(e) * w_6 + \text{HEX}(e) * w_7 + \Delta\text{SDM}(e) * w_8 + \Delta\text{MCPR}_k(e) * w_9$$

donde

C = Constante

$\Delta\text{Energía}(e)$ = Diferencia entre la energía calculada del ciclo y un valor objetivo.

$\Delta\text{Enriq}(e)$ = Diferencia entre el enriquecimiento máximo posible y el valor promedio obtenido en el proceso de optimización.

$\Delta\text{MLHGR}_k(e)$ = Diferencia entre el valor límite de la máxima razón de generación lineal de calor y el valor promedio obtenido en el proceso de optimización para la posición axial k .

$\Delta\text{XMPGR}_k(e)$ = Diferencia entre el valor límite de la fracción de la razón de generación lineal de calor promedio en un plano y el valor promedio obtenido en el proceso de optimización para la posición axial k .

$\Delta\text{MRNP}_k(e)$ = Diferencia entre el valor límite de la máxima potencia relativa nodal y el valor promedio obtenido en el proceso de optimización para la posición axial k .

$\Delta PPF_k(e)$ = Diferencia entre el valor límite del factor de potencia pico radial y el valor promedio obtenido en el proceso de optimización para la posición axial k.

HEX(e) = Exceso de reactividad en caliente al inicio del ciclo obtenido en el proceso de optimización.

$\Delta SDM(e)$ = Diferencia entre el margen de apagado obtenido en el proceso de optimización al inicio del ciclo y el valor límite.

$\Delta MCPR_k(e)$ = Diferencia entre la mínima razón de potencia crítica obtenida en el proceso de optimización para la posición axial k y el valor límite.

w_1, w_2, \dots, w_9 son los factores de peso que se asignan a priori, para indicar la importancia relativa de cada objetivo.

El diseño del patrón de recarga utiliza un sistema automatizado [14], basado en la técnica de búsqueda tabú y en reglas heurísticas para hacer el acomodo de los ensambles combustible.

El objetivo es obtener un patrón de colocación de ensambles combustible nuevos y parcialmente utilizados, tal que maximice la energía que se genere durante el ciclo de operación, cumpliendo con las restricciones de colocación de ensambles para funcionar bajo la estrategia CCC, y de respeto a los márgenes de los límites térmicos de operación.

La función objetivo que se formula es:

$$f = \text{Energía} + w_1 * \Delta MRNP + w_2 * \Delta RPPF + w_3 * \Delta XLHGR + w_4 * \Delta XMPGR + w_5 * \Delta XM CPR + w_6 * \Delta SDM$$

que es muy similar a la utilizada en el diseño axial.

En el diseño del patrón de barras de control, en que se requiere cumplir con los siguientes objetivos:

- Mantener el factor de multiplicación efectivo en un valor de 1 ($k\text{-ef} = 1$) a lo largo del ciclo.
- Mantener los márgenes adecuados a los límites térmicos en todo momento durante el ciclo.
- Mantener el perfil axial de potencia lo más cercano a un perfil determinado con antelación .
- Al final del ciclo todas las barras de control deben estar totalmente extraídas del núcleo.

se formula la siguiente función objetivo global para evaluar el desempeño de los patrones de barras de control que se encuentran utilizando un sistema de búsqueda automatizado [17], basado en algoritmos genéticos:

$$F(k\text{-ef}, MCPR, MLHGR, P) = C - G(k\text{-ef}) - H(MCPR) - I(MLHGR) - J(P)$$

donde

$$G(k\text{-ef}) = \begin{cases} w_1 * (k\text{-ef} - k\text{-obj}) & \text{si } (k\text{-ef} - k\text{-obj}) > \delta k \\ 0 & \text{si } (k\text{-ef} - k\text{-obj}) \leq \delta k \end{cases}$$

$$H(\text{MCPR}) = \begin{cases} 1.45 * w_2 / \text{MCPR} & \text{si } \text{MCPR} < 1.45 \\ 0 & \text{si } \text{MCPR} \geq 1.45 \end{cases}$$

$$I(\text{MLHGR}) = \begin{cases} w_3 * \text{MLHGR} / 400 & \text{si } \text{MLHGR} > 400 \text{ watt/cm} \\ 0 & \text{si } \text{MLHGR} \leq 400 \text{ watt/cm} \end{cases}$$

$J(P) = w_4 \sum (P - \text{PHAL})^2$ la suma se hace en cada una de las regiones axiales del ensamble combustible.

y los diferentes w_i son factores de peso que se asignan a priori, para indicar la importancia relativa de cada objetivo.

Debido a la imposibilidad de fabricar ensambles combustible y probarlos en el reactor, así como de aplicar directamente los cambios en los patrones de carga y de barras de control, la metodología a emplear hace uso de programas de cómputo que simulan la creación de un diseño de combustible y el desempeño de ese combustible en el núcleo del reactor, obteniéndose en poco tiempo resultados del comportamiento del reactor durante el ciclo de operación.

Para hacer los diseños radial de las celdas y axial del ensamble, con los contenidos adecuados tanto de enriquecimiento de uranio como de la concentración de gadolinia, se hace uso del código HELIOS, mientras que para estudiar el comportamiento del núcleo del reactor durante el ciclo, se cuenta con el simulador del reactor en tres dimensiones CM-PRESTO.

Programa de actividades

Las actividades a desarrollar son las siguientes:

1. Búsqueda bibliográfica.
2. Determinar el número de ensambles que van a entrar como combustibles frescos, así como su enriquecimiento promedio.
3. Obtener, con el sistema de optimización RADIAL [7], los diseños de celdas de combustible para cada una de las principales zonas axiales (0, 40 y 70% de vacíos).
4. Obtener, con el sistema de optimización AXIAL [9], los diseños axiales de los ensambles combustible que son candidatos a formar la recarga y evaluar su desempeño en el núcleo del reactor mediante el simulador CM-PRESTO, aplicando el principio Haling para simplificar los cálculos y reducir el uso de recursos computacionales.
5. Diseñar, con el sistema de optimización OTSS [14], un patrón de carga de combustible basado en el esquema de carga de núcleo CCC y evaluar su desempeño con la ayuda del simulador CM-PRESTO.
6. Diseñar, con el sistema de optimización GACRP [17], un patrón de barras de control para complementar el patrón de carga y hacer una evaluación con CM-PRESTO del comportamiento de ambos patrones de manera conjunta y verificar que cumplen las restricciones a los límites térmicos y al margen de apagado.
7. Comparar los resultados obtenidos al utilizar la recarga diseñada para reproducir la operación del ciclo 10 de la unidad 1 de la CNLV con los reportados por el fabricante.
8. Escritura de la tesis.

Las actividades 2 a 6 forman parte de un proceso iterativo, por lo que se deben repetir las veces necesarias para alcanzar los valores óptimos de las funciones objetivo en las diferentes etapas.

Infraestructura Requerida

La Facultad de Ingeniería cuenta con el Laboratorio de Proyectos Especiales, en Ciudad Universitaria, y el Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares, en el campus Morelos. En ambos laboratorios se dispone de estaciones de trabajo tipo Alpha, en donde se ejecutan los simuladores HELIOS y

CM-PRESTO, así como de computadoras personales suficientes para el análisis y procesamiento de resultados, necesarias para el desarrollo de esta tesis.

Calendario de actividades

ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6
1	X X X X					
2	X X X X					
3		X X X X				
4		X X X X	X X X X			
5			X X X X	X X X X		
6				X X X X	X X X X	
7					X X	X X
8		X X X X	X X X X	X X X X	X X X X	X X X X

Bibliografía

- [1] EDB No. 3800 General Electric Company; Fuel Bundle Design Report GE12-P10CSB372-14GZ-100T-150-T6.
- [2] M.J. Driscoll, *et al.* "The Linear Reactivity Model for Nuclear Fuel Management," American Nuclear Society, 1990.
- [3] Comisión Federal de Electricidad, Departamento de Gestión de Combustible; "Plan de Utilización de Energía"; Revisión No. 17; Enero 2003.
- [4] S.R. SPEKER, *et al.* "The BWR Control Cell Core Improved Design," Trans. Am. Nucl. Soc., **30**, 336, 1978.
- [5] C. MARTÍN DEL CAMPO, "Técnicas Avanzadas de Computación Aplicadas al Diseño de Recargas," FI-UNAM, 2003.
- [6] HELIOS, Código para cálculos de celda, versión 1.5 Studsvik Scandpower.
- [7] J.L. FRANÇOIS, *et al.* "A Practical Optimization Procedure for Radial BWR Fuel Lattice Design Using Tabu Search with a Multiobjective Function," Annals of Nuclear Energy, 30(2003), 1213-1229.
- [8] K. HIDA, R. YOSHIOKA, "Optimization of Axial Enrichment and Gadolinia Distributions for BWR Fuel under Control Rod Programming", J.Nucl. Sci. Technol., 26(5), 492, 1989.
- [9] C. MARTÍN DEL CAMPO, *et al.*, "AXIAL: a system for boiling water reactor fuel assembly axial optimization using genetic algorithms," Annals of Nuclear Energy, 28(2001), 1667-1682.
- [10] A. A. KARVE, P. J. TURINSKY, "FORMOSA-B a Boiling Water Reactor In-Core Fuel Management Optimization Package II", Nuclear Technology, 131, July 2000.
- [11] SCANDPOWER A/S, "CM-PRESTO a 3-D Core Simulator," version cmp991b.
- [12] R.K. Haling, "Operating Strategy for Maintaining an Optimum Power Distribution Throughout Life," Topl. Mtg. Nuclear Performance of Power Reactor Cores, TID 7672, American Nuclear Society (1963).
- [13] J.L. FRANÇOIS, *et al.* "Development of an Automated System for Fuel Reload Patterns Design," Nuclear Engineering and Design, 193(1999), 13-21.
- [14] A. Castillo, *et al.*, "BWR Fuel Reloads Design Using Tabu Search Technique", Annals of Nuclear Energy, 31(2004), 151-161.

- [15] J.L. FRANÇOIS, *et al.* "Development of a BWR Control Rod Pattern Design System Based on Fuzzy Logic and Knowledge," *Annals of Nuclear Energy*, 31(2004), 343-356.
- [16] H. Moon, *et al.*, "Optimization of BWR Control Rod Pattern for Relaxed Rod Sequence Exchange"; International Conference on the New Frontiers of Nuclear Technology (PHYSOR 2002) Seoul, Korea, October 6-10 2002.
- [17] J.J. Ortiz, *et al.*, "Una Metodología Para Obtener los Patrones de Barras de Control en un BWR Usando Algoritmos Genéticos", XIV Congreso Anual SNM/XXI Reunión Anual SMSR, Guadalajara, Jalisco, México, Septiembre 2003.
- [18] J.J. Ortiz, *et al.*, "Una Metodología Para Obtener los Patrones de Barras de Control en un BWR Usando Sistemas Basados en Colonias de Hormigas", XIV Congreso Anual SNM/XXI Reunión Anual SMSR, Guadalajara, Jalisco, México, Septiembre 2003.
- [19] J.J. Ortiz, *et al.*, "Mejora del Patrón de Barras de Control del Ciclo de Equilibrio de 18 Meses para la CLV Empleando Algoritmos Bio-Inspirados", XIV Congreso Anual SNM/XXI Reunión Anual SMSR, Guadalajara, Jalisco, México, Septiembre 2003.