

U N I V E R S I D A D N A C I O N A L
A U T Ó N O M A D E M É X I C O

FACULTAD DE INGENIERÍA

D I S E Ñ O Y O P T I M I Z A C I Ó N
A X I A L D E C O M B U S T I B L E
N U C L E A R P A R A R E A C T O R E S
B W R

T E S I S

P A R A O B T E N E R E L
T Í T U L O D E I N G E N I E R O
E L É C T R I C O E L E C T R Ó N I C O
M Ó D U L O D E
ELECTRÓNICA PARA COMUNICACIONES
P R E S E N T A

MAURICIO ALEJANDRO GARCÍA VALDEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR. JUAN LUIS FRANÇOIS LACOUTURE



México, D.F.

2006

Agradecimientos

A mi madre por ser el pilar en la construcción de mi ser, por formar los cimientos que sostienen mi vida moral, ética y de crecimiento. Por su coraje en su papel de madre y padre siendo ejemplo de orgullo y fortaleza siempre remando en contra de su época social. Por su amor, respeto y confianza a mis proyectos de vida…por darme la vida.

A mi tía Coco, por ser mi segunda madre, por su alegría por vivir y ser ejemplo de sencillez.

A la Abuelita por sus deseos de verme crecer.

A Pelancha y Toño por siempre estar conmigo, por sus consejos, por su entendimiento de la vida.

A mis primos Luis Eduardo y Mariana, por ser como mis hermanos, por tantos años de compartir experiencias y vivencias. Que ésta tesis sirva de camino para que al final lleguemos juntos al éxito.

A Marcela, por ser determinante en cada paso que doy, por siempre estar presente en mis pensamientos, por tu apoyo y comprensión, por ser vital en cada uno de los días de mi vida, por cambiar mi vida y enseñarle que aun queda mucho que aprender.

A Luis Ciro por ser como el hermano que nunca tuve.

A mis amigos, que con su variedad agregan valor y experiencias a mi vida: Miguel Ángel García, Pancho, Alejandro, Ángel García, Dierk, Ángel Montiel, Ismael, Mariela y todos los demás.

Al Dr. Juan Luis François por ser todo un ejemplo de superación y profesionalismo así como por su apoyo, dedicación y confianza para realizar este trabajo. Al igual que la Dra. Cecilia Martín del Campo

A todos los familiares y compañeros que han dejado alguna experiencia, porque cada elemento es importante en la formación de una persona.

Í N D I C E

INTRODUCCIÓN..... 1

Capítulo 1. **Conceptos de Energía Nuclear**

Conceptos de Energía Nuclear..... 6
1.1 Fisión Nuclear..... 9
1.2 Reactores Nucleares..... 11
1.3 Descripción de los Reactores de Agua Ligera en Ebullición (Boiling Water Reactor)..... 19

Capítulo 2. **Administración de Combustible Nuclear**

2.1 Ciclo del Combustible Nuclear..... 23
2.2 Diseño Radial de Ensambles..... 25
2.3 Diseño Axial de Ensambles..... 26
2.4 Diseño del Núcleo del Reactor..... 27

Capítulo 3 **Métodos de Optimización de Combustible Nuclear**

3.1 Método de Búsqueda Basados en Reglas Heurísticas..... 29
3.2 Método de Búsqueda Tabú..... 29
3.3 Método de Algoritmos Genéticos..... 37

Capítulo 4 **Metodología del Diseño Axial de Ensambles de Combustible**

4.1 Desarrollo del Sistema de Optimización..... 40
4.2 Aplicación del Método Tabú..... 44

Capítulo 5 **Aplicaciones de la Metodología**

5.1 Modificación del Sistema para la Optimización Axial de Combustible... 50
5.2 Resultados de la Actualización del Sistema de Optimización Axial..... 53
5.3 Discusión de Resultados..... 57

CONCLUSIONES..... 58
APÉNDICE A..... 60
APÉNCIDE B..... 64
APÉNCIDE C..... 68
GLOSARIO..... 69
BIBLIOGRAFÍA..... 71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Fisión Nuclear..... 10

Figura 1.2.1 Vasija de un Reactor Nuclear tipo BWR..... 12

Figura 1.2.2 Barras de Control y Elemento Combustible..... 13

Figura 1.2.3 Reactor PWR..... 18

Figura 1.3 Esquema de un Reactor de Agua Ligera en Ebullición (BWR)..... 21

Figura 2.1 Ciclo del Combustible Nuclear..... 25

Figura 5.2.1 Diferentes Propuestas en las Longitudes de los Acomodos Axiales..... 55

Figura 5.2.2 Diseño Axial Final Optimizado..... 56

Í N D I C E D E T A B L A S

Tabla 4.1 Parámetros de Evaluación..... 41

Tabla 4.2 Valores Límites de Operación..... 42

Tabla 4.3 Parámetros Diferenciales de la Función Objetivo..... 43

Tabla 5.2 Resultados de la Optimización..... 54

Introducción:

Al igual que en cualquier empresa, fábrica o industria, uno de los principales retos es el de bajar los costos de producción, sin ser la excepción las centrales nucleoeléctricas, en donde es de vital importancia bajar el costo de generación de energía eléctrica, lo cual se traduce en obtener la mayor cantidad de energía posible por unidad de masa de combustible, y dentro del proceso llegar a la calidad total garantizando el mínimo de daños al medio ambiente aprovechando más los combustibles.

Las recargas de combustible nuclear en las centrales de agua en ebullición se realizan por periodos de 12 a 24 meses, donde la fracción de combustible más gastado se sustituye por nuevo, el cual se combina con el combustible irradiado que ha estado en el reactor por uno o más ciclos de operación. De esta manera se debe satisfacer la energía para el ciclo de operación propuesta por la compañía eléctrica además de respetar varios parámetros establecidos como criterios de diseño relacionados con la integridad del combustible y con la operación del reactor.

La etapa del diseño de recargas en los reactores de agua hirviente no resulta una tarea fácil debido a que involucra varios procesos de optimización, donde por la naturaleza misma de cada uno los convierte en un gran problema de optimización iterativo. Estos problemas inician por la administración de combustible nuclear, como primera etapa está el ciclo del combustible nuclear, en esta parte además de la explotación del mineral, su conversión de óxido de uranio U_3O_8 (yellowcake) en hexafluoruro de uranio natural (UF_6) que por medio de difusión gaseosa y el centrifugado de gas se obtiene el enriquecimiento deseado. Para su uso como combustible nuclear, el UF_6 enriquecido se convierte en polvo de dióxido de uranio (UO_2) con el que se fabrican las barras de combustible nuclear. Posteriormente se encuentra una de las etapas más importantes, la del diseño radial, que consiste en una distribución en forma radial de barras de combustible (10x10) con diferentes enriquecimientos de óxidos de uranio en U^{235} (2 a 5%) y contenidos de gadolinia Ga_2O_3 barras de agua y barras vacías. La siguiente etapa consiste en el diseño axial de ensambles

combustibles, que consiste en acomodar las diferentes celdas de combustible resultado del diseño radial que van a integrar un ensamble completo para finalmente llegar al diseño del núcleo del reactor, etapa que define la localización de ensambles nuevos y usados en el reactor además de definir las posiciones de las barras de control (patrón de barras de control) y del flujo de alimentación de refrigerante a diferentes pasos de quemado o irradiación.

Actualmente existen varias alternativas para agilizar estos problemas de optimización empleando varios criterios apoyados en los sistemas computacionales, es ahí donde la Facultad de Ingeniería de la UNAM a través de sus estudios de investigación ha encontrado soluciones a estos problemas.

La aplicación de la Técnica de Búsqueda Tabú (Tabu Search o TS) en el diseño axial de combustible para BWR ha demostrado su eficacia [1] además de poseer muchas posibilidades de mejorar sus resultados. Con la aplicación de este método se busca la distribución axial de celdas de combustible en un ensamble que será utilizado como elemento combustible nuevo en un patrón de recarga previamente determinado. Los algoritmos genéticos también han sido utilizados de manera exitosa para la optimización axial de combustible tipo BWR [2].

En la presente tesis, se presentan las modificaciones efectuadas al sistema de optimización axial basado en Búsqueda Tabú (BT) para el diseño axial de combustible tipo BWR, desarrollado previamente en el Grupo de Ingeniería Nuclear de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Con las modificaciones lo que se busca principalmente es considerar las características particulares del diseño mecánico del combustible tipo GE12, utilizado actualmente en la Central Nucleoléctrica de Laguna Verde (CNLV) y que considera las barras de combustible de longitud parcial.

La información obtenida en esta tesis permitirá planear recargas de combustible nuclear con las mejores condiciones para operar en un ciclo determinado garantizando un mejor rendimiento y aprovechamiento en los quemados del combustible, adicionalmente las personas encargadas en la planeación de las recargas se verán favorecidas con los cambios realizados al sistema para el diseño y optimización axial de combustible nuclear, los cuales facilitan su manejo y reduce su tiempo de ejecución.
Esta tesis está desarrollada en cinco capítulos que en general están comprendidos de la siguiente manera:

Capítulo 1: Aborda los conceptos básicos de la energía nuclear, describe la composición física y química de los átomos así como la de los isótopos de uranio, el manejo del isótopo de uranio por medio de la fisión nuclear hasta llegar al funcionamiento de los reactores nucleares.

Capítulo 2: Se describe el ciclo del combustible nuclear, se explican los métodos para su extracción, su conversión y su enriquecimiento para llegar a las etapas de la administración del combustible nuclear utilizados en los reactores. Empezando por el diseño radial, el diseño axial y el diseño del núcleo del reactor nuclear relacionado con el diseño de los ensambles combustibles.

Capítulo 3: Este capítulo expone los métodos de optimización de combustible nuclear utilizados anteriormente entre los que se encuentran: el método de algoritmos genéticos, los métodos de búsqueda basados en reglas heurísticas y la aplicación del método de búsqueda tabú, la cual se utilizó para el desarrollo de esta tesis.

Capítulo 4: En esta parte se explica la metodología empleada al diseño axial de ensambles de combustible, comenzando con el desarrollo del sistema de optimización por medio de simuladores computacionales, también se fijan los parámetros de evaluación y los límites de operación encaminados a la aplicación del método tabú.

Capítulo 5: Este capítulo describe y explica las aplicaciones de la metodología desarrollada, se analizan las modificaciones realizadas en el sistema de optimización y se examinan los resultados obtenidos. También se añaden comentarios y se termina con las conclusiones a este trabajo.

Capítulo 1

Conceptos de Energía Nuclear

En la naturaleza el átomo más simple que hay es el hidrógeno, cuenta con un protón y un electrón. Por tanto, para explicar el resto de los átomos, ha de haber otra partícula nuclear: el neutrón.

El neutrón es una partícula sin carga eléctrica, ligeramente más grande que el protón. Su existencia se comprobó hasta 1932. Se da el nombre de nucleones a los protones y neutrones en conjunto, ambos representan el 99% de la masa del átomo.

El número de protones que contiene el núcleo de un átomo se denomina número atómico y es igual al número de electrones orbitales. La suma del número de protones y neutrones se conoce como número de masa; este número proporciona una idea de la masa del átomo, ya que las masas de ambas partículas son aproximadamente iguales y la masa de los electrones es comparativamente despreciable debido a que el electrón es aproximadamente 1840 veces más ligero que el protón [3].

Existen alrededor de 272 átomos estables con distintos números de masa que dan lugar a los 90 elementos plenamente identificados.

En un átomo neutral, el número de protones nucleares es igual al número de los electrones orbitales. Sin embargo, el número de protones en el núcleo determina el tipo de átomo, es decir, el átomo de un elemento particular. Pueden suprimirse o agregarse electrones en los procesos de ionización, pero el número de protones que tiene permanece inalterado. Sin embargo el número de neutrones en el núcleo de un átomo si pueden ser variados, a estas familias se les llaman **isótopos** [4].

Dentro de reducidos confines del núcleo, los nucleones (número de protones más neutrones) están agrupados, cada uno de los cuales ocupa aproximadamente el mismo espacio. Los nucleones se hallan en el orden de 10^{-15} [m] de distancia unos de otros. Ello significa que hay grandes fuerzas eléctricas de repulsión entre los protones de carga positiva

($F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ **)**. Dado que los nucleones son partículas de masa, también aquí encontramos la omnipresente fuerza gravitacional ($F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$) no obstante la fuerza gravitacional es un factor de 10^{-40} más pequeño que la fuerza eléctrica, por lo cual es despreciable.

En el núcleo existe una gran fuerza de atracción que supera las fuerzas eléctricas de repulsión y mantiene unido al núcleo. Se da el nombre de fuerza nuclear o interacción fuerte, a esa fuerza de atracción que existe entre los nucleones.

Esta fuerza actúa bajo ciertos patrones, por ejemplo, neutrón-neutrón, protón-protón, pero no fuera del núcleo, ni en nucleones que tengan separaciones mayores que 10^{-12} [cm] aproximadamente (r > 10^{-12} [cm]), por lo que podemos resumir que la fuerza nuclear sólo tiene una gran fuerza de atracción, actúan entre pares de nucleones, tiene un alcance corto [4].

En las reacciones nucleares, la conversión de masa-energía trae grandes aportaciones para la generación de electricidad.

Los experimentos de la radiactividad de ciertos elementos como el uranio, el plutonio y el radio condujeron al descubrimiento del fenómeno de la transmutación de un átomo en otro, a partir de una desintegración espontánea que ocurría con gran desprendimiento de energía, hasta que Albert Einstein con sus estudios dijo que era el resultado de la transformación de pequeñísimas cantidades de masa de acuerdo con su fórmula de $E = mc^2$, lo que posteriormente condujo a la conclusión de que si se lograba desintegrar a voluntad átomos, se podrían obtener grandes cantidades de energía.

El principio básico en la obtención de energía nuclear empezó en 1937, Fermi, Segré y sus colaboradores habían estado sometiendo uranio al bombardeo de neutrones; por la radiactividad producida en un principio creyeron haber tenido éxito en la producción de nuevos elementos más allá del uranio 92, es decir una serie de nuevos elementos: 93, 94, 95,

etc. [5], debido a que el uranio, después del bombardeo, emitía electrones con diferentes valores de periodo de semi-desintegración. Si se atribuyen estos periodos diferentes a las desintegraciones sucesivas de los mismos átomos, resulta que un núcleo debería emitir varios electrones, uno detrás del otro. Con cada emisión, la carga nuclear crecería en una unidad, produciendo entonces un átomo de número atómico cada vez mayor. Posteriormente los esposos Curie-Joliot realizaron observaciones similares en Francia.

En 1938 Otto Hahn, Fritz Strassman y Lise Meitner pudieron comprobar el fenómeno de la fisión nuclear, bombardeando con neutrones a los núcleos del isótopo del uranio 235.

En diciembre de 1942, en la Universidad de Chicago, se obtuvo la primera reacción controlada de fisión nuclear en cadena bajo las investigaciones de Fermi, y hasta el fin de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) trabajó en el desarrollo de la bomba atómica en Los Álamos, Nuevo México. Más tarde se opuso al desarrollo de la bomba de hidrógeno por razones éticas [4].

1.1 Fisión Nuclear

Un tipo particular de reacción nuclear, es aquella en que un núcleo de gran masa absorbe un neutrón y se divide en dos núcleos, cada uno de los cuales tendrá aproximadamente la mitad de masa y varios neutrones. A esta reacción se le llama fisión nuclear, un ejemplo de esto es la fisión del ^{235}U :

$$ {}_{0}^{1}n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{56}^{141}Ba + {}_{36}^{92}Kr + 3{}_{0}^{1}n $$

El núcleo ^{235}U es el que se fisiona y los núcleos ^{141}Ba y ^{92}Kr son los productos de la fisión.

Existen otros tres núclidos tecnológicamente importantes: ^{235}U , ^{233}U y ^{239}Pu. El núclido ^{235}U se encuentra en forma natural (junto con el ^{238}U) y se obtiene de minerales usados como fuentes de energía. Los núclidos ^{233}U y ^{239}Pu son artificiales, se producen a partir de otros núclidos mediante reacciones nucleares [3].

Los resultados de la fisión no son únicos, la probabilidad de que los dos productos de la fisión tengan casi la misma masa es pequeña, mientras que una fisión más probable es aquella en que uno de los productos de la fisión tiene entre 90 y 100 uma (unidades de masa atómica) y la masa del otro está comprendida entre 133 y 143 uma Otro aspecto a resaltar es que no siempre se obtiene el mismo número de neutrones en la fisión, teniendo un promedio de 2.5 neutrones por fisión. En la siguiente figura se muestra el esquema de una fisión nuclear.

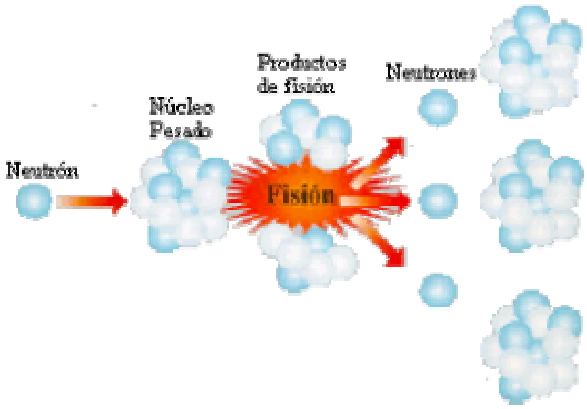


Figura 1.1 Fisión Nuclear

Para mantener la reacción en cadena se necesita un mínimo de núcleos capaces de fisionarse a fin de que los neutrones no escapen del material combustible, esta cantidad mínima de material se denomina *masa crítica*. El valor de la masa crítica depende del núclido particular que se fisione y de su entorno. En las centrales de energía nuclear, el entorno del combustible está controlado de forma que la reacción se mantenga a un ritmo estable.

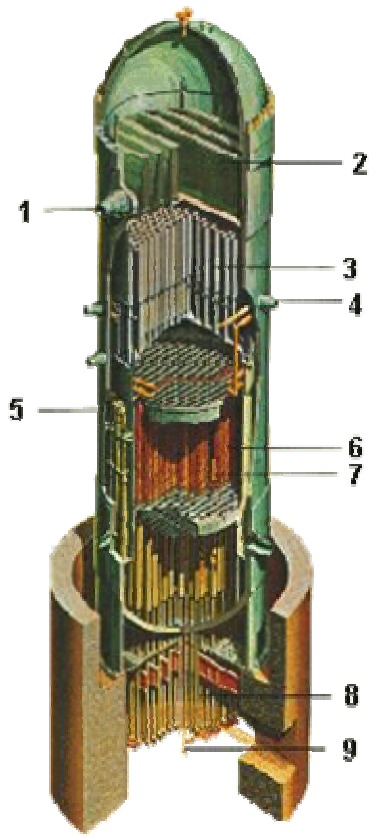
La energía liberada por la fisión es muy grande. La fisión de 1 kg de uranio 235 libera 18.7 millones de kilovatios hora en forma de calor.

El uranio presente en la naturaleza sólo contiene un 0.71% en peso de uranio 235; el resto corresponde al isótopo no físil, uranio 238. Una masa de uranio natural, por muy grande que sea, refrigerada con agua ligera, no puede mantener una reacción en cadena, porque sólo el uranio 235 es fácil de fisionar con neutrones de baja energía. Es muy improbable que un neutrón producido por fisión, con una energía inicial elevada de aproximadamente 1 MeV, inicie otra fisión, pero esta probabilidad puede aumentarse cientos de veces si se frena el neutrón a través de una serie de colisiones elásticas con núcleos ligeros como hidrógeno, deuterio o carbono. En ello se basa el diseño de los reactores de fisión empleados para producir energía.

1.2 Reactores Nucleares

Los reactores nucleares nacen de la idea de aprovechar la grandes cantidades de energía liberadas durante las reacciones nucleares, mejor conocidas como reacciones en cadena, resultado de bombardear con neutrones a un material físil, provocando grandes cantidades de calor, que al entrar en contacto con algún líquido como el agua, ésta entra en ebullición, principio por el cual se puede aprovechar la energía cinética de su vapor para mover enormes turbinas que al hacer funcionar un generador, pueden trasformar la energía mecánica en energía eléctrica [5].

Los reactores nucleares por lo general tienen el siguiente diseño básico, como se muestra en la figura 1.2.1, generalmente contienen pastillas de combustible en los tubos que a su vez forman varillas del combustible en el núcleo del reactor mostrado en la figura 1.2.2. La reacción en cadena y la producción de energía se regulan por medio de las barras de control formadas por boro o cadmio. Las barras de control se construyen con estos elementos por sus propiedades químicas ya que estos materiales son capaces de absorber neutrones; por lo tanto, se insertan entre los conjuntos de barras combustible y de ese modo puede regularse el número de neutrones disponibles para inducir la fisión y consecuentemente la reacción en cadena.



1. **Boquilla de salida de vapor.**
2. **Secador de vapor.**
3. **Separador de vapor.**
4. **Llegada de agua de alimentación.**
5. **Líneas de agua de recirculación.**
6. **Ensambles de combustible.**
7. **Barra de control.**
8. **Mecanismos de barra de control.**
9. **Canales para instrumentación nuclear.**

Figura 1.2.1 Vasija de un reactor nuclear tipo BWR.

Las barras de control [6] (ver figura 1.2.2) pueden ajustarse de modo que la energía se libere con una velocidad bastante estable. Para ello se requiere que en promedio, un neutrón proveniente de cada fisión inicie solo una fisión. En caso de que se necesitara más energía, las barras se extraen un poco más. Cuando se insertan por completo, pueden obstaculizar la reacción en cadena y apagar el reactor [4].

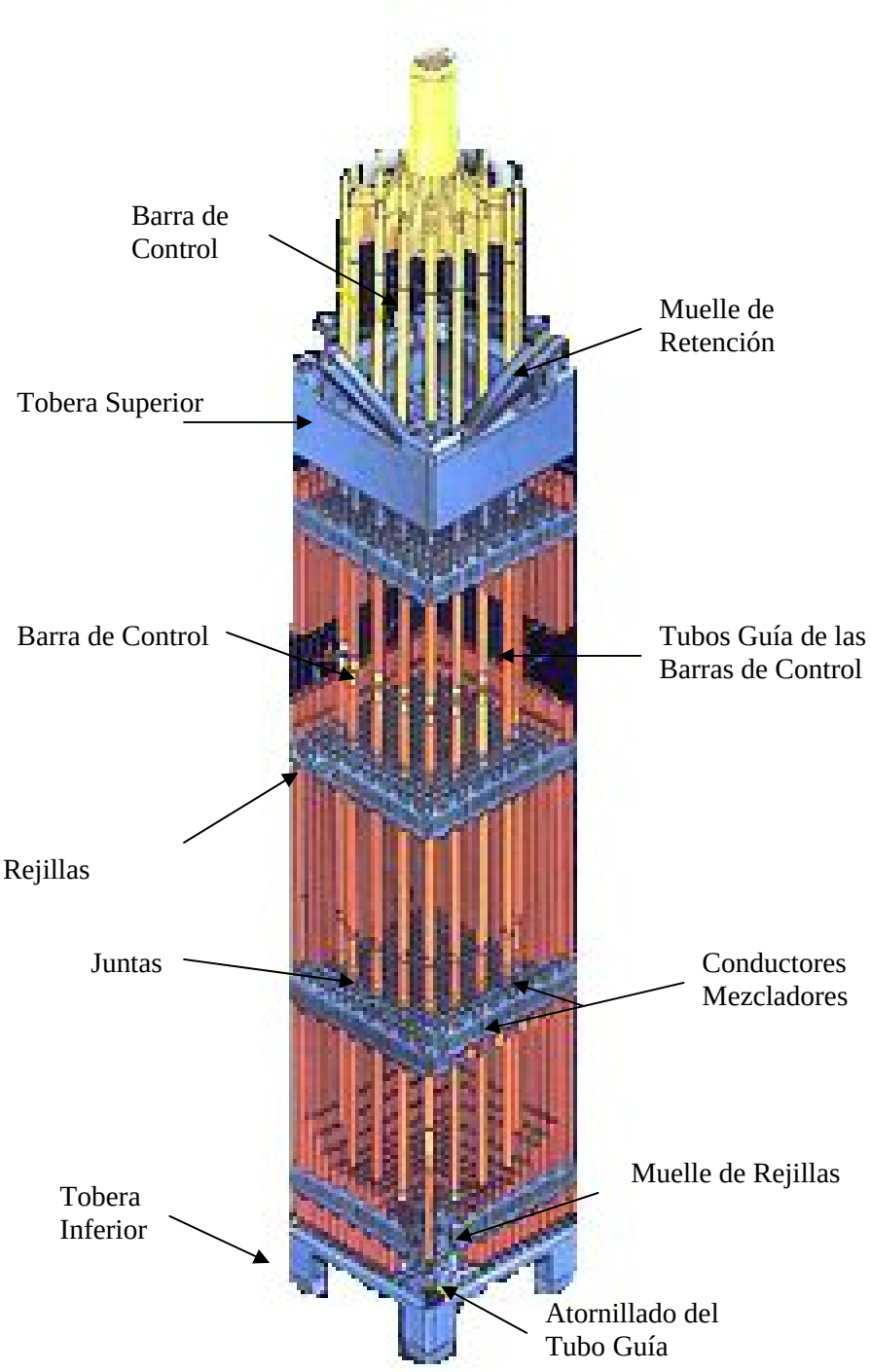


Figura 1.2.2 Barras de control y elemento combustible.

Un reactor nuclear puede funcionar de un año a dos años antes de tener que reabastecerlo de combustible; aunque en términos más adecuados se tendría que hablar de reabastecerlo de material físil, debido a que en un reactor nuclear no se lleva a cabo la combustión de ningún

material energético, su operación se realiza mediante la fisión. Sin embargo por analogía con su operación por la producción de energía mediante el calor, se le denomina a este material físil como combustible nuclear.

El uranio es el combustible nuclear comúnmente utilizado y puede ser de dos formas:

- Natural: que contiene 0.71% de ^{235}U (uranio 235) y 99.29% de ^{238}U , el cual no se fisiona. El natural se coloca en los reactores en forma de uranio metálico o de dióxido de uranio UO_2 , dispuesto en varillas compactas o tubos de un poco más de un centímetro de diámetro y varios metros de longitud, con agua pesada o con grafito.

- Enriquecido: al que artificialmente se eleva la concentración de uranio ^{235}U hasta en un 4% disminuyéndose la del ^{238}U al 96%. Se utiliza en forma de dióxido de uranio UO_2 , con el que se fabrican pequeñas pastillas cilíndricas, normalmente de un poco más de un centímetro de diámetro y longitud, mismas que se encapsulan en un tubo de aleaciones especiales de circonio perfectamente hermético, que tiene la función de contener los productos formados en la fisión, además de proteger a las pastillas de la corrosión y la erosión del fluido refrigerante.

También se pueden utilizar otros materiales físiles para operar un reactor nuclear como: plutonio 239 (^{239}Pu) y el uranio 233 (^{233}U) que se producen artificialmente a partir del ^{238}U y del torio 232 (^{232}Th) respectivamente.

El fluido refrigerante tiene en los reactores nucleares la misma función que el agua que circula por una caldera convencional: evacuar el calor producido por el combustible para producir vapor.

El refrigerante circula entre los ensambles de combustible impulsado por una bomba y debe cumplir con una serie de requisitos para que pueda realizar su función en forma satisfactoria:

capturar pocos neutrones, tener un elevado calor específico y no ser corrosivo para los tubos y demás elementos del reactor.
El refrigerante de un reactor nuclear no necesariamente tiene que ser agua, también pueden ser gases como el bióxido de carbono y el helio u otros líquidos como el agua pesada para los reactores de uranio natural y el sodio fundido para los reactores rápidos.

El refrigerante no sólo sirve como agente de transferencia de refrigerante-calor, sino también como moderador en los reactores térmicos.

El moderador favorece la fisión. La probabilidad de que un neutrón producido en la fisión, que lleva una energía de 1 [MeV] y una velocidad aproximada de 20,000 [km/s] inicie otra fisión, es muy baja, sin embargo, esta probabilidad puede verse ampliamente elevada si se frena al neutrón sin absorberlo, a una velocidad de 2 [km/s] por medio de una serie de colisiones elásticas, con núcleos ligeros como hidrógeno, deuterio o carbono.

El moderador debe reunir ciertas características como: que tenga un peso atómico ligero, que no absorba neutrones y que tenga una elevada densidad atómica.

Los moderadores más comunes son: el berilio, el grafito (carbono), el agua ligera u ordinaria y el agua pesada, que es un líquido semejante al agua ordinaria, pero en lugar de tener moléculas formadas por átomos de hidrógeno, está constituida por átomos de un isótopo de dicho elemento llamado deuterio, cuya masa es prácticamente el doble de la del hidrógeno, ya que mientras el núcleo del hidrógeno consta de un protón, el deuterio cuenta con un neutrón y un protón.

Las sustancias utilizadas como moderadores absorben distintas cantidades de neutrones, por ejemplo, el agua ligera absorbe más neutrones que el agua pesada, por lo que es necesario compensar ese efecto que tiene sobre las fisiones, aumentando el número de átomos de ^{235}U (enriqueciendo el combustible nuclear).

Con el agua ligera se necesitan apenas unas 29 colisiones en promedio para disminuir la velocidad de los neutrones a energías menores de 1 [eV]. Con el carbono se necesitan alrededor de 120 colisiones para disminuir la velocidad de los neutrones a un valor óptimo, aunque no es el mejor moderador, el grafito permite que una reacción en cadena tenga lugar en uranio natural (no enriquecido), dispuesto en una gran masa de grafito.

Debido a los efectos de radiación hacia los seres humanos y al equipo, se han preferido los reactores de presión a los de agua en ebullición, sin embargo estos últimos han mostrado una eficiencia ligeramente mayor y menores costos de mantenimiento [5].

El líquido caliente que fluye por el intercambiador de calor vaporiza un líquido más volátil, como el agua; el gas o vapor resultante, caliente y a presión, impulsa una turbina de diseño especial. La turbina a su vez mueve un generador eléctrico, generando la energía que puede iluminar ciudades, fabricas etc. [5].

Uno de los problemas conectados con tales reactores de energía, es el efecto de las intensas radiaciones neutrónicas sobre las estructuras metálicas. Los neutrones cambian algunos átomos y desplazan otros permanentemente de sus posiciones normales en el retículo cristalino de los sólidos dando como resultado el debilitamiento de ciertas partes mecánicas importantes.

Una de las principales preocupaciones en lo concerniente a la seguridad de los reactores nucleares se debe a que pueden salirse de control o entrar en un “estado de embalamiento” por una falla en las varillas de control o un accidente por pérdida de refrigerante (LOCA). Ante una liberación incontrolada de energía, el refrigerante no consigue enfriar el exceso de calor generado, o si se pierde refrigerante, el calor se acumularía en el núcleo. Algunas personas han planteado que el núcleo del reactor podría alcanzar una temperatura que las varillas de combustible se derretirían y el combustible se quemaría en el recipiente del reactor y el piso de contención; esto provocaría que escaparán al ambiente peligrosos materiales radiactivos (“Síndrome de China;” en él cual la masa de fisión se fundiría y

llegaría hasta China pasando por el centro de la Tierra. Según los cálculos que se han efectuado, eso no puede suceder en la realidad) [4].

Actualmente existen muchos tipos de reactores nucleares, dentro de los cuales destacan los siguientes: Reactores de Agua Ligera a Presión (Pressurized Water Reactor - PWR), Reactores de Agua Ligera en Ebullición (Boiling Water Reactor - BWR), Reactores de Agua Pesada a Presión (Pressurized Heavy Water Reactor - PHWR o CANDU), Reactores Enfriados por Bióxido de Carbono y Moderados por Grafito (Gas Cooled Reactor - GCR), Reactores Rápidos de Cría Enfriados por Sodio (Liquid Metal Fast Breeder Reactor - LMFBR), Reactores de Propulsión y Reactores de Investigación.

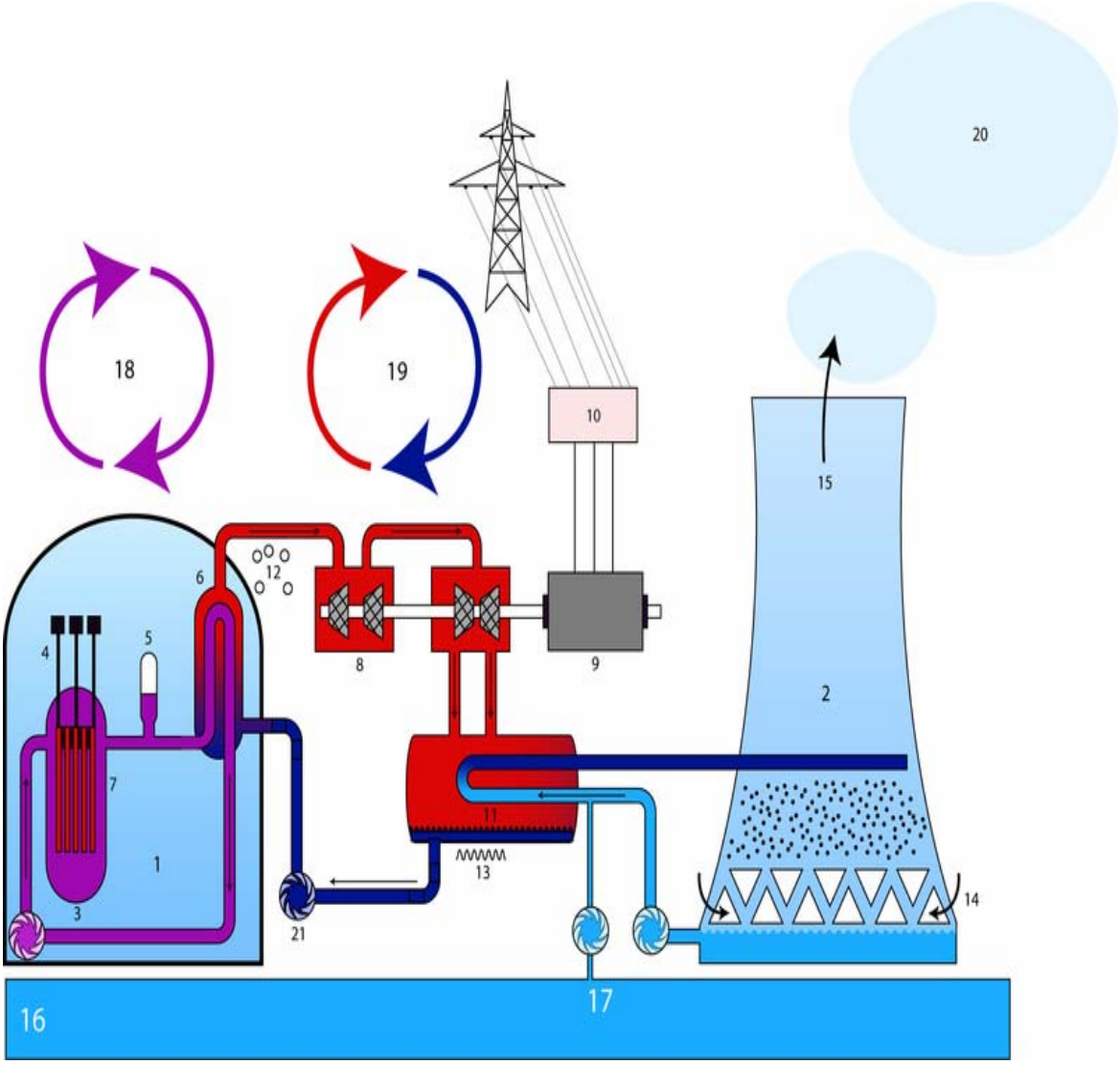
- *Reactores de Agua Ligera a Presión (Pressurized Water Reactor PWR)*

Este tipo de reactores fueron diseñados originalmente por Westinghouse Bettis Atomic Power Laboratory para aplicaciones en buques militares, se caracterizan porque sus ensambles de combustible se encuentran dentro de una vasija a presión, llena de agua ligera la cual desempeña el papel de moderador y refrigerante; a pesar de su elevada temperatura en su interior, el agua no entra en ebullición debido a la presión interna existente en la vajilla.

El agua caliente se extrae del reactor y se envía al generador de vapor, que funciona como un intercambiador de calor, donde el agua cede gran parte de su energía calorífica a otro volumen del mismo líquido, para después retornar al reactor. Por su parte el agua que fue calentada en el generador de vapor, entra en ebullición, produciéndose así el vapor que sirve para mover el grupo turbogenerador para que posteriormente sea condensado por un tercer circuito de agua, procedente de un lago, río o una torre de enfriamiento.

La vasija presurizada de un reactor típico tiene unos 15 [m] de altura y 5 [m] de diámetro, con paredes de 25 [cm] de espesor, el núcleo alberga unas 80 toneladas de dióxido de uranio en tubos delgados resistentes a la corrosión y agrupados en haces de combustible de uranio

enriquecido [4]. En la figura 1.2.2 se observa el esquema de un reactor básico de agua ligera a presión [7].



1. Bloque del Reactor
2. Torre de Refrigeración
3. Reactor
4. Barras de Control
5. Presurizador
6. Generador de Vapor
7. Elemento Combustible
8. Turbina
9. Generador
10. Transformador
11. Condensador
12. Formación de Gases
13. Líquido
14. Aire
15. Aire Húmedo
16. Río
17. Circulación de Agua Refrigerante
18. Circuito Primario
19. Circuito Secundario
20. Vapor de Agua
21. Bomba

Figura 1.2.3. Reactor PWR

1.3 Descripción de los Reactores de Agua Ligera en Ebullición (Boiling Water Reactor - BWR)

Estos reactores fueron originalmente diseñados por Allis-Chambers y General Electric, actualmente sólo operan los General Electric, los de ASEA-Atom y en algunas empresas europeas, su funcionamiento es muy parecido a los PWR ya que también emplean agua ligera como moderador y refrigerante, así como uranio enriquecido como combustible nuclear [4].

Este reactor permite hervir grandes cantidades de agua en el interior de su vasija a diferencia de los PWR. El reactor opera aproximadamente a 298.88 [ºC] produciendo vapor a presión alrededor de los 6894.757 [kPa] y generando de 570 a 1300 [MWe] con un 33% de eficiencia [8].

El vapor pasa por la línea principal hacia las turbinas generadoras. El vapor normalmente pasa de las turbinas de alta presión más pequeñas (High Pressure HP - Turbine), posteriormente pasa a los separadores de humedad (Moisture Separator) para después pasar a las 2 o 3 turbinas más grandes de baja presión (Low Pressure LP - Turbienes). Normalmente las turbinas de baja presión están conectadas una con otra al generador a lo largo de una flecha, pero no en una sola pieza.

El generador produce electricidad con voltajes cercanos a los 20,000 [V] en AC. Este potencial eléctrico es distribuido a un generador transformador el cual incrementa la tensión alrededor de 230,000 o 345,000 [V] que a su vez se distribuyen a una subestación o a un *switch-yard* de donde la energía es transmitida [4].

El vapor después de pasar por las turbinas, es condensado por medio de un condensador en donde agua proveniente de un océano, río, laguna, o mar circula a través de unas tuberías enfriando el vapor. Entonces el vapor condensado es bombeado hacia los calentadores alimentadores de agua a baja presión (Low Pressure Feedwater Heaters) posteriormente el

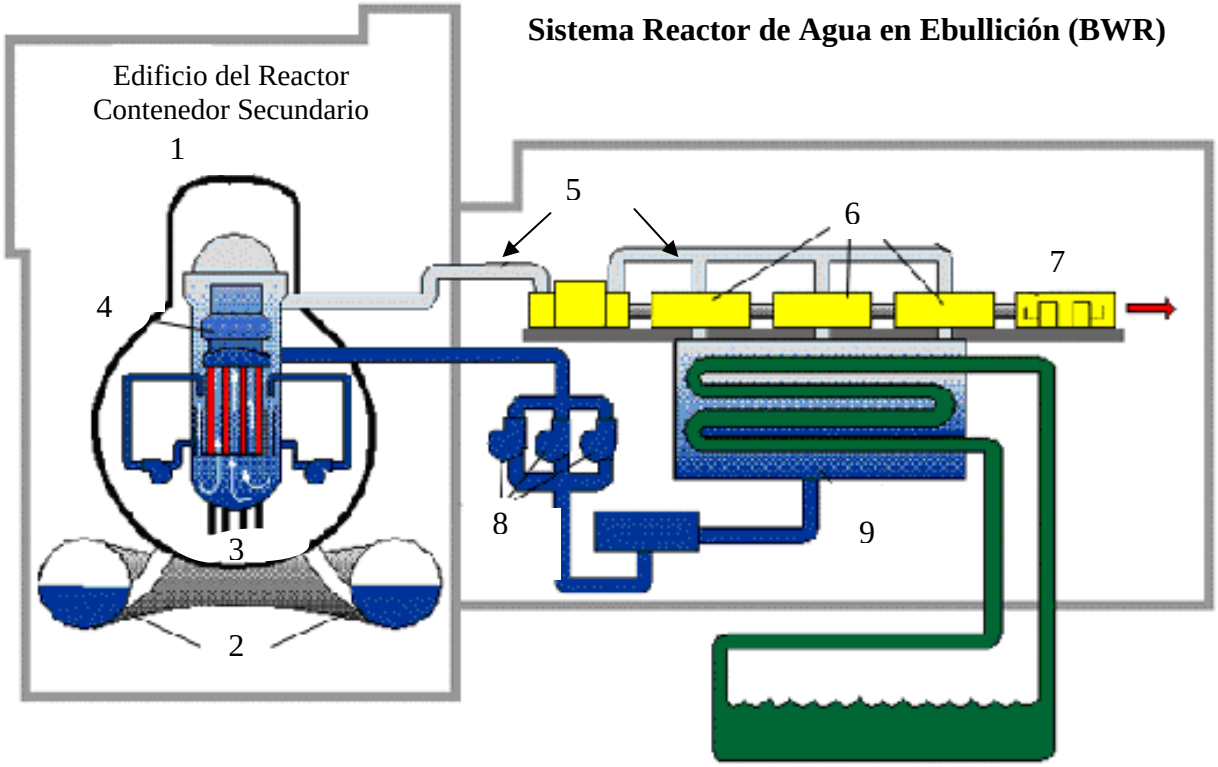
agua pasa a las bombas alimentadoras de agua (Feedwater Pumps) donde espera ser bombeada hacia el reactor y empezar el ciclo una vez más.
La potencia de los BWR es controlada por medio de dos métodos: por la inserción o retiro de barras de control y por el cambio en el flujo de agua a través del núcleo del reactor.

Los BWR son únicos en su sistema de barras de control (Control Rods), usados para apagar y mantener una distribución uniforme de la potencia que se encuentra a través del reactor, estas barras están insertadas en el fondo por la alta presión en la que opera el sistema. El posicionamiento de las barras de control es el método más común para controlar la potencia cuando se ha empezado a operar el reactor hasta aproximadamente al 70%. A partir de que las barras de control son retiradas, la absorción de neutrones decrece en el material de control y se incrementa en el combustible, por lo tanto la potencia del reactor aumenta. En cambio, cuando las barras de control son insertadas, la absorción de neutrones se incrementa en el material de control y decrece en el material físil ocasionando que la potencia del reactor disminuya.

El incremento o decremento en el flujo de agua a través del núcleo del reactor, es el método que se utiliza para controlar la potencia cuando el reactor está operando entre el 70% y el 100% de su potencia. A consecuencia de que el flujo de agua en el núcleo del reactor es incrementado, las burbujas de vapor (vacíos) son más rápidamente retiradas del núcleo, la cantidad de agua líquida se incrementa, la moderación de neutrones también se incrementa, más neutrones son frenados para ser absorbidos por el combustible nuclear y la potencia del reactor se incrementa. A medida que el flujo disminuye, los vacíos del vapor aumentan, la cantidad de agua líquida en el núcleo decrece, la moderación de neutrones decrece, pocos neutrones son frenados para ser absorbidos por el combustible nuclear y la potencia del reactor disminuye [8].

Los BWR también cuentan con albercas de supresión, las cuales son diseñados para usados como absorbedores del calor liberado si llegara a ocurrir un evento donde grandes cantidades de vapor fueran liberadas del reactor o por medio un sistema de recirculación del reactor (Reactor Recirculation System).

La sencillez en construcción y mantenimiento de este reactor lo hace el de menor costo. La ausencia de los generadores de vapor - intercambiadores de calor, determina que su eficiencia sea más elevada que la del PWR. Las desventajas que presentan los BWR son sus complejos diseños y cálculos de operación, contaminación de las turbinas por los productos de la fisión, la vasija de presión es mucho más grande que las de los PWR, por lo mismo los costos son más elevados en la infraestructura de la vasija, pero puede ser amortizado con su eficiencia térmica. En la figura 1.3 se presentan los principales componentes de un reactor tipo BWR [9].



1. Contenedor Primario
2. Alberca de supresión
3. Barras de Control
4. Núcleo del Reactor
5. Líneas Principales de Vapor
6. Turbinas
7. Generadores de Electricidad
8. Bombas abastecedoras de agua
9. Condensador

Figura 1.3 Esquema de un Reactor de Agua Ligera en Ebullición (BWR)

Capítulo 2

Administración de Combustible Nuclear

2.1 Ciclo del Combustible Nuclear

El ciclo del combustible nuclear consiste en un conjunto de operaciones necesarias de principio a fin que permitan procesar el uranio para usar como combustible nuclear en la operación de un reactor, así como los pasos para manejar con seguridad y depositar los desperdicios radiactivos del combustible agotado (materiales fisiles del combustible irradiado, productos de fisión y elementos transuránicos producidos en el reactor) [10].

Algunos reactores modernos, con pequeñas modificaciones, también pueden consumir torio, el cual es más abundante que el uranio.

El ciclo inicia con la exploración y explotación del mineral. Un depósito de uranio descubierto por técnicos geofísicos, es evaluado y muestreado para determinar la concentración de materiales de uranio que pueden ser extraídos a determinados costos de un depósito.

El uranio en la naturaleza consiste primariamente en dos isótopos, el U^{238} y el U^{235} donde un 99.28% es de uranio 238 y el resto 0.71% de uranio 235. Una vez que se ha extraído el uranio mineral, normalmente es procesado moliendo los materiales minerales en un tamaño uniforme y después tratando el mineral extraído por procesos químicos. Se lixivia el mineral y los licores de lixiviación se purifican por intercambio iónico o extracción por solventes, para recuperar finalmente el concentrado. El proceso de trituración comúnmente produce un polvo seco de uranio natural "yellowcake" [4] el cual es vendido como diuranato de sodio o amonio con una pureza del 85% en óxido de uranio U_3O_8 [10].

Conversión y enriquecimiento

El óxido de uranio U_3O_8 se envía a las plantas industriales de conversión, en donde inicialmente se convierte en dióxido de uranio UO_2, para luego ser hexafluorinado y transformado en tetrafloruro de uranio UF_4 que finalmente se hace reaccionar con flúor

gaseoso para producir hexafluoruro de uranio UF_6. Este compuesto reacciona fácilmente con el agua y materiales orgánicos, por lo que se envía a las plantas de enriquecimiento en cilindros de acero para evitar el contacto con el aire húmedo. La separación isotópica del UF_6 por difusión gaseosa consiste en hacer pasar este compuesto del uranio a través de una membrana porosa que favorece la difusión selectiva del uranio 235 sobre la del uranio 238 [10].

El otro proceso de separación isotópica del UF_6 por centrifugación gaseosa, consiste en bombardear este compuesto de uranio a un cilindro que gira a muy altas velocidades periféricas, del orden de 400 [m/s], donde se empobrece en 235 la fracción que se desplaza en la periferia del cilindro por la aceleración centrifuga que sufre el gas, enriqueciéndose por lo tanto la fracción que permanece cerca del eje [10].

Los diferentes enriquecimientos requeridos en el combustible de uranio son especificados por el cliente. Para los reactores de agua ligera, generalmente los enriquecimientos son máximo del 5% de ^{235}U .

Actualmente, la capacidad instalada en el mundo occidental para enriquecer uranio es de 34,000 toneladas anuales de trabajo separativo. Países como la Ex-Unión Soviética tienen una capacidad disponible de exportación estimada en 3,000 toneladas, los Estados Unidos tienen una capacidad de 7,700 toneladas anuales [10].

Debido a que la oferta es muy superior a la demanda, hay una fuerte competencia en el mercado internacional, por lo que los precios por trabajo separativo se reducen cada vez más. Actualmente se está desarrollando investigación para realizar la separación isotópica del uranio con radiación laser (AVLIS). La técnica consiste en irradiar vapores de uranio metálico o hexafloruro de uranio UF_6 con radiación laser a una frecuencia determinada, la cual excitaría de manera tan selectiva los átomos de uranio 235 que pueden ser separados electro-magnéticamente del uranio 238 en un solo paso [10]. Este método reduciría los costos por separación.

En la figura 2.1 se observan las seis etapas del ciclo del combustible nuclear [11].

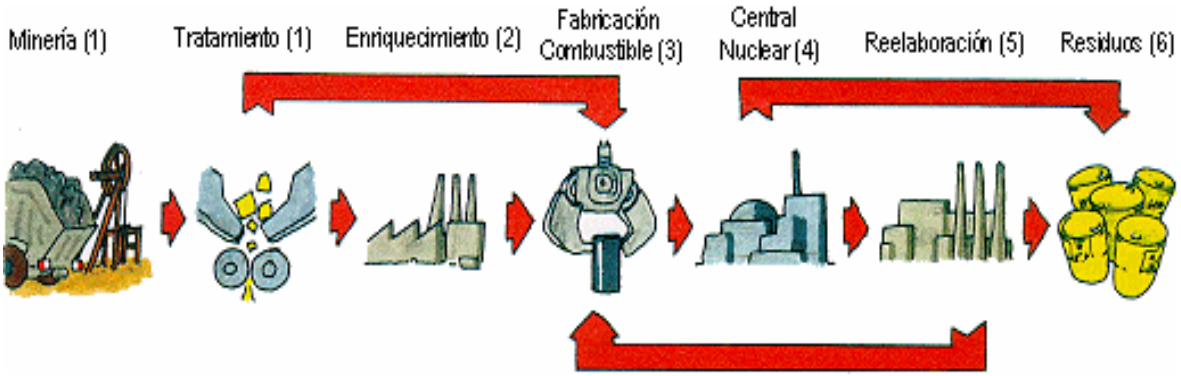


Figura 2.1 Ciclo del Combustible Nuclear

2.2 Diseño radial de ensambles

Una de las etapas esenciales de la administración de combustible en los reactores tipo BWR, como el reactor empleado en la nucleoeléctrica de México en Laguna Verde, es el diseño radial de combustible nuclear [12].

El diseño radial de ensambles es una distribución en forma radial de barras de combustible (10x10) con diferentes enriquecimientos de óxidos de uranio en U^{235} (2 a 5%) y contenidos de gadolinia Ga_2O_3, barras de agua y barras vacías [13]. El diseño y optimización radial se puede realizar mediante alguna técnica de optimización combinatoria, como la Búsqueda Tabú (TS) y los algoritmos genéticos. Para ello es necesario definir previamente una representación de la solución, la función objetivo, las restricciones y la implantación en sí del proceso de optimización.

El diseño radial está estrechamente relacionado con otras actividades como el diseño axial de combustible y el diseño del patrón de recarga del combustible en el núcleo; todas dirigidas a optimizar la economía con un mejor aprovechamiento del combustible nuclear,

facilitar la operación, así como también el de satisfacer los requerimientos de seguridad en el reactor (límites térmicos y de margen de parada).

2.3 Diseño Axial de ensambles

De forma semejante al diseño radial, el diseño axial es un problema de tipo combinatorio; después de pasar una primera etapa de optimización con el diseño radial, la segunda etapa es diseñar el acomodo axial de las diferentes celdas de combustible que van a integrar un ensamble completo.

Una celda de combustible consiste en un conjunto de barras conteniendo oxido de uranio con diferentes enriquecimientos en ^{235}U. Algunas de estas barras contienen gadolinia mezclada en diversas proporciones con el óxido de uranio. El número de barras con gadolinia presentes en la celda es otra variante más, además de la cantidad de barras de agua contenidas en el ensamble. Cada zona contiene un tipo de celda de combustible definido por el enriquecimiento del uranio, el contenido de gadolinia y la presencia de barras de agua. El objeto de tener diseños axiales heterogéneos, está ligado a mejorar, por un lado la seguridad en la operación del reactor y por otro lado a obtener mayor energía del combustible. Con diseños axiales heterogéneos se puede mejorar la distribución axial de potencia y aprovechar la estrategia de operación del corrimiento espectral [13].

Al igual que el diseño radial, el diseño axial de combustible es importante para mejorar la economía en el consumo de combustible, para obtener seguridad en la operación del reactor y para mantener adecuados valores de exceso de reactividad y de margen de apagado.

El problema de optimización de un diseño axial de combustible lo podemos ver como un problema multi-objetivo en el cual nos interesa obtener la máxima cantidad de energía por unidad de masa de combustible, por lo tanto se quiere maximizar la energía y minimizar el enriquecimiento del uranio contenido en el ensamble. Esto siempre respetando ciertas restricciones que aseguren la integridad física del combustible y la operación adecuada del

reactor. También se puede ver como un problema en el cual la energía generada debe ser fija y simplemente se busca el acomodo de celdas con menor enriquecimiento promedio que satisface esa energía y todas las otras restricciones, buscando minimizar el enriquecimiento promedio del ensamble, necesario para obtener la energía del ciclo propuesta para la operación del reactor, y satisfacer una serie de parámetros con valores límite establecidos como criterios de diseño de los reactores BWR.

2.4 Diseño del núcleo del reactor nuclear

También llamado diseño de recarga de combustible nuclear. Este diseño involucra varias etapas de optimización relacionados entre sí; dos de éstas directamente relacionadas con el diseño de los ensambles combustibles [14].

Como ya se ha mencionado, en la primera etapa de optimización se diseñan radialmente las celdas de combustible que van a acomodarse a lo largo del ensamble, es decir, se determina la distribución radial de diferentes enriquecimientos y contenidos de gadolinia. La segunda etapa es diseñar el *acomodo axial* de las diferentes celdas de combustible que van integrar un ensamble completo. Una tercera etapa de optimización tiene que ver con el *patrón de recarga* de los ensambles combustibles dentro del núcleo. En esta etapa se define la localización de ensambles nuevos y usados en el núcleo. Para ello se toman en cuenta las diversas zonas dentro del núcleo: la periferia, las posiciones de celdas de control utilizadas para operar el reactor, los ejes de simetría, etc. Una cuarta etapa de optimización es diseñar lo que se llama el *patrón de barras de control*, en el cual se definen las posiciones de las barras de control y el flujo de refrigerante, a diferentes pasos de quemado (irradiación) a lo largo de un ciclo de operación del reactor. Una etapa más de optimización tiene que ver con el *diseño de multiciclos* en el que se engloba la operación del reactor a lo largo de su vida.

Estas etapas no son consecutivas, sino que están relacionadas por lo que el proceso global de optimización se vuelve un proceso iterativo en el que se deben fijar ciertos parámetros y únicamente maximizar o minimizar, según sea el caso.

Capítulo 3

Métodos de Optimización de Combustible Nuclear

3.1 Métodos de búsqueda basados en reglas heurísticos

Un método heurístico puede ser descrito como un proceso que está basado en un conjunto de reglas que, sin ser rigurosos, resulta de utilidad para generar soluciones de calidad para un problema dado. Existen dos tipos de métodos heurísticos, los consecutivos y los de mejora. Los primeros se encargan de construir una solución factible, mientras que los de mejora intentan encontrar soluciones de mejor calidad a partir de una solución inicial, utilizando alguna estructura de vecindad o entorno. Los algoritmos constructivos más comunes son los algoritmos voraces o "greedy" [15].

Generalmente los algoritmos voraces son combinados con búsqueda local para encontrar una solución factible y después intentar mejorarla. Por lo general esto nos lleva a encontrar óptimos locales, y se requiere de un esfuerzo adicional para intentar "escapar" del estado de óptimo local. Esta búsqueda de mejores algoritmos de solución, combinada con el adelanto tecnológico computacional ha dado lugar a los llamados métodos meta heurísticos. Estos métodos implementan ciertas estrategias que tratan de evitar la optimización local en la búsqueda del óptimo global.

3.2 Método de Búsqueda Tabú (BT)

La Búsqueda Tabú (BT ó TS de sus siglas en inglés) es un procedimiento heurístico utilizado para resolver problemas de optimización de gran escala. Dicho procedimiento heurístico está diseñado para escapar de un óptimo local, es decir, sistemáticamente impone y relaja restricciones para permitir la exploración de regiones de otra manera prohibidas. La BT ha obtenido soluciones cercanas de la óptima en una amplia variedad de problemas clásicos.

En general la Búsqueda Tabú está basada en manejar y explotar una serie de instrucciones para resolver problemas de manera inteligente y tiene como elemento principal el uso de memoria flexible que involucra el proceso dual de crear y explotar estructuras para tomar ventaja de las acciones antes tomadas. De esta manera se combinan las actividades de adquisición y mejoramiento de la información.

La Búsqueda Tabú se basa en tres puntos principales [16]:

1. El uso de estructuras de memoria basadas en atributos diseñados para permitir criterios de evaluación e información de búsqueda histórica, la cual se explota más a fondo que las estructuras de memoria rígida (como en ramificación y acotamiento) o por sistemas de pérdida de memoria (como recocido simulado y otros métodos aleatorios).

2. Un mecanismo asociado de control, mediante el empleo de estructuras de memoria, basado en el vínculo entre las condiciones que restringen y liberan al proceso de búsqueda (de acuerdo con las restricciones tabú y el criterio de aspiración).

3. La incorporación de funciones de memoria de diferentes lapsos de tiempo, desde término corto hasta de término largo, para implantar estrategias que refuercen la combinación de movimientos y las características de solución que históricamente se han encontrado buenas, mientras que las estrategias de diversificación manejan la búsqueda dentro de nuevas regiones.

Las estructuras de memoria de la Búsqueda Tabú operan bajo cuatro dimensiones principales: pertenencia, frecuencia, calidad e influencia.

La búsqueda Tabú es una técnica para resolver problemas combinatorios de gran dificultad que está basada en principios generales de la Inteligencia Artificial [17]. En esencia es un procedimiento heurístico que puede ser utilizado para guiar cualquier procedimiento basado en la búsqueda local. Se caracteriza por intentar evitar que la búsqueda quede "atrapada" en un óptimo local que no sea global. A tal efecto, la Búsqueda Tabú toma de la Inteligencia Artificial el concepto de memoria y lo implementa mediante estructuras simples con el objetivo de dirigir la búsqueda teniendo en cuenta la historia de ésta. Es decir, el procedimiento trata de extraer información de lo sucedido y actuar en consecuencia. En este sentido, puede decirse que hay un cierto aprendizaje y que la búsqueda es inteligente [17].

La filosofía de la BT es la de manejar y explotar una colección de principios para resolver problemas de manera inteligente. Uno de los elementos fundamentales de la BT es el uso de la memoria flexible, desde el punto de vista de la BT, la memoria flexible envuelve el proceso dual de crear y explotar estructuras para tomar ventaja mediante la combinación de actividades de adquisición, evaluación y mejoramiento de la información de manera histórica.

La característica importante de la BT es precisamente la construcción de una lista tabú T de movimientos: aquellos movimientos que **no** son permitidos (movimientos tabú) en la presente iteración. La razón de ésta lista es la de excluir los movimientos que nos pueden regresar a algún punto de una iteración anterior. Ahora bien, un movimiento permanece como tabú sólo durante un cierto número de iteraciones, de forma que se tiene que T es una lista cíclica donde para cada movimiento $s \rightarrow s^*$ el movimiento opuesto $s^* \rightarrow s$ se adiciona al final de T donde el movimiento más viejo en T se elimina [16].

Las condiciones tabú tienen la meta de prevenir ciclos e inducir la exploración de nuevas regiones. La necesidad del significado de eliminar ciclos se debe a que, al moverse desde un óptimo local, una elección irrestricta de movimientos (persiguiendo aquellos con evaluaciones altas) permite igualmente regresarse al mismo óptimo local.

Hay que apuntar, sin embargo, que la eliminación de ciclos no es la última meta en el proceso de búsqueda. En algunos casos, una buena trayectoria de búsqueda resultará al retomar una solución encontrada anteriormente. El objetivo es el de continuar estimulando el descubrimiento de nuevas soluciones de alta calidad como se verá más adelante.

Ahora bien, las restricciones tabú no son inviolables bajo toda circunstancia. Cuando un movimiento tabú proporciona una solución mejor que cualquier otra previamente encontrada, su clasificación tabú puede eliminarse. La condición que permite dicha eliminación se llama **criterio de aspiración** [16].

Es así como las restricciones tabú y el criterio de aspiración de la BT, juegan un papel dual en la restricción y guía del proceso de búsqueda. Las restricciones tabú, permiten que un movimiento sea admisible si no está clasificado como tabú, mientras que si el criterio de aspiración se satisface, permite que un movimiento sea admisible aunque este clasificado como tabú.

La BT en una forma simple descubre dos de sus elementos claves: La de restringir la búsqueda mediante la clasificación de ciertos movimientos como prohibidos (es decir, tabú) y el de liberar la búsqueda mediante una función de memoria de término corto que proporciona una "estrategia de olvido". Tres aspectos merecen ser enfatizados [16]:

1. El uso de *T* proporciona la "búsqueda restringida" de elementos de la aproximación y por lo tanto las soluciones generadas dependen críticamente de la composición de *T* y de la manera como se actualiza.

2. El método no hace referencia a la condición de un óptimo local, excepto implícitamente cuando un óptimo local mejora sobre la mejor solución encontrada previamente.

3. En cada paso se elige al "mejor" movimiento.

Para problemas grandes, donde las vecindades pueden tener muchos elementos, o para problemas donde esos elementos son muy costosos para examinar, es de importancia el aislar a un subconjunto de la vecindad, y examinar este conjunto en vez de la vecindad completa. Esto puede realizarse en etapas, permitiendo al subconjunto de candidatos expandirse si los niveles de aspiración no se encuentran.

Muchos problemas de optimización combinatoria tienen como soluciones factibles las permutaciones π de un conjunto de objetos. Para explicar algunos conceptos de la BT, en lo que sigue, vamos a suponer que se está manejando como soluciones factibles permutaciones π de un conjunto de objetos y un movimiento de *s* a *s** que consiste en obtener la permutación π * a partir de la permutación π [16].

La selección preliminar de la clase de movimientos a tomarse dentro de la BT consiste en el cambio común por pares es decir, se intercambia la posición de dos objetos para transformar una permutación a otra. Suponiendo que dada una permutación el objeto π *(i)* precede, pero no necesariamente es adyacente al objeto π *(j)*. Un **movimiento de intercambio** es un re-arreglo de los objetos π *(i)* y π *(j)* de forma tal que el objeto π *(i)* se mueve a la posición *j* y el objeto π *(j)* se mueve a la posición i. El **valor del movimiento** es la diferencia entre el valor de la función

objetivo después del movimiento, $F(\pi^*)$, y el valor de la función objetivo antes del movimiento, $F(\pi)$, es decir:

$$valor_movimiento = F(\pi^*) - F(\pi)$$

El valor de movimiento por lo general proporciona una base fundamental para evaluar la calidad de un movimiento, aunque otros criterios también son importantes como se verá más adelante.

Dada la solución inicial, el método realiza movimientos hasta que un tiempo de computadora *(tiempo_límite)* específico transcurra. El movimiento que se realiza en cierta iteración se encuentra revisando el valor de todos los movimientos *candidatos* para la solución actual. Un movimiento se considera que es un candidato si los trabajos a intercambiarse están dentro de una distancia específica *(número de posiciones)*. Dado que se está minimizando, el mejor movimiento candidato es aquel que posee el menor valor algebraico. De manera más precisa, el mejor movimiento se selecciona del conjunto de movimientos admisibles.

Un movimiento es **admisible** si es no tabú o si su status tabú puede eliminarse por medio del criterio de aspiración. El mejor movimiento entonces se realiza y la estructura de datos tabú se actualiza [16].

El proceso fundamental mediante el que la BT pretende trascender el estado de óptimo local, es el de introducir un mecanismo para hacer ciertos movimientos prohibidos. En la solución del problema, la preocupación principal es la de crear un status tabú que prevenga que algún movimiento se invierta bajo la jurisdicción de la memoria de término corto, la cual se escoge para que el problema tenga un número específico de movimientos futuros. Es decir, la memoria de término corto de la BT constituye una forma de exploración agresiva que busca realizar el mejor movimiento posible, sujeto a requerir elecciones posibles para satisfacer ciertas restricciones. Esas restricciones están diseñadas para prevenir el regreso o repetir ciertos movimientos.

Otra manera de identificar atributos de un movimiento de intercambio es el de introducir información adicional, mediante no sólo hacer referencia de los elementos intercambiados, sino también de las posiciones ocupadas por esos elementos en el momento de su cambio. Se puede observar que las primeras restricciones van de menor a mayor en cuanto a que son restrictivas,

pero esto no se puede afirmar de manera uniforme. Ahora bien, no existe una forma que se pueda decir que es la mejor, esto sólo se puede realizar mediante pruebas. En ocasiones es importante asegurar que las condiciones puedan manejar los procesos de solución de manera eficaz desde la vecindad actual.

La meta principal de las restricciones tabú es el permitir al método ir a puntos más allá de la optimización local mientras se permita la realización de movimientos de alta calidad en cada paso al mismo tiempo de que exista una negociación balanceada con respecto al esfuerzo computacional al examinar muestras muy grandes, por lo que, en ocasiones es deseable incrementar el porcentaje de movimientos posibles para que reciban una clasificación tabú. Esto se puede lograr ya sea mediante el aumento en la pertenencia tabú o mediante el cambio de la restricción tabú.

Además, se requiere de una estructura de datos para guardar el seguimiento de los movimientos que son clasificados como tabú y para liberar aquellos movimientos de su condición tabú cuando su pertenencia a la memoria de término corto expire. El acompañamiento de la memoria basada en la pertenencia junto con la memoria basada en la frecuencia adiciona una componente que típicamente opera sobre un horizonte. El efecto de tal memoria se puede estipular por medio de que la BT mantenga una historia selectiva *H* de los estados encontrados durante la búsqueda, y reemplazando la vecindad actual *N(s)* por una vecindad modificada que depende de este proceso histórico *N(H,s)*.

El último elemento en el procedimiento básico es el *criterio del nivel de aspiración*, cuyo propósito es el de permitir que "buenos" movimientos tabú se seleccionen si el nivel de aspiración se alcanza. El apropiado uso de tal criterio puede ser muy importante para posibilitar que un método de BT alcance sus mejores niveles de realización. Este criterio de aspiración (que puede ser estándar) es el que permite que el status tabú se elimine si una mejor solución que la alcanzada hasta el momento se puede obtener, *i.e.*, a un movimiento tabú se le permite ejecutarse si:

$$F(\pi)+\text{valor_movimiento} < F(\pi^*)$$

Ahora bien, otros criterios de aspiración pueden también proporcionar efectividad para mejorar la búsqueda, como se verá más adelante. Una base para uno de esos criterios proviene de introducir el concepto de **influencia**, desarrollado por Glover y Laguna, el cual mide el grado de cambio inducido en la estructura de solución o de factibilidad. La influencia por lo general se asocia con la idea de distancia del movimiento, i.e., donde un movimiento de gran distancia se concibe como de mayor influencia.

El método inicia con una solución heurística factible, que se guarda como la mejor encontrada. Un paso crítico, el cual envuelve la orientación agresiva de la memoria de término corto, es la elección del mejor candidato admisible. La función *mejor movimiento* es la que identifica a un movimiento para el cual el valor del movimiento es el más pequeño. El dominio de la función es el conjunto de todos los movimientos admisibles. El *mejor movimiento* no tiene que ser necesariamente uno que mejore. Primero, cada uno de los movimientos de la lista de candidatos se evalúa en turno [12].

Ahora bien, conforme la búsqueda progresa, la forma de la evaluación empleada por la BT llega a ser más adaptativa, incorporando referencias concernientes para la **intensificación** y la **diversificación** regional de búsqueda. Cabe aclarar que en las estrategias basadas en consideraciones de término corto, la clasificación tabú sirve para identificar elementos de la vecindad del movimiento actual, mientras que en las estrategias de término intermedio y largo pueden no contener soluciones en esta vecindad, por lo general consisten en seleccionar soluciones **élites** (óptimos locales de alta calidad) encontrados en varios puntos en el proceso de solución. Dichas soluciones élites se identifican como elementos de un conglomerado regional en las estrategias de intensificación de término intermedio, y como elementos de diferentes conglomerados en las estrategias de diversificación de término largo.

La esencia del método depende de cómo el registro de la historia *H* se define y se utiliza, y de cómo los candidatos y la función de evaluación se determinan.

Revisar el status tabú es el primer paso en la escena de la admisibilidad. Si el movimiento no es tabú, es inmediatamente aceptado como admisible; de otra forma, el criterio de aspiración da una oportunidad para eliminar el status tabú, proporcionando al movimiento una segunda oportunidad para clasificarse como admisible.

En algunos casos, si las restricciones tabú y el criterio de aspiración son suficientemente limitados, ninguno de los movimientos posibles, serán clasificados como admisible. Un movimiento "menos inadmisible" se salva para manipular tal posibilidad y se elige si no emergen alternativas admisibles.

La longitud de la lista tabú es un parámetro, si es demasiado pequeño el ciclado puede ocurrir, pero si es demasiado grande, restringirá bastante la búsqueda para poder saltar "valles profundos" (*i.e.*, el mejor mínimo local) del espacio de valores de la función objetivo. Una faceta importante de la BT es la habilidad de localizar un rango robusto de longitudes de la lista tabú mediante pruebas empíricas preliminares para identificar para una clase de problemas los tipos de atributos y de restricciones tabú que se realizan de manera más efectiva. Acerca de esto, existe el uso de listas tabú múltiples, cada una desarrollada para un tipo particular de atributo.

Obviamente no se puede asegurar que después de este proceso se haya obtenido la mejor solución en términos absolutos pues no se investigan todas las soluciones factibles, simplemente se llega a la ***mejor solución*** (no necesariamente la solución óptima) del proceso de búsqueda aplicado [18].

3.3 Método de Algoritmos Genéticos

Es una de las principales técnicas de computación evolutiva [13]. La computación evolutiva es una técnica de búsqueda heurística que usa operadores probabilísticos (en vez de determinísticos) y que funciona como "caja negra", pues no requiere conocimiento específico del dominio para actuar, ni es aplicable a sólo cierto tipo de representaciones. El algoritmo genético (AG) es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto (población) de objetos matemáticos individuales, cada uno de los cuales se asocia con una aptitud, en una población nueva (siguiente generación) usando operaciones de acuerdo al principio Darwiniano de reproducción y sobre vivencia del más apto y tras haberse presentado una serie de operaciones genéticas (la recombinación sexual).

Los algoritmos genéticos son utilizados para resolver problemas de optimización de tipo combinatorio sin necesidad de conocer exactamente el proceso. Los *algoritmos genéticos clásicos* presentan el inconveniente de que utilizan una representación binaria de la solución potencial, sin embargo se pueden implementar AGs modificados en los que la solución potencial se vuelve más fácil de manejar utilizando una representación por medio de un vector de números enteros.

El proceso evolutivo se puede resumir de la siguiente manera: Se crea una primera población de soluciones potenciales (o candidatas), las cuales constituyen los individuos de la primera generación. Los individuos de la población se evalúan, la población evoluciona siguiendo operaciones genéticas y conforme avanzan las generaciones la población mejora la aptitud hasta llegar a la estabilidad. Los componentes básicos del algoritmo genético son:

- Una representación de las soluciones potenciales del problema.

- Una forma de crear una población inicial de posibles soluciones (normalmente un proceso aleatorio).

- Una función de evaluación que juegue el papel de ambiente, clasificando las soluciones en términos de su aptitud.

- Operadores genéticos que alteren la composición de los hijos que se producirán para las siguientes generaciones.

- Valores para los diferentes parámetros que utiliza el algoritmo genético.

Las principales operaciones genéticas para crear individuos con mejores calificaciones son la selección, la cruza y la mutación. En ocasiones la selección no se considera una operación genética dado que no altera la composición de las soluciones potenciales, sólo sirve para elegir a los individuos que formarán la siguiente generación, sin embargo el proceso de selección es clave para ir mejorando la aptitud promedio de la población y aumentar la probabilidad de poder

encontrar una solución cada vez mejor al ir cruzando padres cada vez más aptos. Cada una de estas operaciones puede tener variantes. Las operaciones genéticas deben combinarse de tal forma que la optimización se realice de manera eficiente. Entendiéndose por eficiencia de la optimización tanto la velocidad para mejorar la calificación de los resultados, como la rapidez para encontrar la convergencia de los mismos. Esto sin perder la capacidad de explorar ampliamente el espacio de búsqueda.

Al final del proceso de optimización se tendrá el mejor de los diseños investigados, sin estar seguros de que éste sea el mejor en términos absolutos, pues sólo se habrá investigado en forma parcial el espacio de búsqueda global.

Capítulo 4

Metodología del Diseño Axial de Ensambles de Combustible

4.1 Desarrollo del Sistema de Optimización

Debido a que el cálculo de los valores de la energía y una serie de parámetros que se utilizan en la evaluación de un ensamble de combustible, en donde deben realizarse cálculos con y sin barra de control insertada a diferentes pasos de irradiación, para evaluar la evolución de la reactividad y el pico de potencia, así como otras evaluaciones que indican el desempeño de un determinado diseño son de gran complejidad y requieren ser lo más parecidos a la realidad, es necesario auxiliarse de simuladores muy sofisticados que puedan modelar el comportamiento neutrónico - termohidráulico del reactor de la central nucleoeléctrica, como en Laguna Verde, para validar dicho diseño.

Dentro de la gran variedad de simuladores para reactores del tipo BWR se encuentra el CM-PRESTO [20] el cual ha sido validado para la simulación del comportamiento estático del reactor BWR de la Central de Laguna Verde. El simulador CM-PRESTO consiste en un modelo neutrónico termohidráulico en tres dimensiones del núcleo del reactor con el que se evalúan las aptitudes de los diseños axiales durante el proceso de búsqueda del más óptimo. El proceso de optimización se codificó en lenguaje C, en un programa en el que se automatizó completamente la creación de las entradas al simulador, la ejecución del simulador y la extracción, en la salida del simulador, de los parámetros que intervienen en la función objetivo de la técnica de búsqueda tabú.

Para este trabajo de tesis se utilizó la aplicación de la técnica TS (Búsqueda Tabú por sus siglas en inglés) a la optimización de la distribución axial de enriquecimiento en un ensamble combustible para reactores BWR. En su desarrollo, el proceso de optimización TS se ligó al simulador CM-PRESTO.

Se busca la distribución axial óptima de celdas de combustible, con diferentes enriquecimientos y contenidos de gadolinia, en el ensamble. Para ello es necesario definir la representación de la solución, la función objetivo y la implementación del proceso de optimización TS específico a la solución del problema.

El simulador CM-PRESTO requiere de información de todas las características de los diversos componentes del núcleo y de las condiciones neutrónicas y termohidráulicas de operación. Requiere además de un banco de datos nucleares para todas las celdas de combustible que se incluyan en el núcleo.

La descripción axial del ensamble en CM-PRESTO es un vector de números enteros $\mathbf{<n_1,n_2,....n_{25}>}$ donde $\mathbf{n_i}$ es el identificador de la celda combustible colocada en la posición **i**. Los $\mathbf{n_i}$ deben estar incluidos en el banco de datos nucleares de CM-PRESTO.

Generalmente se tienen de 4 a 8 tipos de celda con diferente enriquecimiento y/o contenido de gadolinia. Cada diseño tendrá su enriquecimiento promedio y sus parámetros de evaluación dependientes no sólo del enriquecimiento promedio sino también de la distribución axial de celdas. La función objetivo o función de costo calificará bien a los diseños con menor enriquecimiento que satisfagan los parámetros de evaluación como se observa en la tabla 4.1:

Energía(x)	=	*Energíatarget*		
PPF(x)	<	*PPFmax*		
MLHGR(x)	<	*MLHGRmax*		
XMPGR(x)	<	*XMPGRmax*		
MRNP(x)	<	*MRNPmax*		
MCPR(x)	>	*MCPRmin*		
HEXmin(x)	>	*HEX(x)*	<	*HEXmax*
SDM(x)	>	*SDMmin*		

Tabla 4.1 Parámetros de evaluación

Donde:

Energía(x)	Valor de la energía del ciclo obtenida con CM-PRESTO
Energíatarget	Valor de la energía deseada
PPF(x)	Power Peaking Factor (radial)
PPFmax	Límite máximo del PPF
MLHGR(x)	Maximum Linear Heat Generation Rate
MLHGRmax	Límite máximo del MLHGR
XMPGR(x)	Fraction of the Limiting Average Planar Heat Generation Rate (APLHGR)
XMPGRmax	Límite máximo del XMPGR
MRNP(x)	Maximum Relative Nodal Power

MRNPmax Límite máximo del MRNP
MCPR(X) Minimal Critical Power Ratio
MCPRmin Límite mínimo del MCPR
HEX(x) Hot Excess reactivity
HEXmin(x) Límite inferior del HEX
HEXmax(x) Límite superior del HEX
SDM(x) Shutdown Margin
SDMmin Límite mínimo del SDM

Los valores límite para estos parámetros dependen del tipo de cálculo que se utilice para simular el ciclo de operación del reactor. Para reducir tiempo de cálculo y evitar tener que determinar el patrón de barras de control para la operación del ciclo, se realizan simulaciones utilizando la técnica de Haling y los límites impuestos para los diferentes parámetros de potencia que se indican en la Tabla 4.2. Los límites de SDM y de exceso de reactividad en caliente (Tabla 4.2) tienen valores conservadores para aplicarse en cálculos al inicio del ciclo (BOC).

Parámetro	Valor Límite
PPFmax	1.5
MLHGRmax	374 [W/cm]
XMPGRmax	0.85
MRNPmax	1.83
MCPRmin	1.5
HEXmin	1.5 $[\%\Delta K / K]$
HEXmax	2.0 $[\%\Delta K / K]$
SDMmin	1.5 $[\%\Delta K / K]$

Tabla 4.2 Valores límites de operación

La función objetivo o función de costo asociada al método de optimización de búsqueda tabú utilizada en el sistema de optimización axial es la siguiente:

$$f(x) = \Delta Enriq(x)\cdot w_1 - \left|\Delta Energ(x)\right|\cdot w_2 + \Delta MLHGR_k(x)\cdot w_3 + \Delta XMPGR_k(x)\cdot w_4 + \Delta MRNP_k(x)\cdot w_5$$
$$+ \Delta PPF(x)\cdot w_6 + \Delta MCPR_k(x)\cdot w_7 + HEX(x)\cdot w_8 + \Delta SDM(x)\cdot w_9 + \Delta Gad(x)\cdot w_{10}$$

Lo que se busca es obtener el valor máximo de la función. En la Tabla 4.3 se describen los parámetros a evaluar en la función de costo.

$\Delta Enriq(x)$	=	$Enriq\ max - Enriq(x)$	
$\Delta Energ(x)$	=	$Energ(x) - Energtrg$	
$\Delta MLHGR(x)$	=	$MLHGRmax - MLHGRk(x)$	$k=1,...,25$
$\Delta XMPGR(x)$	=	$XMPGRmax - XMPGRk(x)$	$k=1,...,25$
$\Delta MRNP(x)$	=	$MRNPmax - MRNPk(x)$	$k=1,...,25$
$\Delta PPF(x)$	=	$PPFmax - PPF(x)$	
$\Delta MCPR(x)$	=	$MCPRk(x) - MCPRmin$	$k=1,...,25$
$HEX(x)$	=	$KEFF(x) - KEFFcrit$	
$\Delta SDM(x)$	=	$SDM(x) - SDMmin$	
$\Delta Gad(x)$	=	$Gad\ max - Gad\ (x)$	

Tabla 4.3 Parámetros diferenciales de la función objetivo

Donde:

*Enriq(**x**), w1*	Valor del enriquecimiento promedio del combustible obtenido por el sistema y su factor de peso. Valor a minimizar.
Enriq max	Máximo valor del enriquecimiento posible.
*Energ(**x**), w2*	Valor de la energía del ciclo obtenida con CM-PRESTO y su factor de peso.
Energtrg	Valor de la energía deseada.
MLHGR, w3	Maximum Linear Heat Generation Rate y su factor de peso.
XMPGR, w4	Fraction of the Limiting Average Planar Heat Generation Rate (APLHGR) y su factor de peso.
MRNP, w5	Maximum Relative Nodal Power y su factor de peso.
PPF, w6	Power Peaking Factor (radial) y su factor de peso.
MCPR, w7	Minimal Critical Power Ratio y su factor de peso.
HEX, w8	Hot Excess reactivity at BOC y su factor de peso.
SDM, w9	Shutdown Margin at BOC y su factor de peso.
Gad ,w10	Valor del enriquecimiento promedio de gadolinia obtenido por el sistema y su factor de peso. Valor a minimizar.
x	Vector de enriquecimientos (x1 , x2 , ... ,xK,... , x25)
k	Nodos axiales en el simulador CM-PRESTO (25)

Maximizar la función de costo de la solución ***x*** implica minimizar el enriquecimiento (*Enriq(x)* y *Gad(x)*) satisfaciendo todas las restricciones, es por eso que se le agrega un peso proporcional a cada una de las variables involucradas en la función, esto servirá para compensar y equilibrar los distintos valores de cada una y poderlas interpretar como equivalentes en la solución final; por lo tanto el factor peso w1 en la función de costo tiene un valor positivo y los factores de peso w2 a w9 son cero cuando el respectivo límite es satisfecho, así como cuando no lo son, éstos toman un valor positivo. Esto penaliza exclusivamente cuando las restricciones son violadas.

4.2 Aplicación del Método Tabú

La aplicación del método de Búsqueda Tabú para encontrar una solución candidata se desarrolla a partir de arreglos o formaciones compuestas por celdas de diferentes tipos, localizadas en cada posición de acuerdo a un vector de 25 elementos <n1, n2,...,n25> [22].

Se busca localizar *j* diferentes tipos de celda combustible en 22 posiciones (figura 4.2.1) donde las celdas tienen sus propias características. Su acomodo en los extremos se fijan con celdas de uranio natural (dos celdas superiores y una inferior) por lo que tres celdas se descartan de entrada para buscar la mejor solución quedando un total de j^{22} combinaciones posibles y en las que utilizando la técnica de búsqueda tabú se investigan de 2000 a 3000 combinaciones de soluciones.

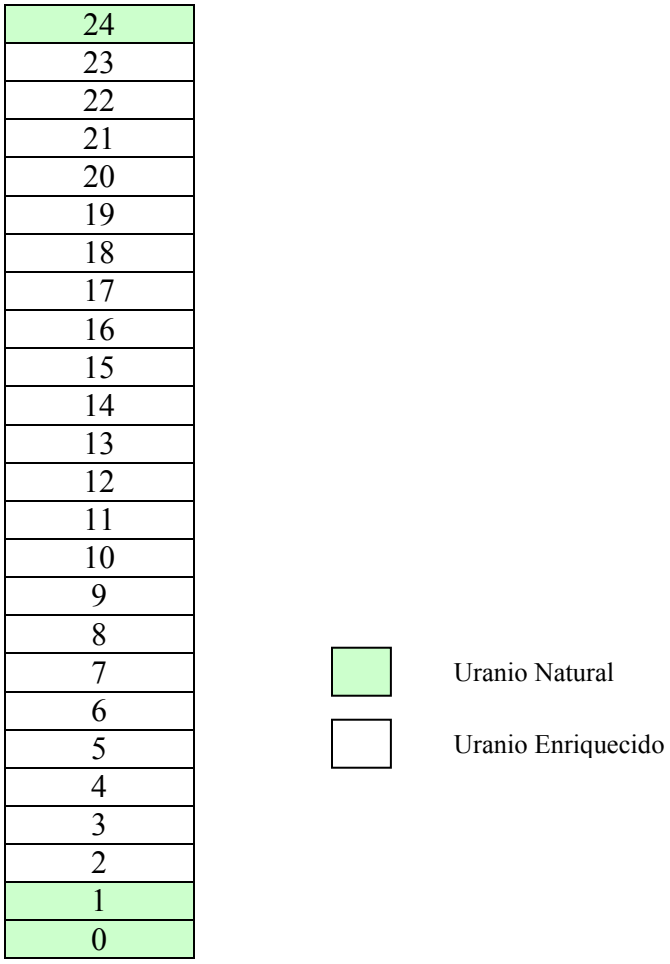


Figura 4.2.1 Posiciones Axiales en el combustible

Estas j celdas de uranio enriquecido contienen diferentes porcentajes de uranio (U^{235}) así como porcentajes de Gadolinia, a su vez cada una de las celdas es asociada con un identificador para de esta manera conocer cuál fue el mejor acomodo de celdas con sus características en la obtención de energía propuesta al iniciar las simulaciones.
Una solución candidata puede ser representada gráficamente por dos líneas y veintidós columnas. Los índices de las posiciones son colocados en la primera línea, los tipos de celdas en la segunda línea y las columnas representan las posiciones.

El proceso inicia con la creación de forma aleatoria de una primera solución candidata con lo que en un inicio tenemos datos comparables para todo un proceso en particular (1ª iteración, 1ª solución actual, 1ª solución mejor) [18].
Se definieron dos tipos de movimiento (1 y 2), de esta manera el movimiento tipo 1 permite variar el enriquecimiento promedio y la gadolinia, mientras que el tipo 2 sólo modifica el acomodo de las celdas del combustible. La aplicación de los movimientos se elige en forma aleatoria. El proceso de movimientos en una iteración se detiene cuando se supera la calificación de la solución actual o de la mejor solución.

Un movimiento Tipo 1 es completamente definido por la selección de una posición en forma aleatoria de las 22 posibles, a la cual se le llamó pos1, y de la selección aleatoria de una celda combustible dentro de una lista de celdas combustible disponibles nombrada como celda2 para este ejemplo.

Así el movimiento Tipo 1 colocará la celda2 en la posición pos1. Obviamente que celda1 (tipo de celda en la pos1 antes del movimiento) y celda2 deben ser diferentes tipos de celda para construir un movimiento válido.

Para cada solución x, existen 22x3 soluciones candidatas viables a partir de la solución x por un solo movimiento Tipo1 [19].

Un movimiento Tipo 2 es un intercambio entre dos posiciones por sus respectivas celdas combustibles, es decir, se intercambia la ubicación de dos diferentes celdas en el ensamble

combustible. Estos intercambios son definidos de forma aleatoria entre dos diferentes posiciones, pos1 y pos2, teniendo celdas combustible celda1 y celda2 respectivamente y de diferente tipo. Para cada solución x, el número de todas las soluciones viables a partir de esa solución x por un solo movimiento del Tipo 2 es igual a [(21x21)-I]; donde I es el número de intercambios obtenidos de los mismos tipos de celdas en las posiciones pos1 y pos2 [19].

- *Solución Actual*

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
C_2	C_3	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_2	C_0	C_3	C_0	C_1	C_3	C_1	C_2	C_0	C_0	C_1	C_3	C_3	C_1	C_1

- *Movimiento Tipo 1*

Posición Seleccionada →

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Ejemplo de selección aleatoria: pos1=11, celda1=C1

Celda Combustible →

C_0
C_1
C_2
C_3

Solución Vecina después del movimiento Tipo 1:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
C_2	C_3	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_2	C_0	C_3	C_1	C_1	C_3	C_1	C_2	C_0	C_0	C_1	C_3	C_3	C_1	C_1

- *Movimiento Tipo 2*

Posición 1 → ← Posición 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

Ejemplo de selección aleatoria: pos1=7, pos2=12

Solución Vecina después del movimiento Tipo 2:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
C_2	C_3	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3	C_2	C_0	C_3	C_0	C_1	C_3	C_1	C_2	C_0	C_0	C_1	C_3	C_3	C_1	C_1

La lista tabú de recientes contiene en cada línea cuatro valores: posición 1, celda 1, posición 2, celda 2. Para movimientos tipo 1, la posición 2 es nula.

La lista tabú de frecuencia es un arreglo de 22 valores conteniendo la frecuencia de posiciones movidas: *mov[1],mov[2],...,mov[22]*. El criterio de aspiración cancela el estado de tabú cuando se encuentra una solución que supera la calificación de la mejor hasta ese momento.

El conjunto N(x) de todos los vecinos es considerablemente grande, a cada paso del proceso de iteración, únicamente un subconjunto V* de N(x) es generado y el movimiento es hecho desde la solución x hasta la mejor solución x* en V*, siempre que f(x*) sea mejor que f(x). El número de movimientos puede ser fijo o variable. En la aplicación el número máximo de iteraciones puede ser fijo, sin embargo el proceso se detendrá cuando una solución x* sea mejor que la solución x.

Capítulo 5

Aplicaciones de la Metodología

5.1 Modificación del Sistema para la Optimización Axial de Combustible

Para el análisis de un reactor con un simulador, se requiere representar todos sus componentes y propiedades mediante datos, para lo cual se utilizó el simulador Core-Master PRESTO (CM-PRESTO) [20], en donde la representación axial del combustible se realiza mediante un conjunto ordenado de *identificadores* de las características nucleares correspondientes a cada nodo axial del combustible. En el sistema, el diseño axial de combustible es un conjunto ordenado de veinticinco números enteros que identifican la composición de combustible que se asocia a cada nodo y que se encuentra definida en la base de datos nucleares que utiliza CM-PRESTO. La base de datos nucleares ha sido previamente creada utilizando el código HELIOS [21].

En esta tesis se realizaron modificaciones en el sistema de optimización axial para tomar en cuenta las características particulares del diseño mecánico del combustible tipo GE12 utilizados actualmente en la CNLV, en particular para considerar las barras de combustible de longitud parcial. Las modificaciones para la optimización consistieron de varios aspectos entre los que se encuentran:

1. La inclusión de la Gadolinia a los combustibles nucleares (*ver apéndice A.1*) como parte del enriquecimiento en las celdas combustibles. Anteriormente únicamente se consideraban los enriquecimientos del uranio, con la inclusión de la Gadolinia se esperan obtener resultados más adecuados a la realidad para los ciclos combustibles, aprovechando aún más los combustibles con la intención de bajar los costos de combustible.

2. Fijar los nodos superiores en los cuales se encuentran las celdas que contienen algunas barras de combustible vacías y las celdas que contienen algunos huecos en donde ya no hay barras de combustible. Las zonas en donde se encuentran este tipo de celdas son fijas puesto que dependen del diseño mecánico del combustible tipo GE12 (*ver Apéndice A.2*).

3. Variar el acomodo de las celdas combustibles en los nodos axiales de la parte inferior del ensamble (*Apéndice A.2*), en donde las celdas tienen sus barras de combustible completas. Se definieron regiones de tamaños fijos con la finalidad de ubicar, aleatoriamente, celdas iguales en esas regiones para obtener diseños que manejen agrupaciones de celdas y no que en cada nodo axial haya un tipo diferente de celda de combustible. Esto permite tener diseños de combustible más realistas desde el punto de vista de la fabricación.

Como aportación adicional a este trabajo de tesis, estuvo la parte de la programación en el lenguaje C, realizándose algunos cambios en la estructura del programa. Estos cambios consistieron en crear un solo archivo de texto para la lectura de datos de entrada, y en el mismo archivo, asignar los nombres para los archivos de salida, es decir, los archivos de texto donde se escriben los resultados de la optimización. Anteriormente, era necesario modificar directamente en el programa principal tanto los datos de entrada utilizados en el Método de Búsqueda Tabú como para asignar los nombres de los archivos de salida. Gracias a estas modificaciones, se evitan errores en el momento de modificar los datos de lectura así como en el momento de cambiar los nombres de los archivos de salida, se ahorra tiempo y facilita su manipulación.

Como primer cambio, se creó un archivo de extensión *".txt"* (*ver Apéndice C*) de uso general de lectura de datos, para que de esta manera, el programa "main" pueda leer externamente los parámetros a considerar para la aplicación del Método Tabú entre los que destacan: el tamaño de la lista tabú, las iteraciones, la cantidad de movimientos permitidos, los límites de operación entre otros. Gracias a esta modificación se evita modificar estos valores directamente sobre el programa principal, ergo se pueden realizar más evaluaciones, se evita la molestia de estar alterando el programa principal, es más cómodo y fácil realizar las corridas del programa.

Debido a que el programa previo a esta versión de Búsqueda Tabú contenía declarados a los parámetros del Método Tabú y otros criterios de seguridad relacionados con el reactor nuclear como tipo <*define*> (*Apéndice B*), resultaba complicado reescribir otro programa

donde no se declararan estos valores con un <*define*>, para resolver esto se aprovechó la estructura original del programa realizando algunas modificaciones que consistieron en cambiar de nombre los define para poder reservar un espacio en la memoria a utilizar además de apoyarse en el archivo con extensión *".txt"* (previamente creado para la lectura de datos), desde el cual se leyeran de manera externa los valores necesarios para la aplicación de la optimización y ser utilizados en el programa *"main"*.

Una vez que se logró leer y comprobar que el programa funcionara fue necesario adecuar el archivo de lectura de extensión *".txt"* para poder reconocer cada uno de los valores con su etiqueta correspondiente pero sin tener que crear otro programa auxiliar, todo esto fue necesario ya que en un principio únicamente se tenía una línea con números separados por dos espacios sin manera de identificar a que tipo de datos correspondían.

La solución estructural en el programa *"main"*, para leer un archivo de texto incluyendo sus etiquetas de identificación y sin que éstas alteraran el funcionamiento del método de optimización, fue crear una serie de instrucciones capaces de leer cadenas de caracteres consecutivos o línea por línea para ser identificados a partir de otra instrucción capaz de escribir esos caracteres e interpretarlos como enteros, cadenas o flotantes; parámetros necesarios para la simulación referente a las condiciones de seguridad y operación del reactor nuclear *(ver Apéndice B*). A consecuencia de esto, se tuvo que considerar que las etiquetas de cada parámetro son cadenas de caracteres, evitando que el programa metiera basura en los resultados, la solución a este problema se resolvió mediante un comando que detuviera la lectura de cadenas cuando en su paso encontrara un carácter de espacio blanco, quedando sólo la parte necesaria de los datos.

5.2 Resultados de la Actualización del Sistema de Optimización Axial

Las modificaciones al sistema de optimización se probaron con un caso real de prueba correspondiente al diseño de uno de los combustibles de la recarga del ciclo 10 de la Unidad 1 de Laguna Verde. Cabe mencionar que en este ciclo hubo dos tipos diferentes (aunque muy parecidos) de combustible nuevo; en este caso únicamente se diseñó uno solo y se aplicó en toda la recarga del ciclo 10.
El sistema en general mostró buenos resultados. Estos resultados coincidieron con los diseños propuestos por el proveedor para la recarga del ciclo 10; con lo que se comprueba la validez del sistema y se justifica su modificación.

Se probaron distintos diseños axiales con resultados muy semejantes entre sí. Estas variantes consistieron básicamente en las longitudes de los acomodos axiales así como el tamaño de la lista tabú, el número de movimientos y de iteraciones entre otras modificaciones en el criterio de la BT.

En la Tabla 5.2, se observan los resultados obtenidos de la optimización axial. Se evaluaron tres diferentes casos (ver Figura 5.2.1) en los que se variaron las longitudes de los acomodos axiales, sin embargo en todos los casos se llegó al mismo diseño axial.

En la misma tabla, también se muestran los valores obtenidos en la simulación para los límites de operación del reactor, destacando que siempre se encuentran dentro de los límites de operación.

Parámetro	Límites de Operación	Casos 1, 2 y 3	Caso Proveedor*
Enriq. Uranio %	--------	3.471	3.471
Conc. Gadolinia %	--------	0.5643	0.5643 / 0.6200
Energía [MWd/t]	--------	10727.45	10688.0
MLHGR [W/cm]	374 max	272.1	272.1
XMPGR	0.85 max	0.7647	0.759
PPF	1.5 max	1.4588	1.4604
HEX $[\%\Delta K/K]$	1.5 - 2.0	1.565	1.373
SDM $[\%\Delta K/K]$	1.5 min	2.1798	2.2464
XMCPR	1.5 min	1.74	1.74
MAXBUR [MWd/t]	--------	42570	42570
Calificación	--------	907835.573	

Tabla 5.2. Resultados de la Optimización

**El proveedor utiliza dos ensambles con el mismo enriquecimiento pero con diferente gadolinia.*

En la Figura 5.2.1, se muestran los tres diferentes casos en los que se variaron las longitudes de los acomodos axiales. Las partes en blanco representan las celdas que se mantuvieron fijas, ya que dependen del diseño mecánico del combustible tipo GE12; en estas zonas se encuentran las celdas 1G01N, 1G41 y 1G42 que contienen uranio natural. También está la celda 1G39, la cual es de uranio enriquecido y tiene algunas barras huecas, sin combustible y la celda 1G40 que es también de uranio enriquecido y en la cual algunas de las barras (las mismas que están huecas en la celda 1G39), llamadas parciales, ya no están presentes, puesto que ya no llegan a esa altura del ensamble. Por otro lado, las zonas coloreadas representan las distintas longitudes de los acomodos axiales en que las celdas con uranio enriquecido (1G37 y 1G38) estuvieron en constante movimiento dentro del sistema de optimización axial.

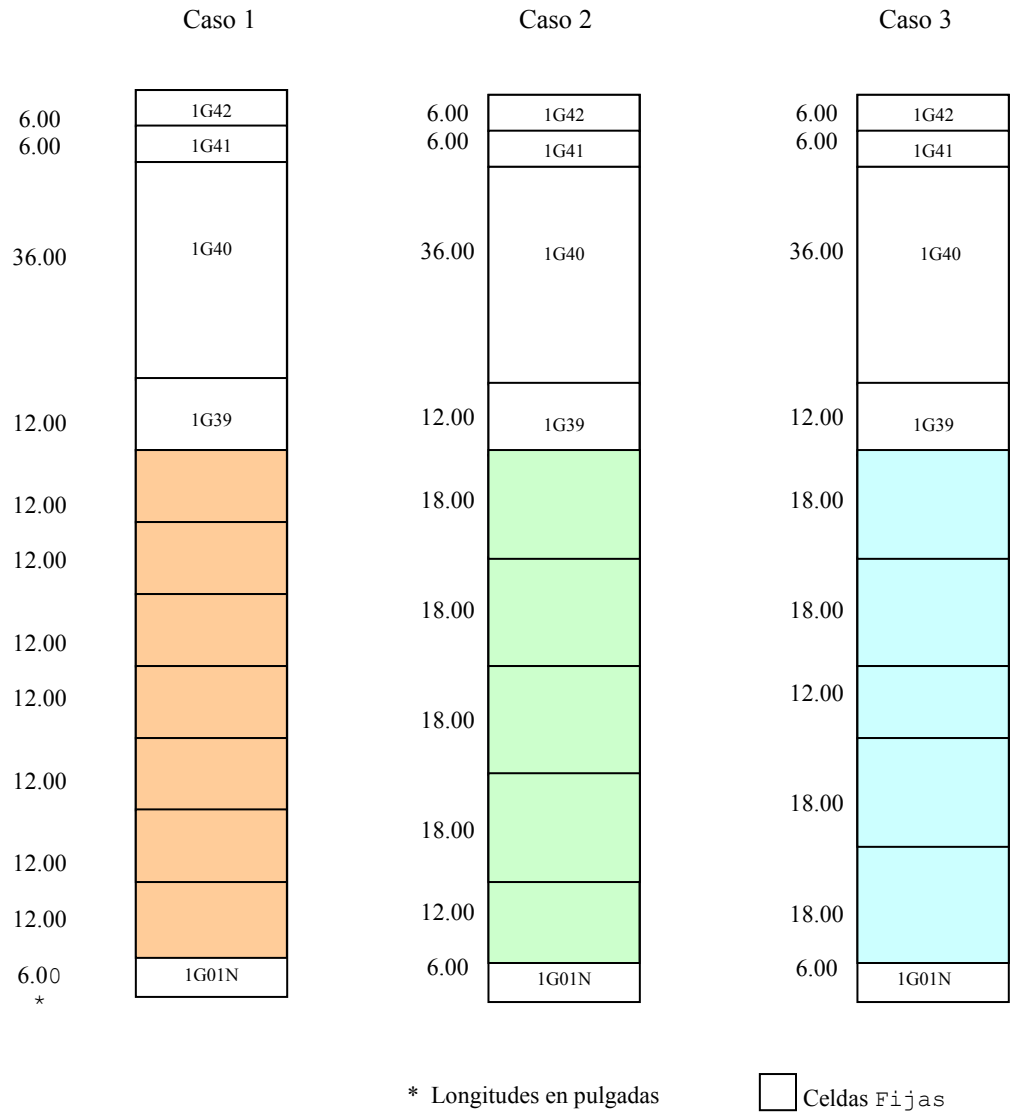


Figura 5.2.1. Diferentes propuestas en las longitudes de los acomodos axiales.

En la Figura 5.2.2, se muestra el diseño final obtenido por el sistema de optimización axial señalando las zonas en las que fueron acomodadas, en los nodos no fijos, las celdas con combustible nuclear. Cabe mencionar que este diseño es igual a uno de los diseños del proveedor del combustible del ciclo 10 de la unidad 1 de la CNLV.

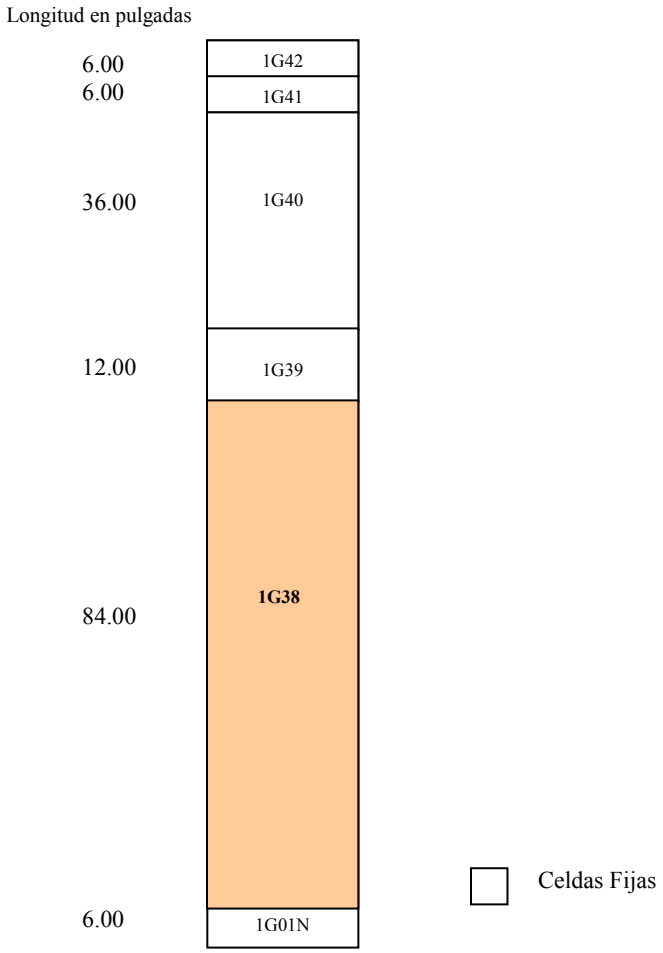


Figura 5.2.2. Diseño axial final optimizado.

5.3 Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en esta tesis para cada una de las simulaciones realizadas fueron exactamente iguales, en donde el acomodo de las celdas combustible del diseño axial coincide con uno de los diseños del proveedor del combustible del ciclo 10 de la Unidad 1 de la CNLV. En este diseño se observa una región de 84 pulgadas con un mismo tipo de celda combustible (1G38), es decir 14 celdas con esa composición; por encima de esta zona se encuentra una región de 12 pulgadas conteniendo 2 celdas combustible (1G39). Tanto la celda 1G38 como la 1G39 se mantuvieron en constante movimiento o acomodos en la simulación debido a las condiciones necesarias para la recarga del ciclo 10, específicamente a sus características en los diseños mecánicos y las barras de combustible de longitud parcial, esta limitación en el manejo de diferentes celdas hizo que no se encontraran mejores distintas soluciones al problema del diseño axial, sin embargo la información obtenida en las simulaciones sirve para comparar los parámetros físicos de operación del reactor con los parámetros del sistema computacional.

El hecho de que los resultados del sistema para la construcción del diseño axial coincidan con el del proveedor demuestra que la optimización en el aprovechamiento del quemado de combustible es la correcta, además de que este diseño garantiza los parámetros de seguridad establecidos para el buen funcionamiento de la central nucleoeléctrica sin sobrepasar los límites de operación. En general esta información sirve como pauta para seguir utilizando este método en la fabricación de nuevos diseños axiales que puedan producir aún más beneficios.

Conclusiones

Se puede concluir que la optimización a partir del sistema axial basado en el método de Búsqueda Tabú es válida y eficiente, hecho avalado por el diseño axial de combustible nuclear propuesto por el proveedor.

Con la información recopilada a lo largo de este trabajo puede observarse que un factor determinante en los resultados obtenidos por la simulación del sistema de diseño y optimización axial de combustible nuclear tiene que ver con el banco de diferentes celdas de combustible nuclear (número de celdas disponibles en el sistema) con las que pueden realizarse intercambios de posición y/o en los acomodos de las celdas a lo largo de un diseño axial. Este factor limitó en forma considerable el número de combinaciones permitidas y dejó abierta la necesidad de adecuar la programación computacional del sistema para evitar que el sistema se quede buscando innecesariamente soluciones cuando un diseño axial sea casi homogéneo, como fue el caso de esta tesis. Así mismo, la inclusión de más variedad de celdas combustible permitirá observar mejores resultados donde se refleje aún más la optimización en la utilización del combustible.

En cuanto a las ventajas en la actualización del sistema destaca la incorporación de la Gadolinia, ahora es posible obtener simulaciones más cercanas a la realidad, además de favorecer la optimización del combustible física y económicamente, lo cual se conoce como un mejoramiento en la Administración de Combustible.

Aún cuando el sistema sigue bajo actualizaciones constantes, su manipulación se ha facilitado notablemente favoreciendo la minimización de los tiempos empleados en la planeación de los diseños axiales, los tiempos de operación del sistema de optimización y la similitud de sus resultados con las recargas de combustible utilizados en la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, hecho de gran importancia para proyectos a futuro pensando en nuevas recargas de combustible nuclear.

Aunque los resultados de esta tesis en su totalidad no hayan sido los esperados, su verdadera aportación está fuertemente vinculada con investigaciones futuras comprendidas por sus propios matices, entendiéndose por éstos los sólidos conocimientos en su validez de aplicación, hecho fundamental en la toma de decisiones y con beneficios de optimización en recursos materiales y humanos. Ahora el sistema puede utilizarse no sólo con fines de docencia sino como una herramienta de optimización a niveles de planeación para las recargas de combustible nuclear independiente de las recomendaciones de los proveedores.

APÉNDICE A

En esta sección se muestran los cambios efectuados al código referente a la actualización del Sistema Axial para el Diseño y Optimización de Combustible Tipo GE12 basado en la Búsqueda Tabú.

Estos cambios tuvieron que ver con la inclusión de la Gadolinia y con los tamaños de los nodos axiales, a continuación se presentan las modificaciones más importantes a las que se sometió el código:

A.1 *Introducción de la Gadolinia al programa*

Se observa que las zonas coloreadas hacen referencia a los cambios realizados para el manejo de la Gadolinia, esta inclusión es semejante en su estructura a la del manejo del enriquecimiento promedio del uranio.

```
if (OPTION_RESTART==0)
{ /* Create the first design OPTION_RESTART=0 */
        do{
       first_gen(NC, NCN, ELEMENTS, j);  /* CREATE THE FIRST DESIGN */
       suma_e=0.0;
             suma_gad=0.0;
             enriq=0.0;
             enriq_gad=0.0;
       for (i=0; i<ELEMENTS; i++)
              {
       enriq = ( *ens_dis[j].enr_nodo[i]) * ni[i];
             enriq_gad = ( *ens_dis[j].gad_nodo[i]) * ni[i];
       suma_e=suma_e+enriq;
             suma_gad=suma_gad+enriq_gad;

             }
       promedio_e=suma_e/25;
             promedio_gad=suma_gad/25;
             } while ((promedio_e<=LIM_INF) || (promedio_e>=LIM_SUP));
        ens_dis[j].e_prom = promedio_e;
              ens_dis[j].g_prom = promedio_gad;

}/* End Create the first design OPTION_RESTART=0 */
```

```
//-----------------------promedio-----
      suma_e=0.0;
            suma_gad=0.0;
      enriq=0.0;
            enriq_gad=0.0;
      for (i=0; i<ELEMENTS; i++)
             {
      enriq = ( *ens_dis[j].enr_nodo[i]) * ni[i];
            enriq_gad = ( *ens_dis[j].gad_nodo[i]) * ni[i];
      suma_e=suma_e+enriq;
            suma_gad=suma_gad+enriq_gad;
             }
      promedio_e=suma_e/25;
            promedio_gad=suma_gad/25;

      }while ((promedio_e<=LIM_INF) || (promedio_e>=LIM_SUP));

      ens_dis[j].e_prom = promedio_e;
      ens_dis[j].g_prom = promedio_gad;
```

A.2 *Variación en los tamaños de los nodos axiales*

Con la finalidad de mantener fijas ciertas zonas axiales, fue necesario modificar la estructura y utilización de los nodos axiales, incluyendo el número de elementos a considerar dentro del método de búsqueda tabú.

```
ni[0]=1;
ni[1]=2;
ni[2]=3;
ni[3]=3;
ni[4]=3;
ni[5]=3;
ni[6]=2;
ni[7]=6;
ni[8]=1;
ni[9]=1;
```

Nodos axiales: se deben mantener fijos ni[0], ni[6], ni[7], ni[8] y ni[9], además de respetar que el número total de elementos no sea superior a 25

```
for (i=0; i<ELEMENTS; i++)
{
 ens_dis[j].no_cel_nodo[i] = ens_dis[mj].no_cel_nodo[i];
 ens_dis[j].enr_nodo[i] = ens_dis[mj].enr_nodo[i];
    ens_dis[j].gad_nodo[i] = ens_dis[mj].gad_nodo[i];
}
```

```
    imove = rand()%2;

  if(imove==0)
   { /* move type 1 ---------------------------------------- */
   do{
   pos1= 1 + (rand()%(ELEMENTS-5));
   pos2= 0;
   cel1=ens_dis[j].no_cel_nodo[pos1];

   n=0;
   do{
   celi=rand()%NUM_CELDAS-2;
   n += 1;
   cel2 =&no_celda[celi];
   }while (*cel1 == *cel2);
   t2_enr=&enr[celi];
   t2_gad=&gad[celi];
   pos1,*cel1,pos2,*cel2);

   ens_dis[j].cel1=*cel1;
   ens_dis[j].cel2=*cel2;
   ens_dis[j].pos1=pos1;
   ens_dis[j].pos2=pos2;


// ----- MOVIMIENTO --------------
   ens_dis[j].no_cel_nodo[pos1]=cel2;
   ens_dis[j].enr_nodo[pos1]=t2_enr;
   ens_dis[j].gad_nodo[pos1]=t2_gad;


   else if (imove==1)
     { /* move type 2  swap  --------------------------- */

   ens_dis[j].e_prom = ens_dis[mj].e_prom;
   ens_dis[j].g_prom = ens_dis[mj].g_prom;

     pos1=1 + (rand()%(ELEMENTS-5));
     cel1=ens_dis[j].no_cel_nodo[pos1];
   t1_enr=ens_dis[j].enr_nodo[pos1];
     t1_gad=ens_dis[j].gad_nodo[pos1];

     n=0;
     do {
     pos2=1 + (rand()%(ELEMENTS-5));
     cel2=ens_dis[j].no_cel_nodo[pos2];
   t2_enr=ens_dis[j].enr_nodo[pos2];
     t2_gad=ens_dis[j].gad_nodo[pos2];
   n += 1;
     }while ((pos2 == pos1) || (*cel1==*cel2));
   ens_dis[j].cel1=*cel1;
```

```
        ens_dis[j].cel2=*cel2;
        ens_dis[j].pos1=pos1;
        ens_dis[j].pos2=pos2;
// ----- MOVIMIENTO --------------
    ens_dis[j].no_cel_nodo[pos1]=cel2;
    ens_dis[j].enr_nodo[pos1]=t2_enr;
       ens_dis[j].gad_nodo[pos1]=t2_gad;
    ens_dis[j].no_cel_nodo[pos2]=cel1;
    ens_dis[j].enr_nodo[pos2]=t1_enr;
       ens_dis[j].gad_nodo[pos2]=t2_gad;
// ------------------------------

} /* move type 2  swap  ---------------------------- */
```

APÉNDICE B

En este apéndice se muestran los cambios realizados en el código del sistema de optimación axial. Se hace una comparación entre el programa anterior (sis_tabu84M_2d.c) y la versión modificada (TabuZ_10_01.c) a manera de observar las mejoras obtenidas.

- *Cambios realizados en la estructura tipo < # define >*

sis_tabu84M_2d.c	TabuZ_10_01.c
# define ELEMENTS 25	# define MAX_ELEMENTS 100
# define ITERATIONS 5	# define MAX_ITERATIONS 100
# define MOVES 30	# define MAX_MOVES 100
# define MAX_EVAL 1000	# define MAX_EVALU 10000
# define LISTA 10	# define MAX_LISTA 100
# define NUM_CELDAS 4	# define MAX_NUM_CELDAS 100
# define NUM_CELDAS_NAT 2	# define MAX_NUM_CELDAS_NAT 100
# define LIM_INF 3.43	# define MAX_LIM_INF 20.00
# define LIM_SUP 3.57	# define MAX_LIM_SUP 20.00
# define NSTEPS_SDM 11	# define MAX_NSTEPS_SDM 20
# define NSTEPS_EXCESS 6	# define MAX_NSTEPS_EXCESS 20
# define SDM_CYCLE_OPTION 0	# define MAX_SDM_CYCLE_OPTION 20
# define EXCESS_CYCLE_OPTION 0	# define MAX_EXCESS_CYCLE_OPTION 20
# define OPTION_RESTART 0	# define MAX_OPTION_RESTART 20

El propósito de renombrar a la instrucción < *# define* > fue reservar un espacio en memoria para cada dato, con esto se liberó al sistema de modificaciones directas en el programa principal, debido a que antes cada parámetro estaba declarada con un < *# define* >.

Reservación de memoria

sis_tabu84M_2d.c	TabuZ_10_01.c
char celdas[NUM_CELDAS][7];	char celdas[MAX_NUM_CELDAS][7];
int no_celda[NUM_CELDAS];	int no_celda[MAX_NUM_CELDAS];
float enr[NUM_CELDAS];	float enr[MAX_NUM_CELDAS];
char celdas_nat[NUM_CELDAS_NAT][7];	float gad[MAX_NUM_CELDAS];
int no_celda_nat[NUM_CELDAS_NAT];	char celdas_nat[MAX_NUM_CELDAS_NAT][7];
float enr_nat[NUM_CELDAS_NAT];	int no_celda_nat[MAX_NUM_CELDAS_NAT];
	float enr_nat[MAX_NUM_CELDAS_NAT];
	float gad_nat[MAX_NUM_CELDAS_NAT];

- *Lectura de datos*

```
if((tabudatos=fopen("datostabu_07.txt", "r"))==NULL)
  {
        printf("Couldn't load datostabu_07.txt !!\n");
        exit(1);
  }

fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(elemen,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(iterat,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(movs,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(maxev,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(list,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(nucel,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(nucelnat,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(nssdm,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(nsexc,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(sdmcicop,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(exciclop,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(optrest,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(liminf,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(limsup,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(lmigad,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(lmsgad,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
fgets(linea,1000,tabudatos);


ELEMENTS = atoi(elemen);
ITERATIONS = atoi(iterat);
MOVES = atoi(movs);
MAX_EVAL = atoi(maxev);
LISTA = atoi(list);
NUM_CELDAS = atoi(nucel);
NUM_CELDAS_NAT = atoi(nucelnat);
NSTEPS_SDM = atoi(nssdm);
NSTEPS_EXCESS = atoi(nsexc);
SDM_CYCLE_OPTION = atoi(sdmcicop);
```

```
EXCESS_CYCLE_OPTION = atoi(exciclop);
OPTION_RESTART = atoi(optrest);
LIM_INF = atof(liminf);
LIM_SUP = atof(limsup);
LIM_I_GAD = atof(lmigad);
OPTION_RESTART = atoi(optrest);
LIM_INF = atof(liminf);
LIM_SUP = atof(limsup);
LIM_I_GAD = atof(lmigad);
LIM_S_GAD = atof(lmsgad);
```

La instrucción < *fgets* > hace la lectura de una cadena de caracteres los cuales son leídos del archivo de texto referenciado al archivo "tabudatos" (ver apéndice C); posteriormente la instrucción < *strcpy* > se encarga de copiar la cadena restringida por un espacio en blanco, asociándola a una declaración tipo < *char* > con un nombre identificador apropiado para el tipo de dato solicitado.

Por último, mediante la instrucción < *atof* > para declaraciones del tipo < *double* > y <atoi> para declaraciones del tipo <*int*>, se declara el tipo correspondiente para utilizarse en el sistema de optimización axial de cada una de las cadenas. Por ejemplo:

int ELEMENTS; ⟶ ELEMENTS = atoi(elemen);

double LIM_INF; ⟶ LIM_INF = atof(liminf);

De manera semejante a la obtención de datos para el sistema de optimización, se resolvió el problema de la creación de los nombres para los archivos de salida con extensión < *.txt* > del sistema.

Primero se definió qué se quería realizar con esas declaraciones, en este caso crear archivos.

```
FILE *prueba;
FILE *salida;
FILE *sdm_res;
FILE *mejorvecino;
FILE *better;
FILE *dis_mejor;
FILE *hot_exc_res;
FILE *file;
```

Para posteriormente continuar con la lectura de los datos del sistema desde el archivo de texto común como ya antes se había explicado.

```
strcpy(salid,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(prueb,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(fun_ob,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(sdm_re,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(hot_exc_re,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(bette,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(mejorvecin,strtok(linea," "));
fgets(linea,1000,tabudatos);
strcpy(dis_mejo,strtok(linea," "));
```

Por último por medio de la instrucción < *fopen* > se le asignó su correspondiente apuntador de tipo archivo a cada cadena leída desde el archivo de datos.

```
salida=fopen(salid, "w");
prueba=fopen(prueb, "w");
file = fopen(fun_ob, "w");
sdm_res = fopen(sdm_re, "w");
hot_exc_res = fopen(hot_exc_re, "w");
better= fopen(bette, "w");

mejorvecino= fopen(mejorvecin, "w");
rst= fopen("rest_in.txt", "r");
dis_mejor=fopen(dis_mejo,"w");
```

APÉNDICE C

En este apéndice se muestra cómo quedó finalmente el archivo de texto (*datostabu.txt*) del que se leyeron todos los datos indispensables para el funcionamiento del sistema de optimización axial.

```
12    ELEMENTS                NUMBER OF AXIAL ELEMENTS PER FUEL ASSEMBLY
100   ITERATION               NUMBER OF ITERATIONS
30    MOVES                   NUMBER OF MOVES
1000  MAX_EVAL                MAXIMUM NUMBER OF EVALUATIONS
20    LISTA                   SIZE OF THE TABU LIST
4     NUM_CELDAS              NUMBER OF ENRICHED CELLS CONTAINED IN THE DATA BANK
3     NUM_CELDAS_NAT          NUMBER OF NATURAL CELLS CONTAINED IN THE DATA BANK
11    NSTEPS_SDM              MAXIMUM NUMBER OF BACK STEPS FOR SDM CALCULATION
6     NSTEPS_EXCESS           MAXIMUM NUMBER OF BACK STEPS FOR HOT EXCESS CALCULATION
0     SDM_CYCLE_OPTION        ZERO: SDM ONLY AT BOC, ONE: SDM DURING THE CYCLE
0     EXCESS_CYCLE_OPTION     ZERO: HEX ONLY AT BOC, ONE: HEX DURING THE CYCLE
0     OPTION_RESTART          0=NO, 1=YES
3.2   LIM_INF                 LOWER LIMIT VALUE FOR MEAN ENRICHMENT
3.7   LIM_SUP                 UPPER LIMIT VALUE FOR MEAN ENRICHMENT
0.5   LIM_I_GAD               LOWER LIMIT VALUE FOR MEAN CONCENTRATION OF GADOLINIA
0.66  LIM_S_GAD               UPPER LIMIT VALUE FOR MEAN CONCENTRATION OF GADOLINIA

salidaZ12_01.txt              For nuclear data writing
pruebaZ12_01.txt              For tests writing
fun_objZ12_01.txt             For objective function results
sdm_resZ12_01.txt             For sdm results
hot_exc_resZ12_01.txt         For hot excess reactivity results
betterZ12_01.txt              For better result
mejorvecinoZ12_01.txt         For previous better result
dis_mejorZ12_01.txt           For the best axial design
```

G L O S A R I O D E T É R M I N O S

- CM-PRESTO: (Core Master Presto) Simulador del núcleo del reactor que consiste en un modelo neutrónico-termohidráulico de estado estacionario en 3D. Utilizado en esta tesis para evaluar la función objetivo.
- Físil: también llamado material fisible. Que se puede fisionar
- Fisión: proceso nuclear que ocurre cuando el núcleo de un átomo se parte en dos núcleos pequeños, más algunos subproductos. Estos subproductos incluyen los neutrones libres y la emisión de fotones (generalmente rayos gamma) asociada, que supone cantidades substanciales de energía.
- Fusión: es el proceso mediante el cual dos núcleos atómicos se unen para formar uno de mayor peso atómico.
- Gadolinia: (Ga_2O_3) actúa como veneno consumible para contrarrestar el exceso de reactividad inicial que debe tener el ensamble combustible.
- HELIOS: código utilizado para crear las bases de datos nucleares.
- HEX: exceso de reactividad en caliente.
- Isótopo: núcleos con igual número atómico y diferente número de neutrones, es decir, átomos del mismo elemento que tienen masas diferentes.
- Lixiviación: En la ciencia geológica se entiende como el proceso de lavado de un estrato de terreno o capa geológica por el agua. Como también por placas ácidas encontradas en las sales que disuelven casi cualquier material sólido. Se llama así al fenómeno de desplazamiento de sustancias solubles o que pueden dispersarse (arcilla, sales, hierro, humus) causado por el movimiento de agua en el suelo.
- LOCA: accidente de pérdida de refrigerante
- Masa atómica: masa de un átomo expresada en unidades de masa atómica (uma). La masa atómica calculada para un elemento es la correspondiente al promedio de la mezcla de sus isótopos según su ocurrencia en la naturaleza.
- MCPR: límite de razón de potencia crítica mínima generada.
- MLHGR: límite de razón de generación lineal de calor máxima.
- MRNP: límite de máxima potencia nodal relativa.
- Número atómico: es el número de protones que contiene el núcleo de un átomo, se designa con la letra Z.
- Número de Masa: es igual al número de nucleones, es decir, a la suma de protones y neutrones en el núcleo, se designa con la letra A.
- Nucleones: cantidad de protones y neutrones en el núcleo del átomo de un elemento.
- PPF: factor de potencia pico (radial).

- Unidad de Masa Atómica: (uma) unidad utilizada para expresar la masa de los átomos. Al isótopo más común del carbono ha sido asignado un valor de 12 uma exactas. Las masas de los demás átomos se determinan con referencia a este valor.
- XMPGR: fracción del límite de razón de generación de calor planar promedio.

Bibliografía

1. C. Martín del Campo, J. L. François, L. B. Morales, "Boiling Water Reactor Fuel Assembly Axial Design Optimization Using Tabu Search", *Nuclear Science and Engineering*, **142**, p. 107-115 (2002).
2. C. Martín del Campo, J.L. François, H.A. López, "AXIAL: a system for boiling water reactor fuel assembly axial optimization using genetic algorithms", *Annals of Nuclear Energy*, **28**, p. 1667-1682 (2001).
3. W. Edward Gettys, Frederick J. Keller, Malcom J. Skove, "Física Clásica y Moderna", 1ª edición, Edit. McGraw Hill, pp. 1148-1173, Madrid, 1991.
4. Jerry D. Wilson, "Física con Aplicaciones", 2ª edición, Edit. McGraw Hill, pp. 675-698, México 1991.
5. H. E. White, "Física Moderna Vol. II", edit. UTEHA, 6ª edición, pp. 939-978, España,1981.
6. Asociación Nuclear ASCÓ-Vandellos, http://www.anav.es/esp/e0305.htm, (2006)
7. Enciclopedias en red, http://es.wikipedia.org/wiki/Reactor_nuclear , (2005)
8. Visitas Virtuales a plantas nucleares, http://www.nucleartourist.com/type/bwr.htm, (2006)
9. Sitio de aficionado a las fuentes de energía, www.geocities.com/loorenzo_es/ctsbea.htm, (2006)
10. Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas, "*Del Fuego a la Energía Nuclear*", Artes Gráficas Graphos, S.A de C.V., 4ª impresión, pp. 20-22, 24,25, 39,40. México 2002.
11. Apuntes de Carácter científico por el Dr. Ricardo Santiago Netto, http://www.fisicanet.com.ar/energias/en_nuc/en_06b_Energia_Nuclear.php, (2005).
12. C. Martín del Campo M., J.L. François L., Ramiro François, "Aplicación de Búsqueda Tabú a la Optimización de la Distribución Radial de Enriquecimiento en un Ensamble Combustible para BWR", *XIII Congreso Anual de la SNM/XX Reunión de la SMSR*, p. 2-3, 5, Ixtapa Zihuatanejo 2002.

13. C. Martín del Campo, “Diseño y Optimización de Ensambles Combustibles para BWR”, Facultad de Ingeniería-UNAM, p. 7, 12, México 2003.

14. C. Martín del Campo Márquez, J.L. François Lacouture, “Axial-2: Sistema para la Optimización Axial de Combustibles de Reactores Nucleares BWR empleando computación evolutiva”, *Informe Técnico UNAM/FI/DIE/N2-01*, p.8 -11, Jiutepec, Mor. (septiembre 2001).

15. Métodos Heurísticos por medio de algoritmos computacionales http://sci2s.ugr.es/docencia/teoriaAlgoritmos/TA-Tema4-Algoritmos-Voraces.0506.pdf. (2004).

16. Tesis de Maestría: Determinación de Eficiencia y Factor de Garantía de un Algoritmo Basado en Búsqueda Local para el Tratamiento del Problema MaxSAT www.cs.buap.mx/~dpinto/tesis.pdf (2006)

17. Búsqueda Tabú: Un Procedimiento Heurístico para Solucionar Problemas de Optimización Combinatoria, publicaciones de la UAM Azcapotzalco http://www-azc.uam.mx/publicaciones/enlinea2/num1/1-3.htm (2006)

18. C. Martín del Campo M., J.L. François L., Luis B. Morales, “Aplicación de Búsqueda Tabú al Diseño y Optimización Axial de Combustible Nuclear”, *XII Congreso Anual de la SNM/XIX Reunión de la SMSR*, p.2 -7, 9, 12, Zacatecas 2001.

19. C. Martín del Campo, J.L. François L., Luis B. Morales, “BWR Fuel Assembly Axial Design Optimization Using Tabu Search”, M&C 2001 Salt Lake City, UTA, USA, September 2001.

20. Scandpower, User Manual CM-PRESTO-91 A/S. (July, 1993).

21. Studsvik Scandpower, “HELIOS Methods,” (1998).

22. C. Martín del Campo M., J.L. François L., Luis B. Morales, "Aplicación de Búsqueda Tabú al Diseño y Optimización Axial de Combustible Nuclear", *México Nuclear*, 3/1, p. 14-22 (2002).