

## **CAPÍTULO 3**

### **ELABORACIÓN DE MODELOS Y SIMULACIÓN DEL NÚCLEO DEL REACTOR.**

Se ha desarrollado previamente en el trabajo de Doctorado en Ingeniería en Energía del alumno Dionisio Telésforo, el modelo del núcleo del reactor GT-MHR mediante el código MCNPX [1]. Dado el estado actual del desarrollo de dicho modelo del núcleo, es posible emplearlo para la simulación del quemado del combustible y analizar el desempeño de diferentes tipos de combustibles en el reactor nuclear GT-MHR.

En este capítulo se describirá brevemente los modelos que se han desarrollado para simular comportamientos neutrónicos en el reactor, los cuales son:

- El modelo de la partícula de combustible TRISO y elemento compacto.
- El modelo del ensamble hexagonal.
- El modelo heterogéneo del núcleo con modelos de tres tipos de ensamblajes hexagonales de grafito.
- El modelo homogéneo equivalente de los tres tipos de ensamblajes que forman los anillos.

La selección de los artículos de Alberto Talamo [2] como referencia para el desarrollo de nuestros modelos del núcleo del GT-MHR, se realizó en base a lo completo de la información requerida para el diseño específico del núcleo de este reactor, compuesto de tres anillos. El autor emplea el método de Monte Carlo para resolver el problema de criticidad en el GT-MHR, también presenta diversas alternativas de combustibles y proporciona resultados de reactividad en sus modelos de combustible empleando diversas partículas pequeñas y su evolución de quemado en el tiempo. Los resultados publicados son la referencia de comparación respecto a los resultados obtenidos.

#### **3.1 Modelo de la partícula de combustible TRISO.**

Como se mencionó en el primer capítulo de ese trabajo de tesis, el combustible TRISO, el elemento compacto y los ensamblajes hexagonales que forman el núcleo del reactor, poseen la configuración mostrada en la siguiente figura.

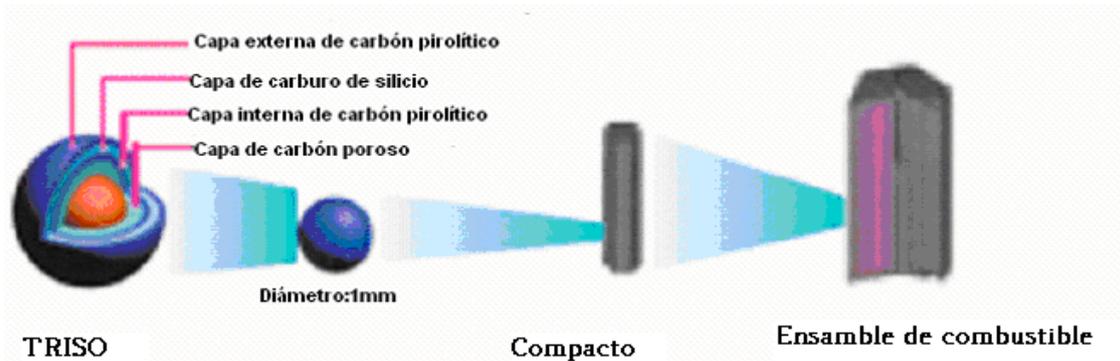


Figura 3.1 Esquema de combustible. [3]

La Tabla 3.1 muestra los datos utilizados de las capas que integran la micro-partícula TRISO para realizar la simulación del combustible.

TRISO	
<b>Radio Kernel [μm]</b>	100
<b>Ancho de la capa carbón poroso [μm]</b>	150
<b>Ancho de la capa IPyC [μm]</b>	35
<b>Ancho de la capa SiC [μm]</b>	35
<b>Ancho de la capa OPyC [μm]</b>	40
<b>Factor de empaquetamiento [%]</b>	20

Tabla 3.1. Dimensiones de una partícula de combustible TRISO. [1]

Dada las características computacionales del código MCNPX es posible modelar en tres planos la geometría de los componentes. La modelación de la micro-partícula obtenida con el programa MCNPX se observa en la Figura 3.2, obtenida de la interfaz gráfica Exceed acoplada al código MCNPX.

Cualquier parte del modelo puede ser visualizada y ampliada en cualquiera de los planos cartesianos, o en cualquier plano, definiendo el punto en el eje requerido. Las figuras se pueden rotar, escalar, redibujar, volver a colorear, mostrar los números de superficies que configuran cada celda, mostrar los números de celda que definen los elementos de la geometría e inclusive ocultar los elementos no deseados para resaltar los deseados.

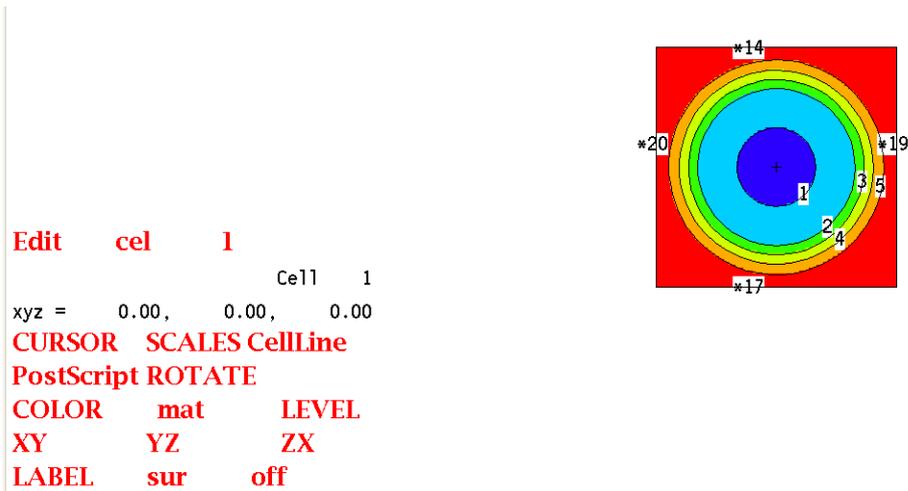


Figura 3.2. Modelación MCNPX de la partícula TRISO. Matriz cúbica.

La matriz de grafito es representada en rojo, el sistema de contención del núcleo en naranja, amarillo, verde y azul claro. Las esferas azul oscuro muestran los núcleos kernel.

### 3.2 Modelo del elemento Compacto

Con el modelo anterior de la partícula TRISO se obtuvo una distribución en malla para modelar una oblea de una capa de altura (Figura 3.3). El radio de la oblea de combustible es justo el radio del Compacto. Se ajustó el porcentaje de empaquetamiento en dicha área para conservar el diseño a la forma cilíndrica que tiene el combustible Compacto.

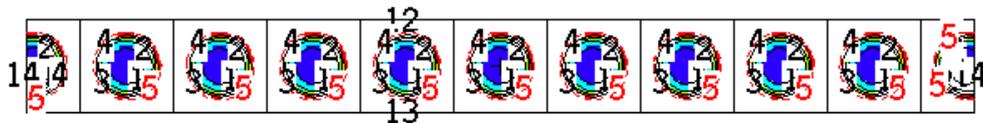


Figura 3.3. Modelo MCNPX de un arreglo de celdas.

En la Figura 3.4 se muestra un arreglo de celdas acomodadas en cuadrícula, la capa de combustible basado en celdas de TRISOS se generan a partir de una “lattice” rectangular.

```

basis: XY
( 1.000000, 0.000000, 0.000000)
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 0.00)
extent = ( 0.01, 0.01)
possible causes of dotted lines:
errors in the geometry.
cookie-cutter cell in the source.
a problem plane coincident with
the plot plane.

```

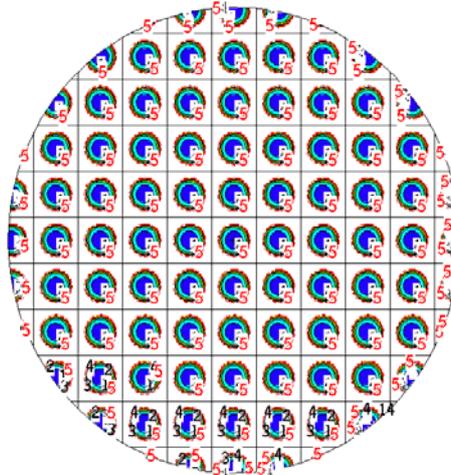


Figura 3.4. Modelo MCNPX del Compacto. Matriz cúbica.

En la representación horizontal de la figura anterior se observa que la superficie cilíndrica que delimita la celda de combustible Compacto recorta los núcleos y las capas de contención del material fisible. Como en el diseño del compacto conceptualmente no cabe que el núcleo quede fracturado, o sin recubrimiento, se diseñó un segundo modelo en base a una “lattice” hexagonal mostrado en la Figura 3.5. Es importante resaltar que se requiere de la generación de mallas llamadas “lattice”, debido a las 10239 celdas que forman un Compacto, y para simplificar el modelo del Compacto.

```

( 1.000000, 0.000000, 0.000000)
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 0.00)
extent = ( 1.60, 1.60)
cell labels are
cell names

```

```

Edit    cel    3
                                Cell    3
xyz =   0.00,   0.00,   0.00
CURSOR  SCALES CellLine
PostScript ROTATE
COLOR   mat    LEVEL

```

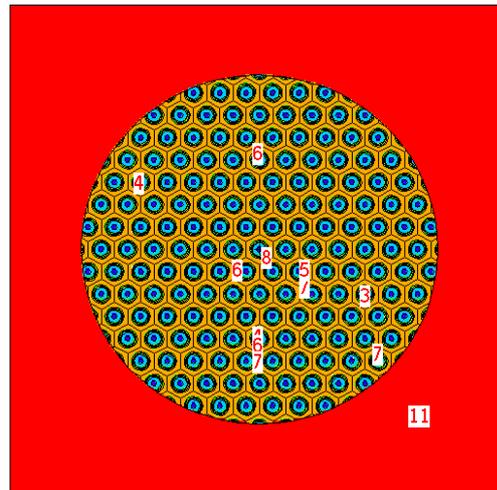


Figura 3.5. Modelo MCNPX del Compacto. Matriz hexagonal.

La Figura 3.6 muestra un acercamiento a las celdas del modelo compacto formado con matriz hexagonal, mostrado en la figura anterior.

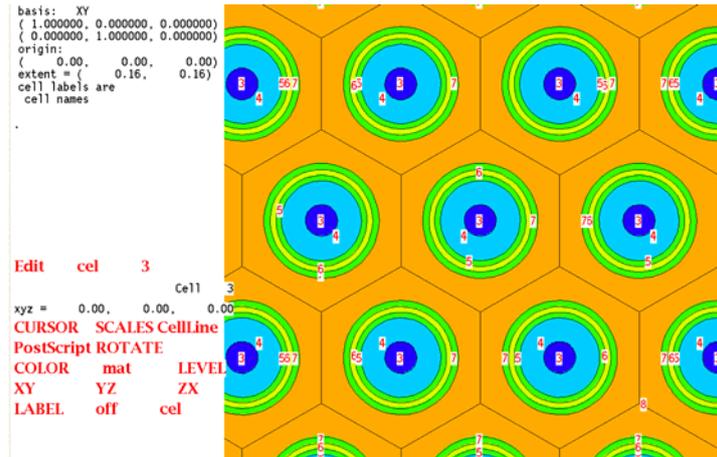


Figura 3.6 Acercamiento del modelo Compacto. MCNPX.

La matriz de grafito es representada en oro, el sistema de contención del núcleo en verde, amarillo y azul claro, las esferas azul oscuro muestran los núcleos.

### 3.3 Modelo del Ensamble Hexagonal

Los elementos de combustible compactos son apilados para formar una varilla a la cual se le nombra Pin, y dicha varilla de combustible es empleada para llenar el canal de combustible en la matriz de grafito del ensamble.

El ensamble básico de combustible se encuentra integrado por 216 tubos de combustible y 108 tubos de refrigerante incrustados en un prisma hexagonal de grafito (Figura 3.7). Existen variaciones en el ensamble, por la integración y posición de la barra de control (Figura 3.7.b, Figura 3.7.c). Para la modelación del ensamble hexagonal se utilizó la configuración de la Figura 3.7a.

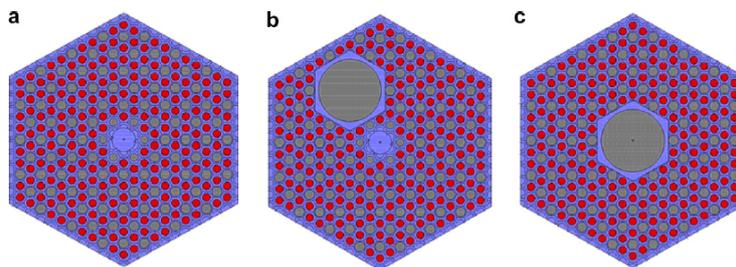


Figura 3.7. Modelos para los bloques de ensambles.

El diseño de la sección horizontal de nuestro ensamble básico (Figura 3.8) está basado en una malla hexagonal inicialmente formada por tubos de combustible en su totalidad, ajustando la distribución de los tubos, las dimensiones físicas de la matriz de grafito a los datos del reactor GT-MHR.

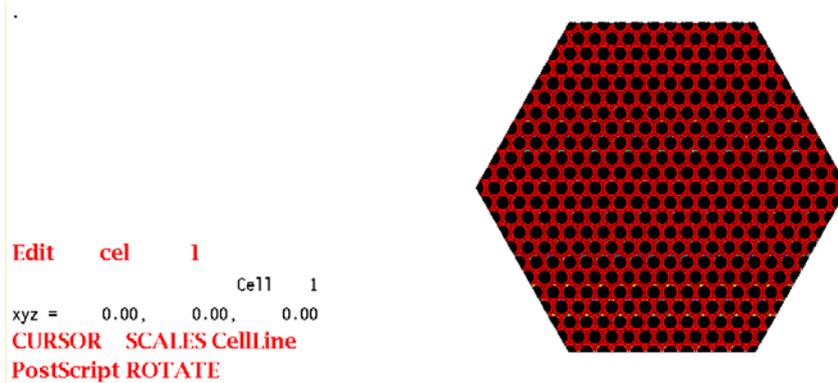


Figura 3.8. Ensamble básico con MCNPX.

Un acercamiento mostrado en la Figura 3.9 muestra los detalles de este ensamble. En la sección horizontal se distinguen los bordes de los combustibles cilíndricos llamados Compactos y se aprecian las partículas fundamentales de combustible TRISO.

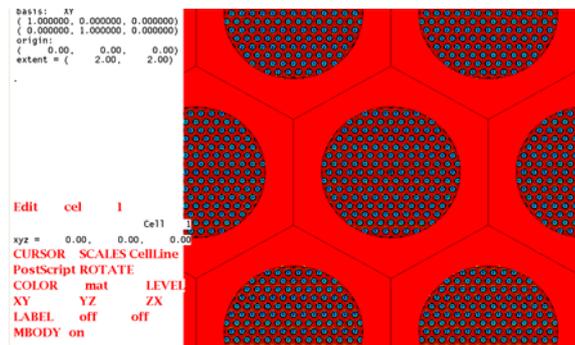


Figura 3.9. Ensamble básico, plano XY. MCNPX

Posteriormente se incorporaron los tubos de refrigerante, el borde del prisma de grafito, y se incluyó el núcleo de grafito. A continuación se muestran detalles de la distribución de los tubos de refrigerante en color azul y el núcleo de grafito en color rojo.

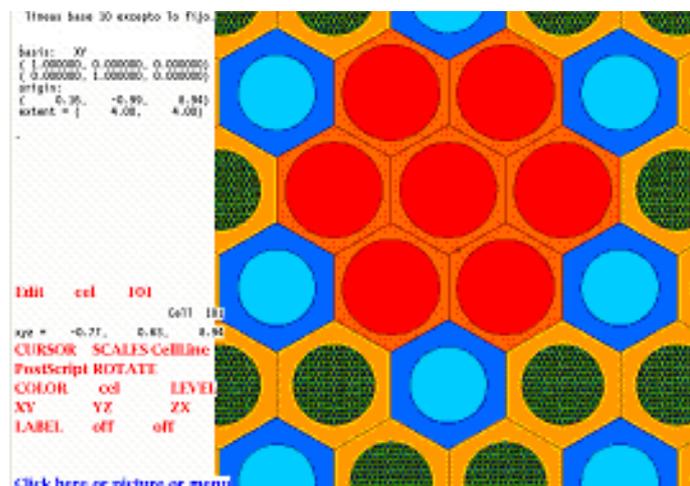


Figura 3.10. Núcleo de grafito y tubos refrigerantes. Plano XY. MCNPX

### 3.4 Modelo heterogéneo del núcleo.

Empleando el bloque hexagonal anterior se diseñó la sección horizontal de ensambles: el núcleo del reactor GT-MHR. En el diseño de referencia [2], el combustible se forma de tres anillos de ensambles con 36 bloques hexagonales cada uno y 10 bloques de altura, distribuidos en una malla hexagonal, teniendo una configuración total de 3 X 36 X 10 bloques hexagonales de combustible (ver Figura 3.11). Las dimensiones de la partícula de combustible TRISO empleada para el diseño de este modelo son mostradas en la siguiente tabla.

TRISO	
<b>Radio Kernel [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	150
<b>Ancho de la capa Carbón poroso [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	150
<b>Ancho de la capa IPyC [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	35
<b>Ancho de la capa SiC [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	35
<b>Ancho de la capa OPyC [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	40
<b>Factor de empaquetamiento [%]</b>	37.55

Tabla 3.2. Dimensiones de la partícula TRISO utilizada para los modelos simulados. [4]

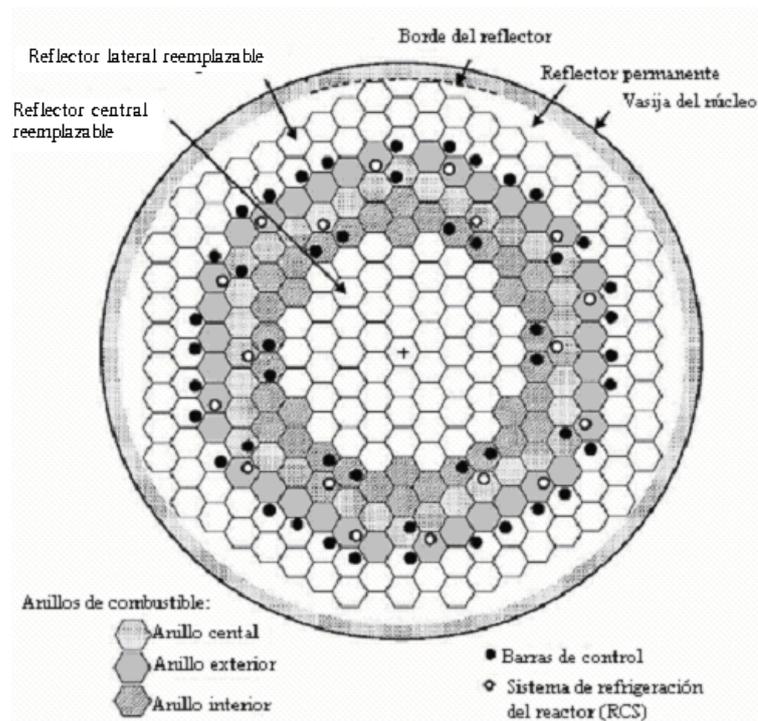


Figura 3.11. Configuración del núcleo del reactor GT- MHR con tres anillos. [2]

La disposición en tres anillos muestra que el núcleo fue dividido en regiones radiales según el tipo de material de los bloques hexagonales. El reflector permanente formado de grafito forma la periferia del núcleo, le siguen los bloques hexagonales de grafito que forman el reflector externo, el anillo de combustible externo, el anillo de combustible central, el anillo de combustible interno y en la parte central el reflector

interno. El anillo interno IR, por sus siglas en inglés, lo componen 36x10 bloques hexagonales, el anillo central CR lo forman 36x10 bloques, y el anillo externo OR tiene 36x10 bloques, en total 1080 bloques combustibles.

La Figura 3.12 muestra la vista de la estructura de *lattice* hexagonal sobre las que se desarrolló el modelo de la sección horizontal del núcleo.

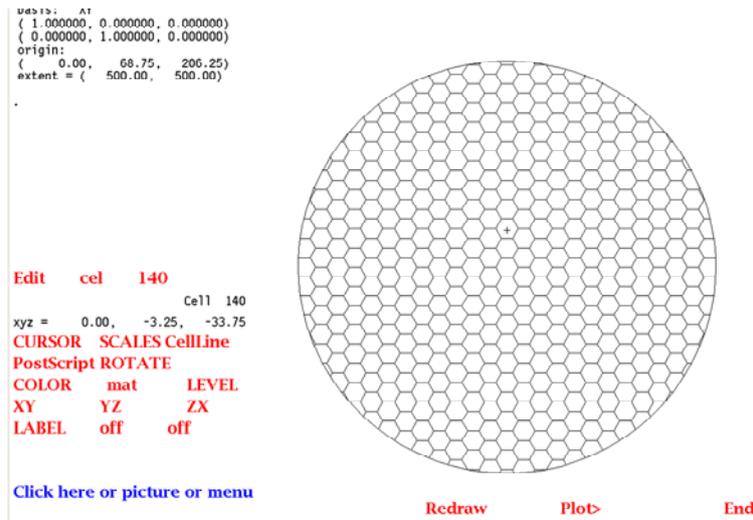


Figura 3.12. Vista superior de la *lattice* del núcleo. MCNPX.

Posteriormente se inserta la capa básica de anillos de ensambles de combustible, complementada con dos anillos integrados con 102 prismas hexagonales de grafito que sirven como reflector (Figura 3.13).

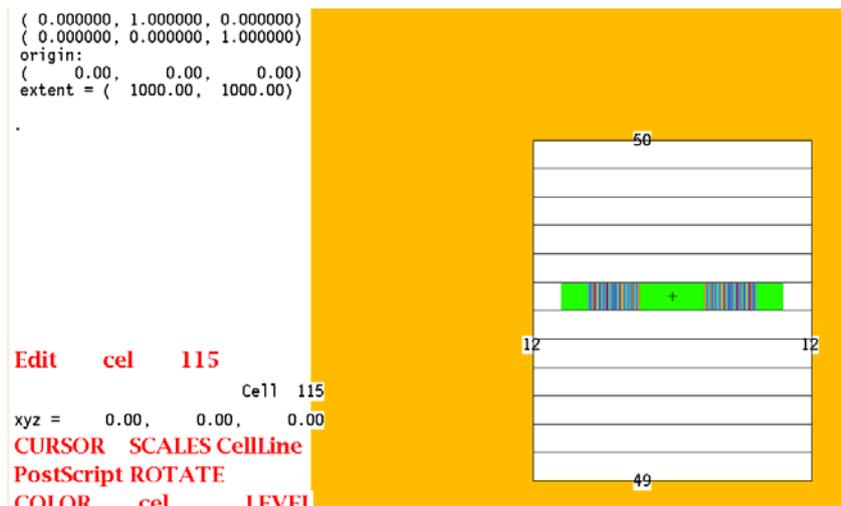


Figura 3.13. Secciones horizontales del núcleo. Plano YZ.

El núcleo se obtuvo reproduciendo el modelo en el espacio de la geometría que se ve en la Figura 3.14.

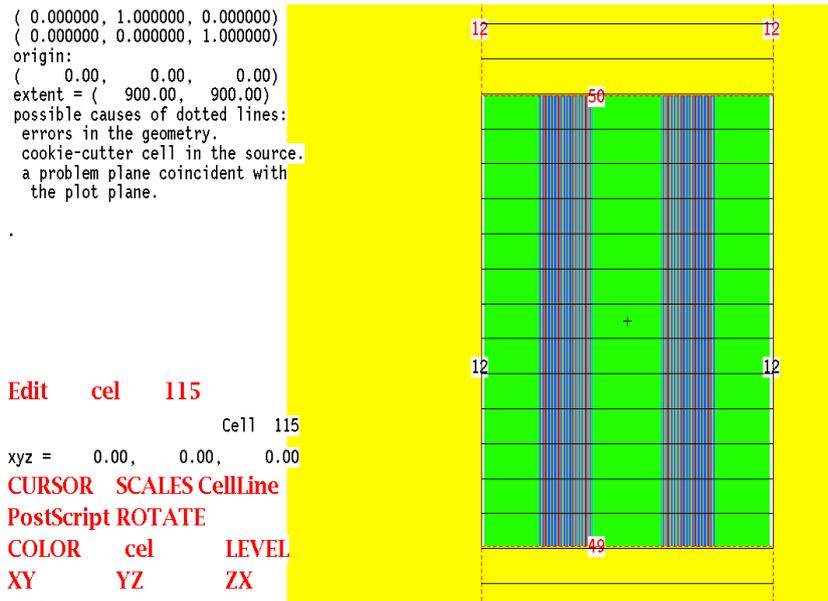


Figura 3.14. Secciones horizontales del núcleo. Plano YZ.

Finalmente se añaden reflectores de grafito en la parte inferior y superior del núcleo (Figura 3.15).

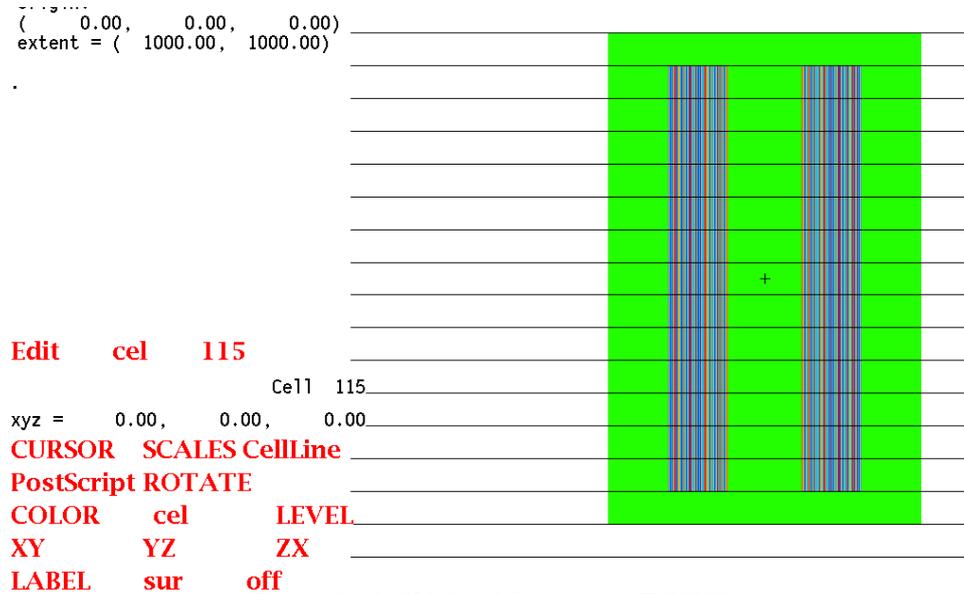


Figura 3.15. Núcleo del reactor GT-MHR.

La siguiente figura muestra esquemáticamente el modelo del núcleo del reactor GT-MHR anteriormente obtenido.

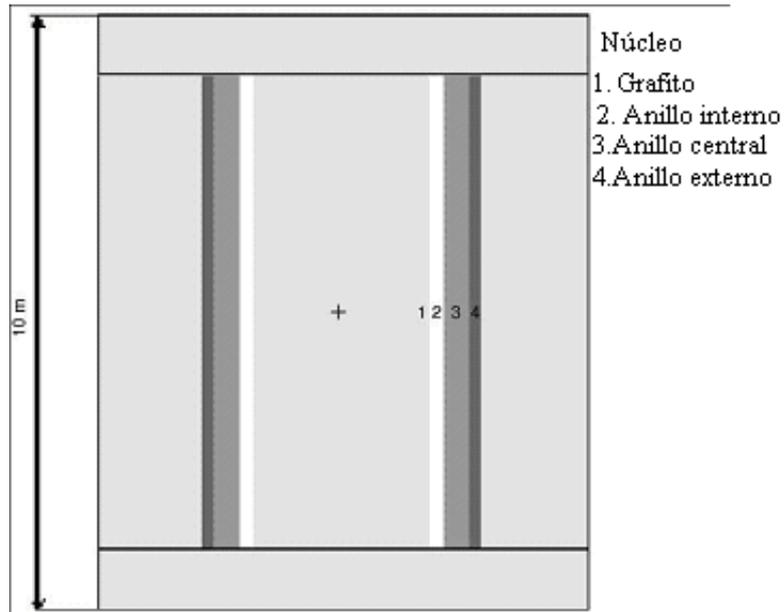


Figura 3.16. Núcleo del reactor GT-MHR esquematizado. [2]

A continuación se muestra la vista radial del modelo del núcleo del reactor empleado.

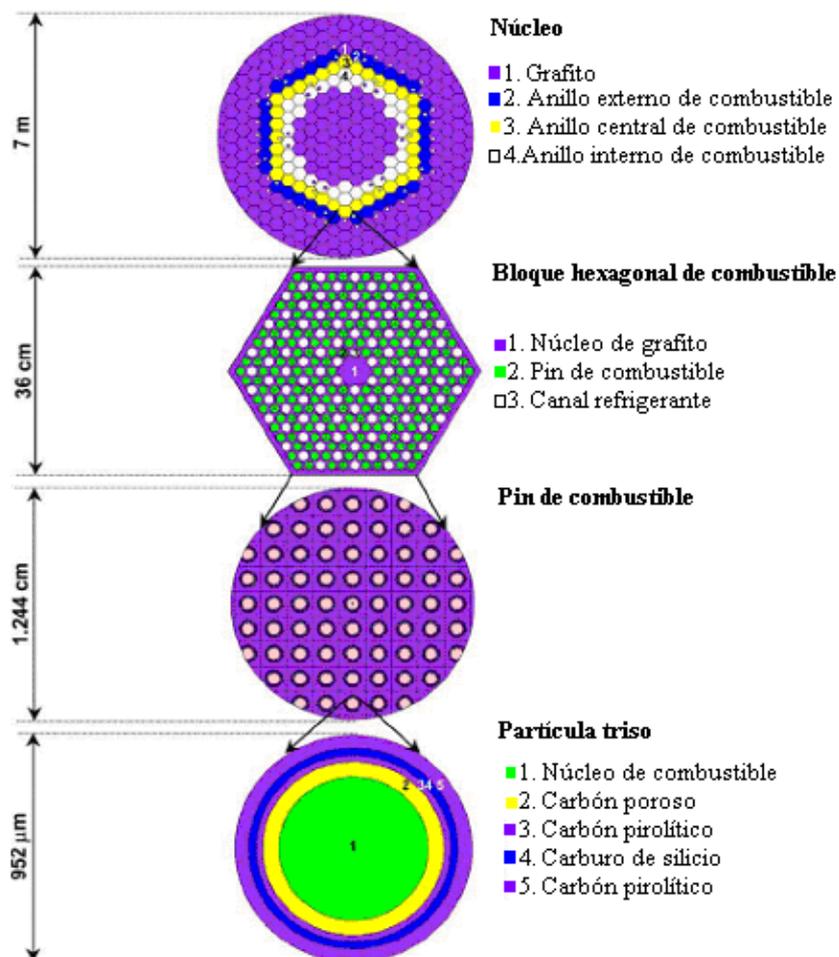


Figura 3.17. Modelo empleado. [4]

Es importante recalcar que para el modelado de cada una de los componentes del núcleo del reactor (pin, ensamble hexagonal, anillos de combustible) se ajustó cada modelo a los datos de referencia, sobre los modelos desarrollados anteriormente y se buscó la mejor aproximación con los datos publicados basados en las librerías de secciones eficaces disponibles.

Así por ejemplo para la modelación del pin, se ajustó el porcentaje de empaquetamiento y las dimensiones físicas de la matriz de grafito que los contiene a los datos del PIN de General Atomics (GA).

### **3.5 Modelo simplificado**

Entre más refinamientos se incluyan en el diseño del núcleo, el tiempo de cómputo de procesamiento del modelo se incrementa. Dado que se requieren cálculos de quemado de combustible, es importante disminuir el tiempo de cómputo de ejecución para poder manipular los combustibles dentro del núcleo GT-MHR con mayor facilidad.

Existente el inconveniente del excesivo tiempo de cómputo requerido para obtener el factor de multiplicación de neutrones del modelo heterogéneo del núcleo, por lo que se requirió de un modelo simplificado con resultados similares al modelo heterogéneo del Núcleo del Reactor.

El modelo heterogéneo sirvió como referencia para la construcción del modelo simplificado. Basado en la reactividad del ensamble heterogéneo se desarrolló el modelo simplificado con el método de homogenización RPT (Reactivity-equivalent Physical Transformation) [5].

### **3.6 Modelo homogéneo del PIN.**

En el modelo heterogéneo los TRISOS se encuentran dispersos en la matriz de grafito con un porcentaje de empaquetamiento. Este caso de configuración del combustible se le llama problema de doble heterogeneidad. La región con doble heterogeneidad puede ser transformada en una región homogénea con una reactividad estimada equivalente (RPT)

En el método RPT la región que contiene partículas combustibles es homogeneizada con un simple volumen ponderado y se encuentra que la reactividad es considerablemente subestimada (Figura 3.17). El método RPT fue desarrollado para capturar los efectos de la doble heterogeneidad sin modelar las partículas explícitamente.

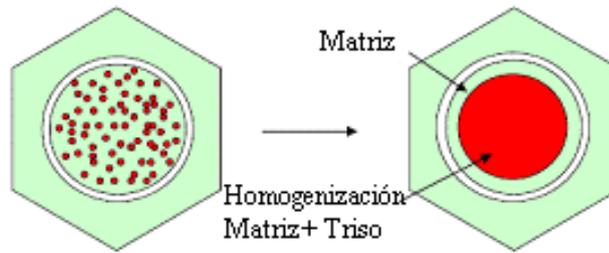


Figura 3.18. Método de homogenización RPT. [5]

La siguiente figura muestra la aplicación del método de homogenización al elemento compacto y consecuentemente al PIN heterogéneo empleando Exceed.

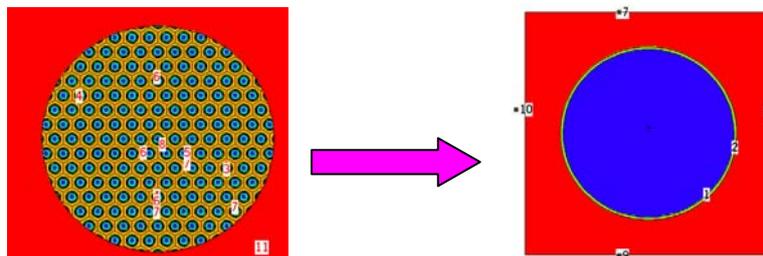


Figura 3.19. Pin Homogéneo.

La densidad del pin se incrementa con la reducción del radio, aumentando también la reactividad. El radio reducido ( $r_{RPT}$ ) de la nueva zona de combustible homogéneo está determinado de tal manera que el factor de multiplicación de neutrones resultante es igual al de la región de referencia. Este método conserva parámetros nucleares incluyendo el factor de multiplicación y las tasas de reacción.

### 3.7 Modelo homogéneo del núcleo GT-MHR

Se modeló el núcleo buscando obtener la reactividad equivalente del núcleo completo, manipulando los tres tipos de ensambles simultáneamente con el método RPT, pero conservando el mismo radio en los tres tipos de PIN homogéneos equivalentes. Después de varias modelaciones se llegó al modelo de un núcleo homogéneo, con radio PIN=0.462 y  $K_{eff}=1.12721$ , desviación estándar de 0.00065, con diferencia de 14 pcm respecto al modelo heterogéneo. El tiempo de ejecución (sin quemado) disminuyó a 37.46 minutos.

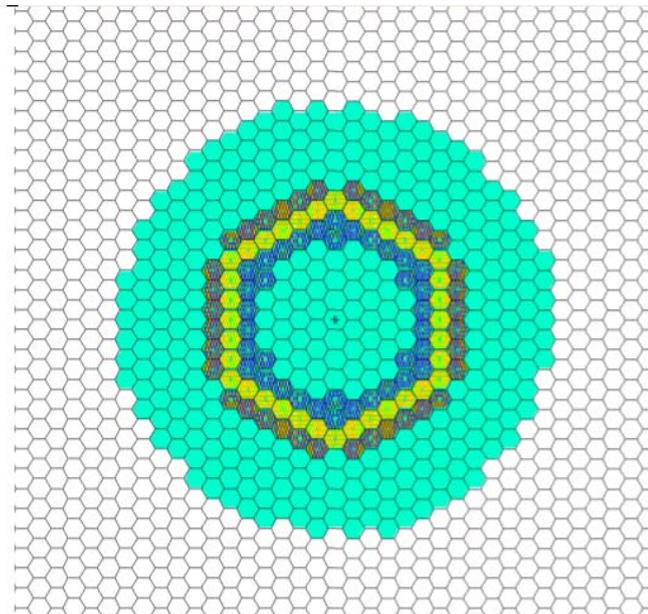
La siguiente tabla muestra la comparación del modelo heterogéneo y homogéneo del núcleo del reactor con los tres distintos anillos de enriquecimiento: IR 3.6%, CR 4.4% y OR 3.9% .

Núcleo	Keff	T- ejecución [min]
Modelo Núcleo Heterogéneo, 3 enriquecimientos	1.12735	398.21
Modelo Núcleo Homogéneo, 3 enriquecimientos	1.12721	37.46

**Tabla 3.3. Comparación Modelos de Núcleo GT-MHR. [1]**

Donde se aprecia que el empleo de un método alternativo con las partículas TRISO diluidas en la matriz de grafito tiene una muy buena aproximación a los resultados de la ejecución de los modelos heterogéneos, y se comprobó la disminución del tiempo de ejecución en el modelos homogéneo. A su vez los resultados obtenidos de los modelos heterogéneos se aproximan a los valores de los modelos publicados en los artículos de Tálamo [2].

En la Figura 3.19 se muestra el núcleo del reactor GT-MHR simplificado, con los tres diferentes anillos de ensambles de combustible obtenido. Sólo con el modelo homogéneo del núcleo pudo obtenerse la vista completa del núcleo que no se consiguió con el modelo heterogéneo debido al elevado tiempo de cómputo requerido para su despliegue.



**Figura 3.20. Vista superior del núcleo GT-MHR simplificado.**

El modelo obtenido del núcleo homogéneo del reactor GT-MHR puede ser modificado para probar distintas configuraciones de combustible y para la simulación del quemado de las mismas, y de esta manera poder realizar el análisis del desempeño de diferentes tipos de combustible del reactor nuclear GT-MHR.

### 3.8 Implementación de la opción de quemado

Una vez obtenido el modelo homogéneo del núcleo del reactor GT-MHR con MCNPX, el siguiente paso para analizar el desempeño del combustible del reactor es la implementación de la tarjeta de quemado “BURN TIME”, la cual simulará el quemado del combustible a distintos días de quemado y a una potencia dada.

Para ejecutar el modelo del núcleo del reactor con quemado, se utilizó una potencia de 600 MWt y una fuente de 2000 neutrones y 250 ciclos. El tiempo que tarda el cálculo de quemado es independiente del número de ciclos.

El programa de cómputo MCNPX fue corrido en una computadora con las siguientes características:

Procesador: Pentium X86 de 2.4 GHz  
Memoria RAM: 512 MB  
Sistema Operativo: CentOS (basado en Linux)

La siguiente tabla muestra los tiempos obtenidos al ejecutar la simulación del núcleo homogéneo del reactor GT-MHR, sin quemado y con quemado, del combustible en MCNPX.

<b>Modelo a ejecutar</b>	<b>Tiempo de ejecución (min)</b>
Modelo homogéneo sin quemado	23.29
Modelo homogéneo con quemado (1 paso de quemado)	355.70

**Tabla 3.4. Tiempos de ejecución de modelos con y sin quemado.**

Dado que en la ejecución del modelo con quemado, el programa de cómputo realiza dos veces el cálculo de criticidad, para determinar el tiempo que tarda MCNPX únicamente en ejecutar un paso de quemado, utilizamos la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo de quemado} = 355.70 - (2 \times 23.29) = 309.12 \text{ min.}$$

Entonces, si queremos implementar varios pasos de quemado, el tiempo que tardaría MCNPX en simular la ejecución del puro quemado del combustible, sería el producto de 309.12 min por el número de pasos a implementar.

Lo anterior devuelve tiempos de quemado de combustible demasiados grandes, lo cual retarda considerablemente la obtención de los datos para el análisis del combustible del reactor y muestra ser un nuevo reto a resolver para este trabajo de tesis.