



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS

**MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE UN
REACTOR AVANZADO USANDO
SERPENT Y AZNHEX**

T E S I S

**PRESENTADA ANTE EL COLEGIO DE PROFESORES DE
LA SECCIÓN DE GRADUADOS DE LA ESCUELA
SUPERIOR DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS DEL
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, PARA
SATISFACER, EN PARTE, LOS REQUISITOS
NECESARIOS PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS FISICOMATEMÁTICAS
(LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA NUCLEAR)**

POR

LUCERO ARRIAGA RAMIREZ

DIRIGIDA POR

Dr. EDMUNDO DEL VALLE GALLEGOS (IPN)

y

Dr. ARMANDO MIGUEL GÓMEZ TORRES (ININ)

MEXICO, D.F., 2015





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

**ACTA DE REGISTRO DE TEMA DE TESIS
 Y DESIGNACIÓN DE DIRECTORES DE TESIS**

México, D.F. a 10 de Julio del 2015

El Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESFM en su sesión Ordinaria No. 09 celebrada el día 17 del mes de Junio 2015 conoció la solicitud presentada por el(la) alumno(a):

Arriaga Apellido paterno	Ramirez Apellido materno	Lucero Nombre (s)
		Con registro: A 1 3 0 8 5 2

Aspirante de la: _____ Maestría en Ciencias Fisicomatemáticas

1.- Se designa al aspirante el tema de tesis titulado:
"Modelación y análisis de un reactor avanzado usando SERPENT y AZNHEX"

De manera general el tema abarcará los siguientes aspectos:

Se anexa hoja

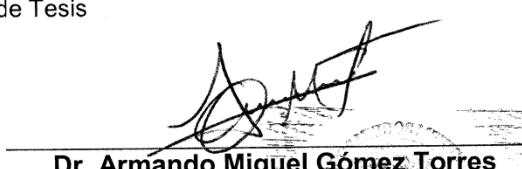
- 2.- Se designan como Directores de Tesis a los Profesores:
Dr. Edmundo del Valle Gallegos y Dr. Armando Miguel Gómez Torres
- 3.- El trabajo de investigación base para el desarrollo de la tesina será elaborado por el alumno en:
El Departamento de Física
- que cuenta con los recursos e infraestructura necesarios.
- 4.- El interesado deberá asistir a los seminarios desarrollados en el área de adscripción del trabajo desde la fecha en que se suscribe la presente hasta la aceptación de la tesis por la Comisión Revisora correspondiente:

Directores de Tesis


Dr. Edmundo del Valle Gallegos

Aspirante

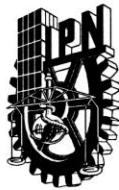

Lucero Arriaga Ramirez


Dr. Armando Miguel Gómez Torres

Presidente del Colegio


Dr. Miguel Túro Velázquez

ESCUELA SUPERIOR DE
 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
 ESTADOS UNIDOS DE
 MÉXICO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F. siendo las 18:00 horas del día 31 del mes de Julio del 2015 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESFM para examinar la tesis titulada:

"Modelación y análisis de un reactor avanzado usando SERPENT y AZNHEX"

Presentada por el(la) alumno(a):

Arriaga Apellido paterno	Ramirez Apellido materno	Lucero Nombre(s)
------------------------------------	------------------------------------	----------------------------

Con registro:

A	1	3	0	8	5	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de la :

Maestría en Ciencias Fisicomatemáticas

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Edmundo del Valle Gallegos

M. en C. Carlos Filio López

Dr. Armando Miguel Gómez Torres

Dr. Arturo Fidencio Méndez Sánchez

Dr. Jesús García Ravelo

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Miguel Túñigo Velázquez
 SEP
 ESCUELA SUPERIOR DE
 CIENCIAS FISICOMATEMÁTICAS
 SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
 POSGRADO E INVESTIGACIÓN
 IPN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 31 del mes de Julio del año 2015, la que suscribe Lucero Arriaga Ramirez alumna del Programa de Maestría en Ciencias Fisicomatemáticas, con número de registro A130852, adscrita a la Escuela Superior de Física y Matemáticas, manifiesta que es la autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Edmundo del Valle Gallegos y Dr. Armando Miguel Gómez Torres y cede los derechos del trabajo titulado Modelación y Análisis de un Reactor Avanzado Usando SERPENT y AZNHEX, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso de la autora y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección guten_tag_04@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Lucero Arriaga Ramirez

DEDICATORIA

A mis padres:

*Virginia Ramirez Colín y
Miguel Antonio Arriaga Martínez*

Gracias por todo el apoyo ilimitado que me han brindado, por su amor, cariño, consejos y sacrificios que han hecho todos estos años, por seguir alentándome a superarme profesionalmente y personalmente.

Quiero agradecerles por todos los momentos de felicidad y por estar conmigo apoyándome y guiándome en todo momento, los amo con todo mi corazón, este trabajo es un reflejo de todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanos:

*Álvaro Arriaga Ramirez y
Elizabeth Arriaga Ramirez*

Gracias por estar a mi lado apoyándome y alentándome, también por los momentos de felicidad y diversión que hemos pasado, a pesar de las peleas como hermanos, siempre estaremos juntos apoyándonos en cada paso de nuestra vida, los quiero.

A mi sobrina:

Yaretzi Arriaga Ramirez

Gracias por toda la alegría que has dado a mi vida, te quiero mucho ahijada.

Gracias a toda mi familia y amigos que me han apoyado y han estado en todo momento a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de Tesis, Dr. Edmundo del Valle Gallegos y Dr. Armando Miguel Gómez Torres, por la dirección de este trabajo, por su apoyo, por la gran paciencia que me mostraron, el interés y compromiso para el desarrollo de este trabajo, el cual no se habría logrado sin su acertada y valiosa guía.

A las miembros del Jurado conformado por el Dr. Arturo F. Méndez Sánchez, Dr. Jesús García Ravelo, M. en C. Carlos Filio, Dr. Edmundo del Valle Gallegos y Dr. Armando Miguel Gómez Torres, por su amable disposición en la revisión de esta tesis, por sus apreciados consejos y comentarios que ayudaron a una mejor escritura de la tesis.

Al personal de la SEPI, por el apoyo y atención que me brindaron en la realización de los trámites correspondientes.

A mis profesores de la Línea de Investigación de Ingeniería Nuclear de la Maestría en Ciencias Fisicomatemáticas, por compartirme sus conocimientos y experiencias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

Al Fondo Sectorial de Sustentabilidad Energética SENER–CONACYT por el apoyo recibido del proyecto estratégico No. 212602 (AZTLAN Platform).

A todos Uds., gracias.

MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE UN REACTOR AVANZADO USANDO SERPENT Y AZNHEX

ÍNDICE

	<i>Pág.</i>
Lista de figuras	<i>iii</i>
Lista de tablas	<i>vi</i>
Resumen	<i>ix</i>
Abstract	<i>xi</i>
Introducción	<i>xiii</i>
Capítulo 1. Reactores rápidos	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción de los núcleos del SFR	10
1.3 Descripción del núcleo de carburo	11
1.3.1 Descripción de ensamble combustible	12
1.3.2 Descripción de los ensambles de control primario y secundario	14
1.3.3 Descripción de los materiales	17
1.4 Descripción del núcleo de óxido	19
1.4.1 Descripción del ensamble combustible	20
1.4.2 Descripción de los ensambles de control primario y secundario	22
1.4.3 Descripción de los materiales	25
1.5 Descripción del núcleo metálico	28
1.5.1 Descripción del ensamble combustible	29
1.5.2 Descripción del ensamble blindaje	30
1.5.3 Descripción del ensamble de control	32
1.5.4 Descripción del ensamble reflector	33
1.5.5 Descripción de los materiales	35
1.6 Descripción del núcleo de óxido pequeño	38
1.6.1 Descripción del ensamble combustible	39
1.6.2 Descripción del ensamble blindaje	40
1.6.3 Descripción del ensamble de control	42

1.6.4 Descripción del ensamble reflector	43
1.6.5 Descripción de los materiales	45
Capítulo 2. SERPENT	49
2.1 Método de Monte Carlo	50
2.2 Descripción del código SERPENT	51
2.3 Archivo de entrada	51
2.3.1 Descripción del elemento pin	51
2.3.2 Descripción del elemento lattice	52
2.3.3 Descripción de la geometría	54
2.3.4 Descripción de los materiales	54
2.3.5 Visualización usando plot y mesh	55
2.3.6 Biblioteca de secciones eficaces (XS)	56
Capítulo 3. Descripción de los archivos de entrada usando SERPENT	57
3.1 Archivos de entrada para 2D	58
3.2 Archivos de entrada para 3D	63
Capítulo 4. Generación de secciones eficaces (XS) con el código SERPENT	70
4.1 Secciones eficaces (XS) en 3D	71
4.2 Secciones eficaces (XS) en 2D	80
Capítulo 5. Modelación 3D de un VVER-440 y de un SFR con el código AZNHEX	91
5.1 AZNHEX	92
5.2 Descripción de los datos de entrada	92
5.3 Descripción del archivo de entrada para el código AZNHEX	93
Capítulo 6. Discusión de resultados	112
Capítulo 7. Conclusiones	118
Capítulo 8. Recomendaciones y trabajos futuros	121
Referencias	123
Apéndices	125
Apéndice A. Archivo de entrada de los núcleos en 3D con el código SERPENT	126
Apéndice B. Archivo de entrada de los núcleos en 2D con el código SERPENT	165
Apéndice C. Archivos de entrada del código AZNHEX	168

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Leyenda</i>	<i>Pág.</i>
1.1	Generaciones de reactores nucleares	3
1.2	Esquema de un VHTR	4
1.3	Esquema de un SCWR	5
1.4	Esquema de un MSR	6
1.5	Esquema de un GFR	7
1.6	Esquema de un LFR	8
1.7.a	Arreglo de un SFR tipo alberca	9
1.7.b	Arreglo de un SFR tipo lazo	9
1.8	Diseño de un SFR	10
1.9	Vista superior del núcleo de carburo	11
1.10	Descripción axial y radial del ensamble combustible del núcleo de carburo	13
1.11	Descripción del ensamble control (sistema primario) del núcleo de carburo.	15
1.12	Descripción del ensamble control (sistema secundario) del núcleo de carburo.	16
1.13	Vista superior del núcleo de óxido	20
1.14	Descripción axial y radial del ensamble combustible del núcleo de óxido	22
1.15	Descripción del ensamble control (sistema primario) del núcleo de óxido	23
1.16	Descripción del ensamble control (sistema secundario) del núcleo de óxido	24
1.17	Vista superior del núcleo metálico	28
1.18	Vista axial y radial del ensamble combustible del núcleo metálico	30
1.19	Vista axial y radial del ensamble blindaje del núcleo metálico	31
1.20	Vista axial y radial del ensamble control del núcleo metálico	33
1.21	Vista axial y radial del ensamble reflector del núcleo metálico	34
1.22	Vista del núcleo de óxido pequeño	38
1.23	Vista axial y radial del ensamble combustible del núcleo de óxido pequeño	40
1.24	Vista axial y radial del ensamble blindaje del núcleo de óxido pequeño	41

1.25	Vista axial y radial del ensamble control del núcleo de óxido pequeño	43
1.26	Vista axial y radial del ensamble reflector del núcleo de óxido pequeño	44
2.1	Visualización del núcleo usando la instrucción plot	55
2.2	Visualización del núcleo usando la instrucción mesh	56
3.1	Segmento del ensamble combustible del núcleo metálico	61
3.2	Segmento del ensamble control del núcleo metálico	62
3.3.a	Vista axial del núcleo completo del SFR con las barras de control afuera	69
3.3.b	Vista radial, se observa los diferentes ensambles, así como el núcleo interno (verde) y el externo (café)	69
3.3.c	Vista radial donde se distinguen los dos sistemas de control	69
4.1	Vista de los ensambles de los núcleos del reactor SFR	71
4.2.a	Vista de un segmento combustible del núcleo interno para los núcleos de carburo y óxido	80
4.2.b	Vista de un segmento combustible del núcleo externo para los núcleos de carburo y óxido	80
4.3	Vista de materiales no combustibles rodeados con materiales combustibles	81
4.4	Vista de materiales combustibles del núcleo metálico y núcleo de óxido pequeño	81
4.5	Vista de materiales no combustibles rodeados con materiales combustibles del núcleo metálico y del núcleo de óxido pequeño	82
5.1	Configuración del benchmark VVER-440	93
5.2	Paso de tiempo de 0.02 seg.	96
5.3	Paso de tiempo de 0.01 seg.	96
5.4	Paso de tiempo de 0.005 seg.	97
5.5	Paso de tiempo de 0.001 seg.	97
5.6	Núcleos completos del tipo SFR	99
5.7	Vista de los diferentes ensambles del núcleo metálico	100
5.8	Vista radial del núcleo completo del metálico	101
5.9	Vista de los ensambles del núcleo metálico del SFR	102
5.10	Transitorios del núcleo de carburo utilizando XS en 3D	106
5.11	Transitorios del núcleo de óxido utilizando XS en 3D	107

5.12	Transitorio del núcleo metálico utilizando XS en 3D	<i>107</i>
5.13	Transitorio del núcleo de óxido pequeño utilizando XS en 3D	<i>108</i>
5.14	Transitorios del núcleo de carburo utilizando XS en 2D	<i>109</i>
5.15	Transitorios del núcleo de óxido utilizando XS en 2D	<i>109</i>
5.16	Transitorio del núcleo metálico utilizando XS en 2D	<i>110</i>
5.17	Transitorio del núcleo de óxido pequeño utilizando XS en 2D	<i>110</i>
6.1	(a) Sistemas de control primario y secundario extraídos en su totalidad (ARO), (b) sistemas de control primario insertado en su totalidad y sistema secundario extraído en su totalidad (ARIp) y (c) sistemas de control primario y secundario en su totalidad insertados (ARIps) y en (d) vista axial del núcleo de Óxido.	<i>114</i>
6.2	Segmento de los ensambles (a) combustible, (b) reflector, (c) blindaje y (d) control del núcleo de Óxido pequeño	<i>115</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla</i>	<i>Leyenda</i>	<i>Pág.</i>
1.1	Parámetros del ensamble combustible del núcleo de carburo	12
1.2	Porcentaje en volumen del ensamble combustible del núcleo de carburo	13
1.3	Parámetros de las barras de control primario del núcleo de carburo	14
1.4	Parámetros de las barras de control secundario del núcleo de carburo	15
1.5	Porcentaje de volumen del ensamble control primario y secundario del núcleo de carburo	16
1.6	Densidades del núcleo interno de la parte activa por segmentos	17
1.7	Densidades del núcleo externo de la parte activa por segmentos	18
1.8	Densidad del material de la estructura y el refrigerante	19
1.9	Densidad del material absorbedor	19
1.10	Parámetros del ensamble combustible del núcleo de óxido	21
1.11	Porcentaje de volumen del ensamble combustible del núcleo de óxido	22
1.12	Parámetros de la barra de control primario del núcleo de óxido	23
1.13	Parámetros de la barra de control secundario del núcleo de óxido	24
1.14	Densidades del núcleo interno de la parte activa por segmentos del núcleo de óxido	26
1.15	Densidades del núcleo externo de la parte activa por segmentos del núcleo de óxido	27
1.16	Parámetros del ensamble combustible del núcleo metálico	29
1.17	Parámetros del ensamble blindaje del núcleo metálico	31
1.18	Parámetros del ensamble de control del núcleo metálico	32
1.19	Parámetros del ensamble reflector del núcleo metálico	34
1.20	Materiales de la estructura y el refrigerante	35
1.21	Densidades del ensamble de combustible para el núcleo interno del núcleo metálico	36

1.22	Densidades del ensamble combustible para el núcleo externo del núcleo metálico	37
1.23	Parámetros del ensamble combustible del núcleo de óxido pequeño	39
1.24	Parámetros del ensamble blindaje del núcleo de óxido pequeño	41
1.25	Parámetros del ensamble de control del núcleo de óxido pequeño	42
1.26	Parámetros del ensamble reflector del núcleo de óxido pequeño	44
1.27	Porcentaje de volumen del núcleo de óxido pequeño	45
1.28	Densidad del ensamble combustible para el núcleo interno del núcleo de óxido pequeño	46
1.29	Densidad del ensamble combustible para el núcleo medio del núcleo de óxido pequeño	47
1.30	Densidad del ensamble combustible para el núcleo externo del núcleo de óxido pequeño	48
4.1	Secciones eficaces en 3D del núcleo carburo (barras de control afuera)	72
4.2	Secciones eficaces en 3D del núcleo carburo (barras de control adentro)	73
4.3	Secciones eficaces en 3D del núcleo óxido (barras de control afuera)	74
4.4	Secciones eficaces en 3D del núcleo óxido (barras de control adentro)	75
4.5	Secciones eficaces en 3D del núcleo metálico (barras de control afuera)	76
4.6	Secciones eficaces en 3D del núcleo metálico (barras de control adentro)	77
4.7	Secciones eficaces en 3D del núcleo de óxido pequeño (barras de control afuera)	78
4.8	Secciones eficaces en 3D del núcleo de óxido pequeño (barras de control adentro)	79
4.9	Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos con todos los ensambles de control afuera (ARO), con los ensambles de control primario adentro (ARI _p) y	80

con los ensambles primarios y secundarios adentro (ARI_{ps})
de los cuatro núcleos del SFR

4.10	Secciones eficaces en 2D de los materiales del núcleo metálico	83
4.11	Parámetros cinéticos para el núcleo de carburo con barras de control afuera	88
4.12	Parámetros cinéticos para el núcleo de carburo con barras de control adentro	88
4.13	Parámetros cinéticos para el núcleo de óxido con barras de control afuera	89
4.14	Parámetros cinéticos para el núcleo de óxido con barras de control adentro	89
4.15	Parámetros cinéticos para el núcleo metálico con barras de control afuera	89
4.16	Parámetros cinéticos para el núcleo metálico con barras de control adentro	89
4.17	Parámetros cinéticos para el núcleo de óxido pequeño con barras de control afuera	90
4.18	Parámetros cinéticos para el núcleo de óxido pequeño con barras de control adentro	90
5.1	Parámetros neutrónicos para el problema benchmark VVER-440	94
5.2	Parámetros cinéticos para el problema benchmark VVER-440	95
5.3	k_{eff} obtenida en el caso estacionario	95
5.4	Valores de la potencia máxima y la potencia al final del transitorio	98
5.5	Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos, obtenidas con AZNHEX(2D-XS) y AZNHEX(3D-XS)	103
5.6	Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos usando el modelo 3D en SERPENT y AZNHEX(3D-XS)	103
5.7	Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos usando el modelo 3D en SERPENT y AZNHEX(2D-XS)	104
5.8	Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos con AZNHEX(3D-XS) y AZNHEX(2D-XS)	105
5.9	Valores de la potencia normalizada máxima y al final del transitorio	108
5.10	Valores de la potencia normalizada máxima y al final del transitorio	110

RESUMEN

Este trabajo presenta la modelación y análisis, estático y transitorio, del núcleo de un Reactor Rápido enfriado por Sodio (SFR: Sodium-Cooled Fast Reactor) que actualmente está en desarrollo a nivel internacional. Se comparan dos metodologías para la generación de secciones eficaces con el código tipo Monte Carlo SERPENT y se analiza su impacto en cálculos de difusión llevados a cabo con el código AZNHEX que forma parte de la plataforma AZTLAN.

Se modelaron cuatro núcleos diferentes de diseño tipo SFR, dos de ellos son grandes con una potencia de 3600MW_t y los otros dos son pequeños con una potencia de 1000MW_t, el trabajo se realizó en dos partes, utilizando los dos códigos mencionados con anterioridad. En la primera parte del trabajo se obtuvieron las secciones eficaces (XS) para cada una de las distintas regiones, consideradas homogéneas que componen cada núcleo, para ello se utilizó el código SERPENT que es una herramienta de fuente abierta. Para la generación de las secciones eficaces se siguieron dos estrategias: primeramente, se desarrollaron modelos en 3D en SERPENT de cada uno de los núcleos con todas las barras de control insertadas (ARI) y extraídas (ARO), en este caso SERPENT produce secciones eficaces promediadas axialmente para cada ensamble diferente. La segunda estrategia tiene que ver con la generación de secciones eficaces usando los modelos 2D correspondientes a cada una de las celdas, tanto con combustible como sin él, generándose tantos archivos de entrada como ensambles diferentes había en cada núcleo. Esta estrategia es la que tradicionalmente se usa en los códigos de celda determinísticos.

Como un primer paso para verificar la correcta implementación del algoritmo numérico en AZNHEX, se realizó la simulación estática y transitoria de un problema simplificado en 2D con secciones eficaces dadas para un reactor VVER-440 (Reactor a Presión Ruso, Vadà Vadà Energetische Reaktor). La parte transitoria considera que dos ensambles de control se extraen completamente en un segundo, al término del cual en el siguiente segundo se regresan a su posición inicial para mantenerse en ésta por un último segundo más, un transitorio que dura tres segundos en total. Se realizó un análisis de sensibilidad en la malla y en el paso de tiempo, para verificar que el algoritmo numérico converge a medida que la malla se refina y que el paso de tiempo disminuye, obteniéndose resultados esperados.

Una vez comprobado que el código AZNHEX trabajaba adecuadamente en estado estacionario y transitorio, con las secciones eficaces obtenidas con SERPENT para los núcleos SFR, se generaron varios archivos de entrada para realizar simulaciones en estado estacionario usando el código AZNHEX. Los resultados de los casos estacionarios para los cuatro núcleos considerados difieren respecto de los obtenidos con SERPENT, en el factor de multiplicación efectivo a lo más en 3.3% en el caso en que se usaron las secciones eficaces generadas en 2 dimensiones y en 4.5% en el caso en que se usaron las secciones eficaces en 3D.

Posteriormente, para comprobar que el código AZNHEX se comportaba bien en problemas dependientes del tiempo se simularon transitorios análogos al descrito para el reactor

VVER-440. Estas simulaciones se realizaron para el caso en que se extraen los ensambles de control primarios (ARIp), y el caso en que se extraen además los secundarios (ARIps).

Los resultados obtenidos indican que tanto el estado estacionario como el transitorio simulado con AZNHEX tienen un mejor comportamiento (es más cercano a la referencia calculada con SERPENT para el caso estacionario) cuando se usan las secciones eficaces generadas con los modelos 2D. Algunos resultados adicionales interesantes se presentan en la discusión, como por ejemplo, la confirmación de que la perturbación de los elementos de control secundarios conducen a transitorios más severos sobre todo en los núcleos pequeños donde la perturbación local se propaga mucho más rápido y por consiguiente el pico de potencia es mayor.

ABSTRACT

This work presents the static and transient modeling and analysis of a Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) core, currently under international development. Two methodologies related to Cross Section generation using the Monte Carlo code SERPENT are compared and their impact in a diffusion calculation using the AZNHEX code, that it is part of the AZTLAN platform, are analyzed.

Four different cores of SFR design were modeled; two of them are large with a thermal power of 3600 MWt and the other two are small with a power of 1000 MWt. This work was conducted in two parts using the two codes previously mentioned. In the first part cross sections (XS) were obtained for each one of the regions, considering each region homogeneous, using the SERPENT code which is an open source tool. For the cross section generation, two strategies were followed: first of all, 3D models in SERPENT were developed for each one of the cores considering all rods in (ARI) and all rods out (ARO). In this case, SERPENT produces cross sections axial-averaged for each different assembly. The second strategy is related to the cross sections generation using 2D models for each cell or assembly of interest, with or without fuel. There were generated as many input files as different assemblies had each core. This strategy is the one commonly used in the deterministic lattice codes.

As a first step in order to verify the correct implementation of the numerical algorithm in AZNHEX, a steady state and time dependent simulation was done of a simplified problem in 2D with given cross sections corresponding to a VVER-440 (Russian Pressurized, Vadá Vadá Energetische Reaktor) reactor in which two control assemblies are completely removed in one second, then on the next second they are returned to their initial position to keep them finally for a last second, a transient that lasts three seconds in total. A sensitivity analysis in mesh and time step was performed in order to verify that the numerical algorithm converges as soon as the mesh is refined and the time step is reduced, expected results were obtained.

Once it was tested that the AZNHEX code works appropriately in steady state and transient conditions, with the cross sections obtained with SERPENT for the SFR's cores, multiple input files were generated to execute simulations in steady state using the code AZNHEX. The results of the steady state cases for the four cores considered differ from the ones of SERPENT, in the effective multiplication factor up to 3.3% in the cases in which the cross sections were generated in two dimensions and up to 4.5% in the case in which the three dimensional cross sections were used.

Subsequently, to verify that the code AZNHEX also behaves well for time dependent problems, transients similar to those described for the VVER-440 reactor were simulated. These simulations were carried out in the event that the primary control assemblies are extracted (ARIp), and the case where the secondary control assemblies are extracted too (ARIps).

The results obtained show that the steady state calculations as well as the transient ones simulated with AZNHEX presented a better behaviour (closer to the reference calculated with SERPENT for the steady state) when the cross sections were generated with the 2D methodology. Some additional interesting results are presented in the discussion, for example, the confirmation that the perturbation of the secondary control elements leads to a more severe transient especially in the small cores where the local perturbation propagates faster and thus the power peak is greater.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se están estudiando desde un punto de vista neutrónico los reactores avanzados de IV generación, de los cuales algunos son reactores rápidos. Para esto es necesario conocer las diferentes propiedades de los materiales que los constituyen.

Los reactores avanzados de IV generación son los siguientes:

- Reactor de muy Alta Temperatura (Very High Temperature Reactor, VHTR)
- Reactor enfriado por Agua Supercrítica (Supercritical Water Cooled Reactor, SCWR)
- Reactor de Sal Fundida (Molten Salt Reactor, MSR)
- Reactor Rápido Enfriado por Gas (Gas Cooled Fast Reactor, GFR)
- Reactor Rápido Enfriado por Sodio (Sodium Cooled Fast Reactor, SFR)
- Reactor Enfriado por Plomo (Lead Cooled Fast Reactor, LFR)

Los reactores rápidos trabajan a temperaturas altas, una de las principales ventajas que tienen se ve reflejada en que son reactores de cría, es decir, pueden producir su propio combustible, lo cual su producción de combustible, reduce el costo de su ciclo, también una de las ventajas es la disminución de los desechos ya que son reusados y/o transmutados para obtener el mayor provecho de estos.

En el desarrollo de este trabajo se va considerar un reactor con geometría de corte transversal hexagonal, se consideró el reactor SFR para el análisis de un transitorio en dicho reactor, para lo cual se utilizaron dos códigos, uno es el código SERPENT, el cual se utilizó para la obtención de las secciones eficaces (XS) y el código AZNHEX que fue utilizado para la modelación 3D del núcleo, para la simulación del transitorio.

El presente trabajo está estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1. Se presenta una descripción sobre los reactores rápidos, la descripción de cuatro núcleos tipo SFR. La descripción de las barras combustible, barras reflector, barras control, barras blindaje, así como la descripción de la composición de los materiales.

Capítulo 2. Se describe el código SERPENT y el método de Monte Carlo ya que éste fue utilizado para la realización del código antes mencionado.

Capítulo 3. Se describen los archivos de entrada utilizando el código SERPENT para 2 y 3 dimensiones respectivamente para la realización de los 4 núcleos diferentes que se utilizan.

Capítulo 4. Se explica cómo se obtienen las secciones eficaces en 2 y 3 dimensiones con el código SERPENT respectivamente para los diferentes núcleos estudiados en esta tesis.

Capítulo 5. Se explica el código AZNHEX, así como el archivo de entrada de AZNHEX para la modelación de los 4 diferentes núcleos en 3-dimensiones y la modelación de un transitorio.

Capítulo 6. Se discuten los resultados del transitorio de potencia para el VVER-440 y para los 4 diferentes núcleos del tipo SFR.

Capítulo 7. Se presentan las conclusiones de los resultados

Adicionalmente, este trabajo presenta cinco apéndices; los dos primeros muestran los archivos de entrada en SERPENT, en el que se muestra en 3D (Apéndice A) y por otro lado, en 2D (Apéndice B) y los dos últimos muestran los archivos de código AZNHEX, lo de entrada (Apéndice C) y los de salida (Apéndice D).

CAPÍTULO 1

REACTORES RÁPIDOS

En este capítulo se describen brevemente los reactores rápidos que se encuentran en investigación y sus características principales. Se describirán además, los 4 núcleos diferentes del tipo SFR (Sodium Fast Reactor), los cuales se ocuparán para el desarrollo del trabajo, dos de los núcleos son grandes con una potencia de 3600 MWt y dos núcleos pequeños con una potencia de 1000 MWt, se describirán las características de los ensambles combustible, ensambles reflector, ensambles blindaje y ensambles de control respectivamente para cada núcleo.

1.1 Introducción

En la actualidad el Foro internacional de Reactores de cuarta Generación (Generation IV International Forum [1]) está estudiando seis tecnologías de reactores rápidos, (ver Figura 1.1). Esta nueva generación de reactores presenta mejores características de seguridad, ventajas económicas para la producción de electricidad mediante ciclos cerrados de combustible y producción de hidrógeno, así como una mejora en la reducción de los desechos nucleares.

La importancia de estudiar estos reactores rápidos es que permiten una gran flexibilidad en la elección de las estrategias de implementación de la energía nuclear, tal flexibilidad se puede utilizar para diseñar evolutivos núcleos de los reactores rápidos según el objetivo, también permite utilizar diferentes formas de combustible, como es el actínido mayor (Pu),

Los reactores rápidos deben ser construidos dentro de las estrategias del ciclo cerrado, con el fin de maximizar los beneficios con respecto a la sustentabilidad y la minimización de los residuos. Es importante evaluar la viabilidad y la economía de una estrategia específica para el ciclo de combustible como son:

- Reprocesamiento de combustible.
- La acumulación de actínidos, puede ser una pesada carga en el manejo de combustible, la fabricación de combustible, etc., con un impacto potencial sobre la disponibilidad del reactor y optimización del ciclo cerrado de combustible, el cual nos permite reprocesar el combustible y volver a utilizarlo.
- Sistemas de sales fundidas con el espectro de neutrones rápidos y el procesamiento de combustible en línea u otros conceptos de combustible móvil.

Evolución de los reactores nucleares

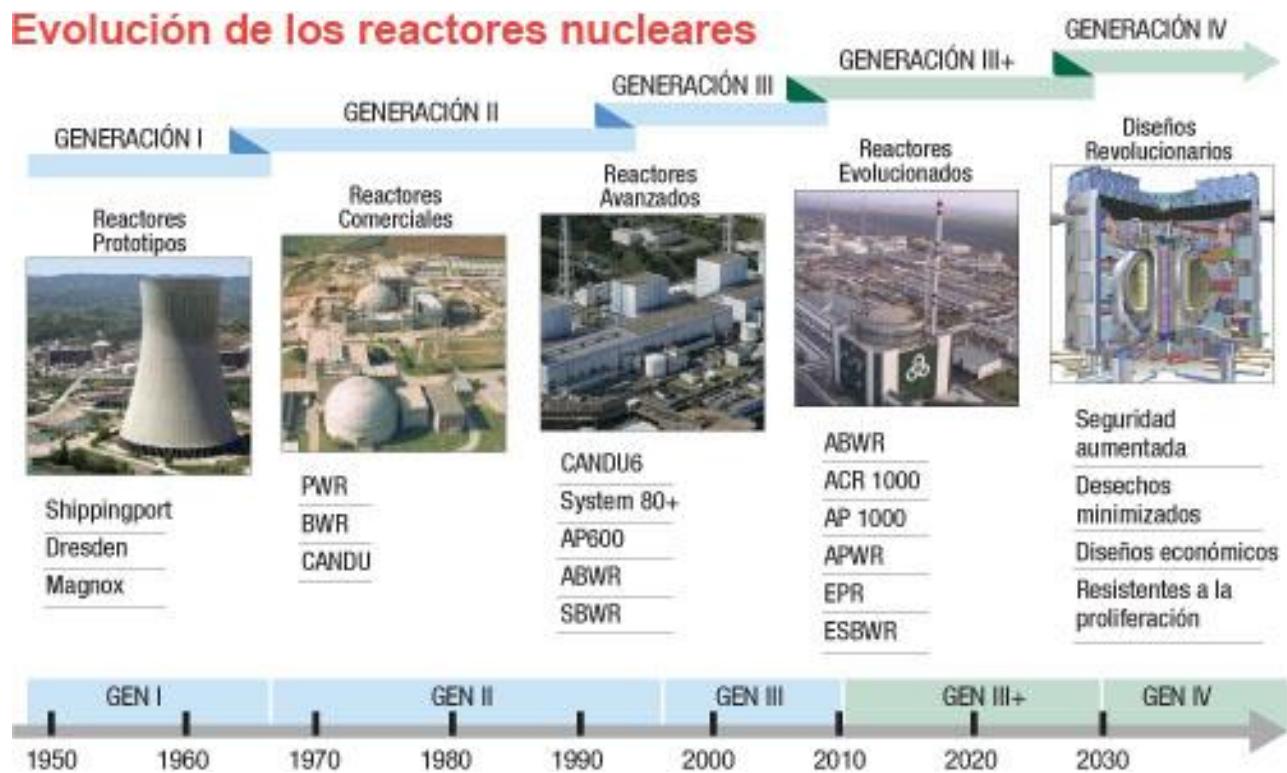


Figura 1.1 Generaciones de reactores nucleares

A continuación se da una breve descripción de cada uno de los seis reactores nucleares que forman parte de la generación IV y que actualmente se encuentran en investigación.

VHTR (Very High Temperature Reactor)

El VHTR es un reactor moderado por grafito y enfriado con helio, su ciclo es abierto. El calor que produce este reactor se puede usar para la producción de hidrógeno o para el proceso de calor. Su núcleo puede ser de bloques prismáticos o de esferas. La temperatura máxima de salida considerada para este reactor es de 1000 °C. El VHTR tiene sistemas de seguridad pasivos, alta eficiencia térmica, bajo costo de operación y mantenimiento, en la Figura 1.2 se ilustra una planta con un reactor de este tipo.

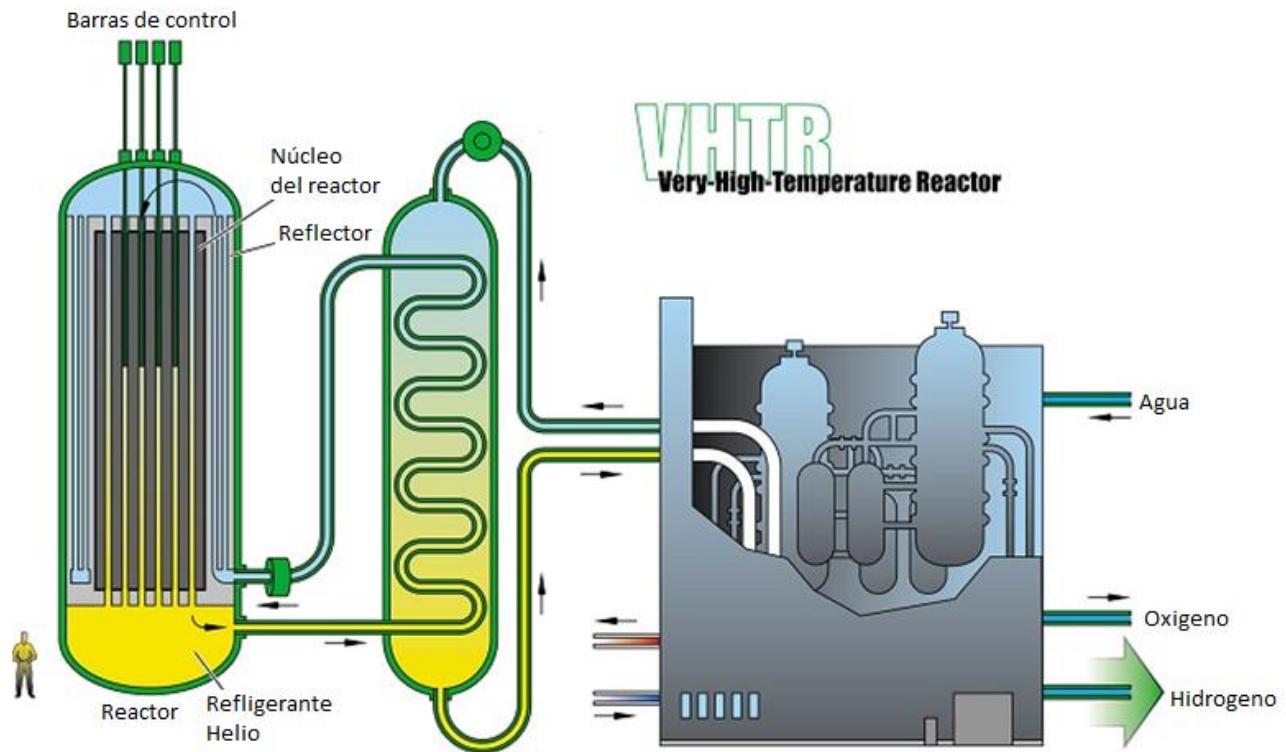


Figura 1.2 Esquema de un VHTR [1]

✚ SCWR (Supercritical Water Cooled Reactor)

El SCWR es enfriado por agua a temperaturas muy altas, que operan arriba del punto termodinámico del agua para proporcionar una eficiencia de hasta 45%. Para el diseño de este reactor se contemplan dos opciones: vasija presurizada o tubos presurizados. El agua supercrítica se suministra directamente a la turbina de vapor y el agua de alimentación del ciclo de vapor se suministra de nuevo al núcleo, permitiendo que no tenga sistemas secundarios de vapor y la simplificación de la planta (ver Figura 1.3). El combustible que utiliza es óxido de uranio enriquecido.

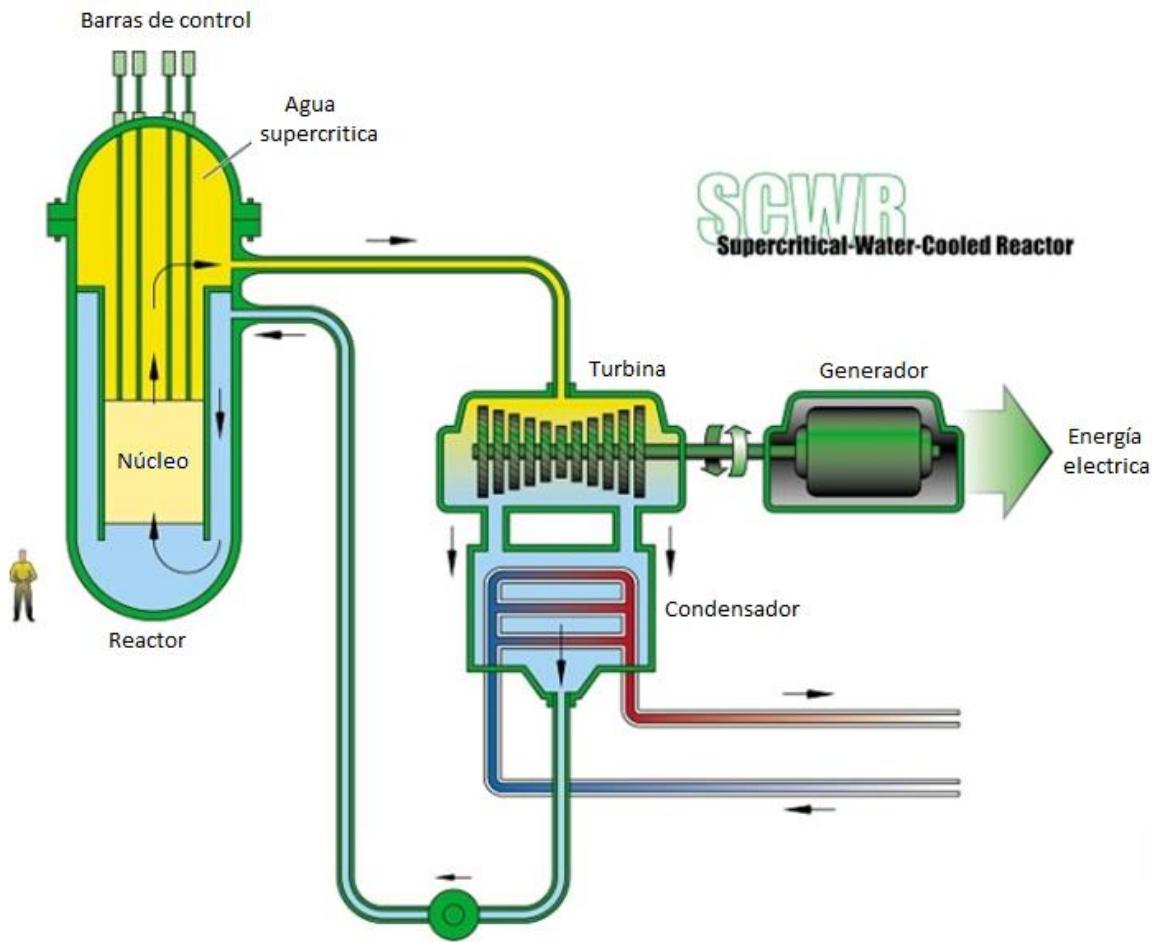


Figura 1.3 Esquema de un SCWR [1]

✚ MSR (Molten Salt Reactor)

El MSR se puede llegar a utilizar para la producción de energía eléctrica, quemado de actínidos y producción de hidrógeno. Su objetivo principal es la producción de electricidad y quemado de desechos. Se distingue porque el combustible se disuelve en sal de fluoruro líquido a muy altas temperaturas (aproximada a 700 °C). El diseño original de este reactor tiene un núcleo de grafito que resulta en un espectro de neutrones térmicos.

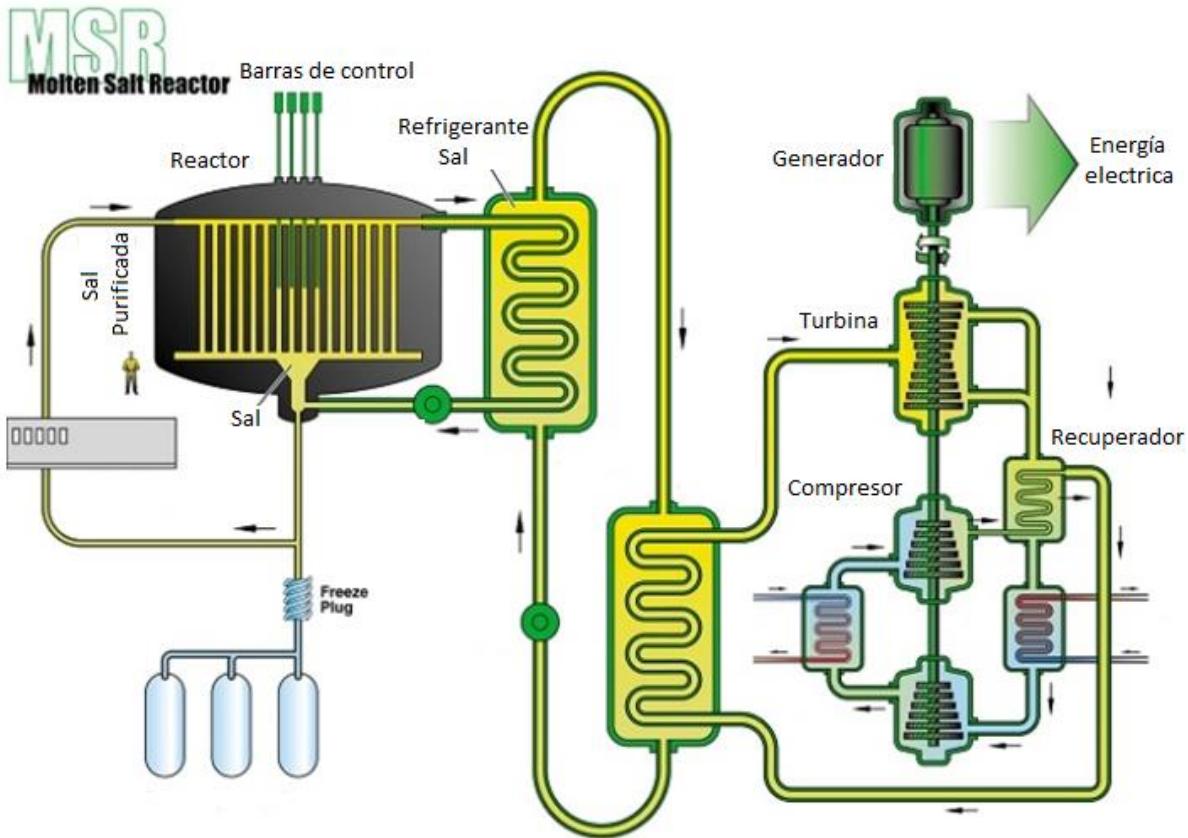


Figura 1.4 Esquema de un MSR [1]

✚ GFR (Gas cooled Fast Reactor)

El GFR es un reactor rápido que es enfriado por helio, alcanza temperaturas de hasta 850 °C con un ciclo de combustible cerrado. Su tecnología será parecida a la del VHTR por lo que permitirá que genere electricidad y producción de hidrógeno, así como también disminuirán los desechos radiactivos, también se utilizarán los mismos procesos de reciclado del combustible como en el SFR. Por lo tanto el enfoque para el diseño de este reactor se basa en la tecnología del VHTR lo que significa que no se espera un prototipo de este reactor sino hasta después del 2025. El diseño de este reactor se puede observar en la Figura 1.5.

El núcleo consiste de un conjunto de elementos combustibles hexagonales, el cual se encuentra dentro de un recipiente de presión de acero, rodeado de los principales intercambiadores de calor. El conjunto del circuito primario está contenido dentro de un límite secundario.

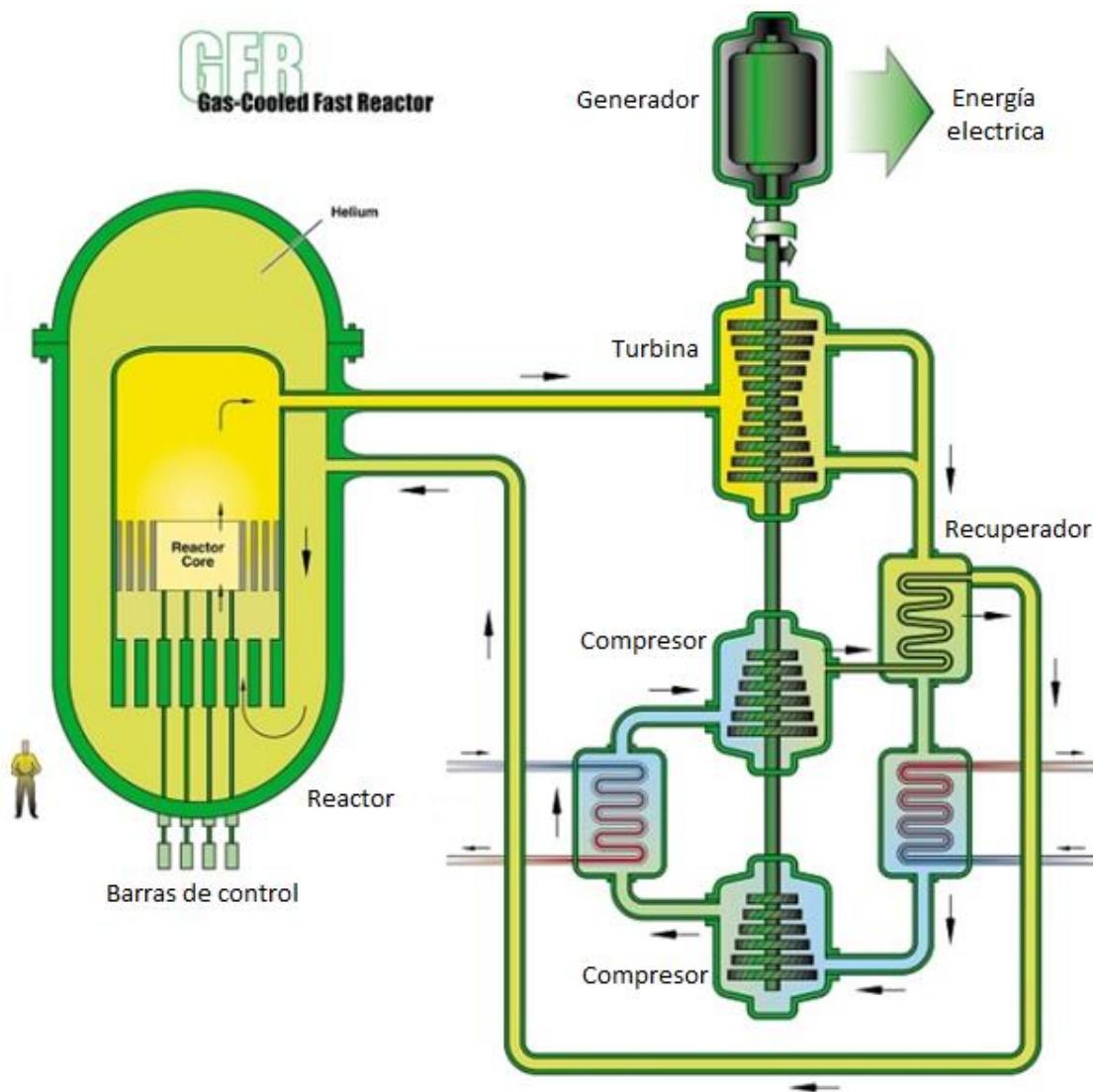


Figura 1.5 Esquema de un GFR [1]

LFR (Lead cooled Fast Reactor)

El LFR opera en el espectro de neutrones rápidos y utiliza un ciclo de combustible cerrado, puede utilizar uranio empobrecido o matrices de torio, también se puede utilizar para quemar actínidos de plantas de reprocesamiento de combustible gastado. Se espera que opere a una temperatura de 800 °C con el uso de materiales avanzados que sean capaces de soportar la corrosión a temperaturas muy altas y que permita la producción de hidrógeno. Utilizará plomo fundido como refrigerante, en la Figura 1.6 se ilustra un reactor de este tipo.

El LFR está enfocado en dos modelos: SSTAR (Small Secure Transportable Autonomous Reactor) de 20 MWe y el ELSY (European Lead-Cooled System) de 600 MWe.

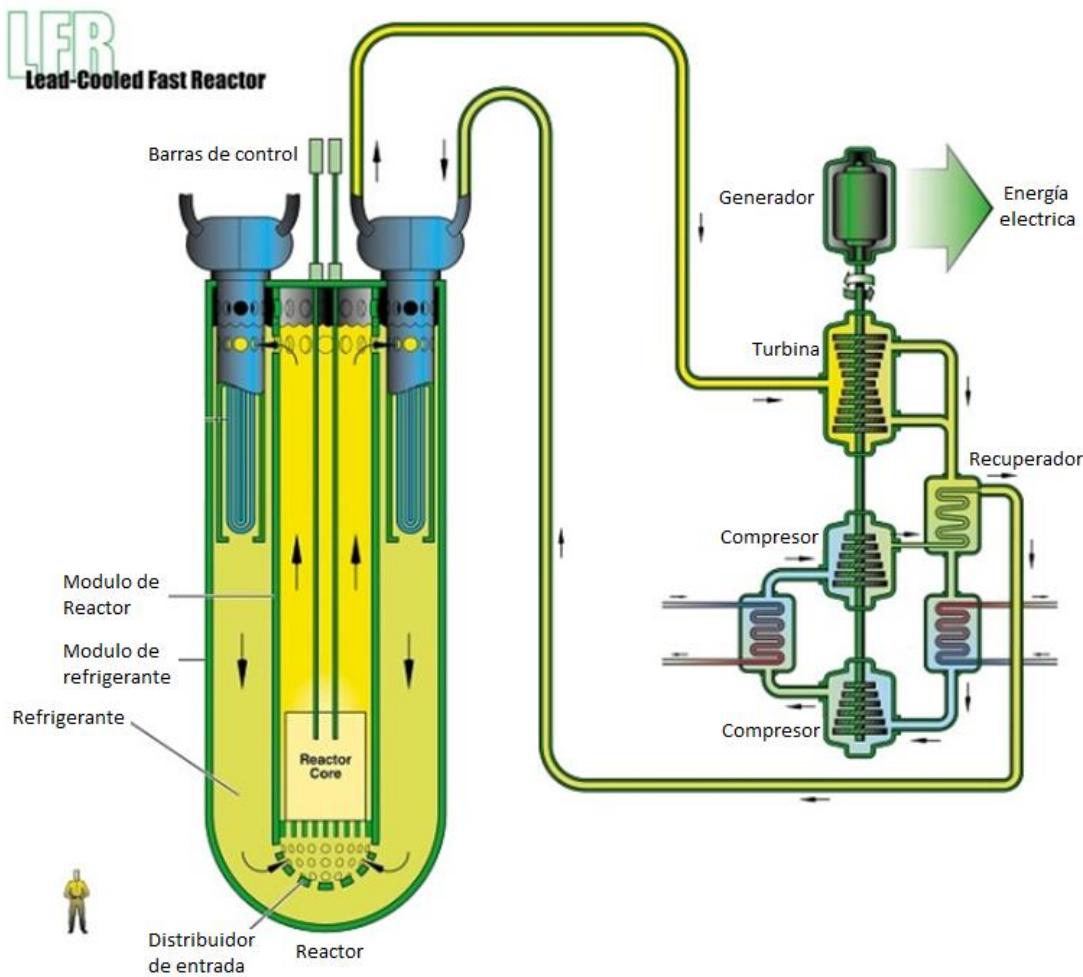


Figura 1.6 Esquema de un LFR

✚ SFR (Sodium cooled Fast Reactor)

El SFR tiene un espectro rápido y utiliza el sodio líquido como refrigerante, su sistema es un ciclo cerrado para el manejo eficiente de los actínidos y la conversión del uranio fértil.

Hay varias opciones de tamaño: pequeños, desde sistemas moduladores de 50 hasta 300 MWe, sin embargo pueden llegar a haber reactores más grandes de hasta 1500 MWe. La temperatura de salida es de 500 a 550 °C.

El SFR puede tener dos arreglos: uno de los arreglos es que todos los sistemas primarios se encuentren dentro de la vasija del reactor y el otro donde todos los sistemas están fuera (ver Figura 1.7)

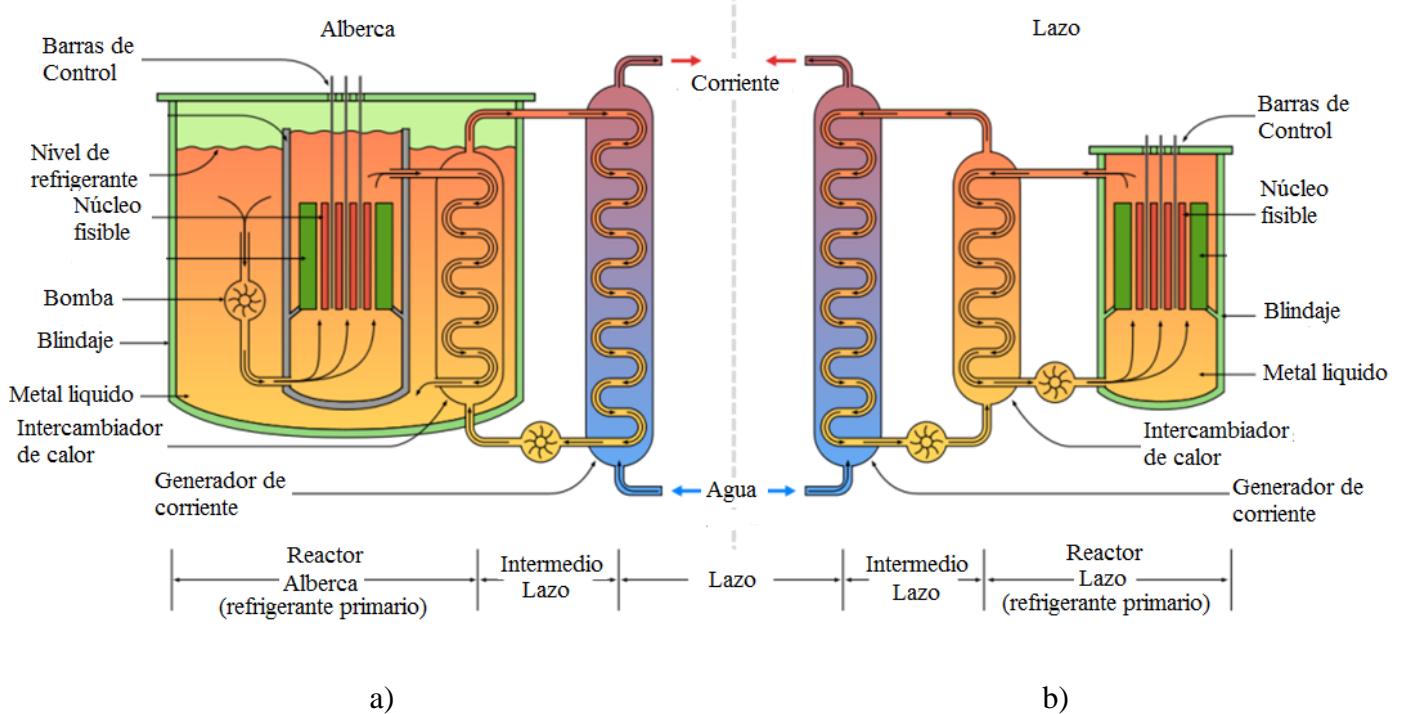


Figura 1.7 Arreglos de un SFR: (a) tipo alberca y (b) tipo lazo

Las opciones para el combustible de este reactor son: MOX o una aleación metálica de uranio, plutonio y zirconio, tiene un sistema primario que opera cerca de la presión atmosférica, y un sistema de sodio intermedio, entre el sodio radiactivo en el sistema primario y el sistema de conversión de energía.

Tiene como innovación el reducir el costo de capital, el SFR está proyectado a ser económicamente competitivo en el futuro. Es uno de los reactores rápidos que más se está considerando e investigando en la actualidad. En la Figura 1.8 se puede observar un esquema del SFR.

El reactor SFR puede estar dispuesto en un diseño de piscina o un diseño de lazo compacto. Se consideran tres opciones:

- Un tamaño grande (600 a 1500 MWe) reactor de tipo lazo con combustible de óxido de uranio, plutonio mezclado y actínidos potencialmente menores
- Un tamaño mediano a grande (300 a 1500 MWe) reactor de tipo piscina, con combustible de óxido o metálico.
- Un tamaño pequeño (50 a 150 MWe) reactor de tipo modular con combustible de aleación de metal de uranio, plutonio, actínidos menores y zirconio.

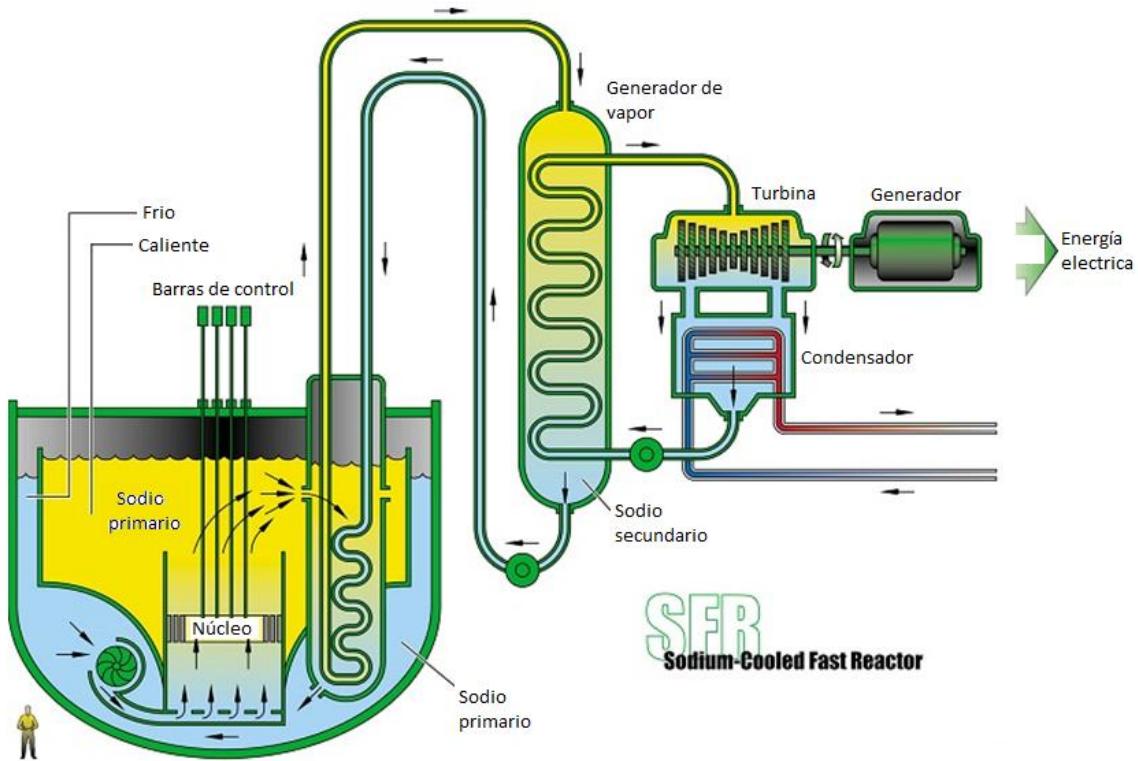


Figura 1.8 Diseño de un SFR [1]

1.2 Descripción de los núcleos del SFR

Se realizaron cálculos para 4 núcleos diferentes de un reactor tipo SFR. Dos núcleos grandes con una potencia térmica cada uno de 3,600 MW y dos pequeños de 1,000 MW. La información que se utilizó para el modelado se obtuvo de [2] donde se definen las dimensiones que tiene cada núcleo, la composición de los materiales que se utilizan para cada zona del núcleo, la temperatura que ocupa cada zona del núcleo.

Los núcleos y los ensambles tienen forma de un prisma hexagonal, dentro de los ensambles hay tubos. Hay 4 tipos diferentes de ensambles: ensambles combustible que contienen combustible así como otros materiales, ensambles de control y ensambles absorbedores que contienen materiales de absorción, la diferencia entre ellos es que los ensambles de control contienen una parte móvil que puede ser insertada o retirada del núcleo y por último el ensamblaje reflector que contiene acero.

Los núcleos de potencia de 3,600 MWt son: Carburo y Óxido los cuales son muy similares tanto en su geometría como en su composición. Los núcleos de potencia de 1,000 MWt son: Metálico y Óxido pequeño, estos núcleos son conceptos del diseño para un ABR (Advanced Burner Reactors) [3], por lo cual la mayoría de los materiales y dimensiones son iguales para ambos núcleos.

1.3 Descripción del núcleo de carburo

El núcleo de carburo consta de 487 ensambles combustible, 303 ensambles reflectores radiales y 27 ensambles de control. El núcleo está dividido en dos: el interno y el externo. Estos están compuestos por 286 y 201 ensambles de combustible respectivamente como se puede observar en la Figura 1.9, la diferencia entre el interno y el externo es la composición del combustible. Utiliza dos subsistemas de control que es el control primario que consta de 6 ensambles de control en el núcleo interno y 12 en la interfaz entre el interior y el exterior y el sistema secundario que consta de 9 ensambles de control que están situados entre el séptimo y el octavo anillo, la diferencia entre ellos no es su composición sino su geometría. El núcleo se encuentra rodeado de 270 ensambles reflectores.

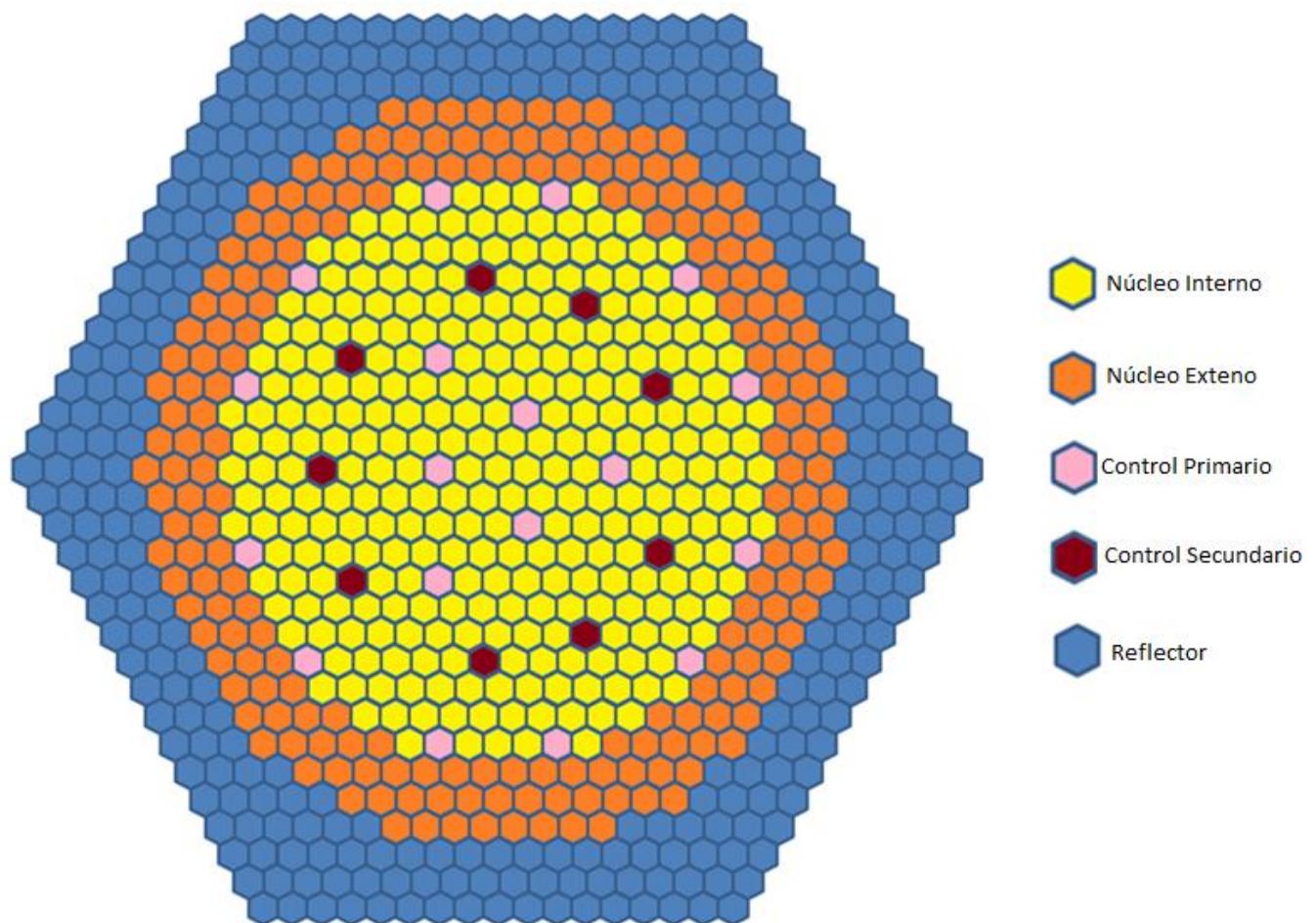


Figura 1.9 Vista superior del Núcleo de Carburo

1.3.1 Descripción del ensamble combustible

El ensamble de combustible consiste de un prisma hexagonal el cual contiene tubos que son de acero EM10 [4]. Los tubos contienen pastillas de (U,Pu)C con acero de óxido reforzado (ODS) [5, 6] de revestimiento. En la Tabla 1.1 se muestran los parámetros del ensamble combustible, los valores que se observan son dados en condiciones de operación nominal.

Tabla 1.1 Parámetros del ensamble combustible del núcleo de carburo

	Unidad	
Altura del ensamble	Cm	301.7
-Gas inferior		80.45
-Reflector Axial inferior		30.17
-Núcleo activo		100.56
-Gas superior		10.05
-Reflector axial superior		80.45
Pitch del ensamble	Cm	20.9889
Distancia del conducto del ensamble plano-plano	Cm	20.2641
Espesor de la pared del conducto del ensamble	Cm	0.4525
Número de pastillas del combustible		469
Radio exterior del encamisado	cm	0.3954
Radio interior del encamisado	cm	0.347
Radio del combustible	cm	0.3319
Distancia pastillas-pastillas	cm	0.885

En la Tabla 1.1 se observa cuantos segmentos tiene el ensamble combustible, así como sus alturas respectivamente, la distancia que hay entre el centro de un ensamble combustible a otro (pitch), el radio exterior e interior de la pastilla de combustible y la distancia que hay entre ellas.

En la Figura 1.10 se muestra la descripción axial y radial del ensamble combustible, el diseño del pin axial está basado en un segmento activo central de un metro el cual se divide en 5 segmentos con diferentes tipos de combustible, rodeado por dos segmentos de gas (helio) y dos de acero EM10 (reflector). El porcentaje en volumen de cada segmento axial del ensamble de combustible se presenta en la Tabla 1.2.

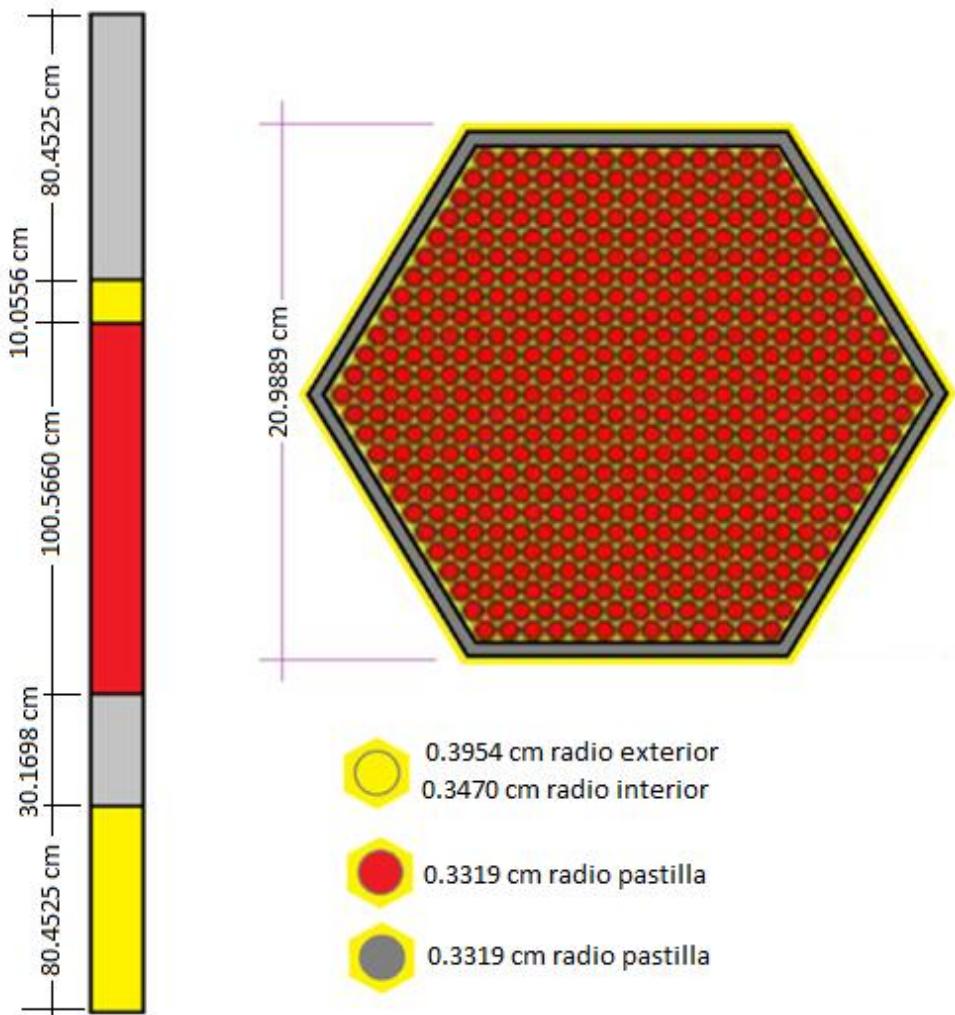


Figura 1.10 Descripción axial y radial del ensamble combustible del núcleo de Carburo

Tabla 1.2 Porcentaje en volumen del ensamble combustible del núcleo de carburo

	combustible	Sodio	ODS	EM10
Combustible	42.63	31.48	13.9	8.16
Reflector axial	-	31.48	13.9	50.78
Gas superior	-	31.48	13.9	8.16
Gas inferior	-	31.48	13.9	8.16

1.3.2 Descripción de los ensambles de control primario y secundario

Hay dos tipos de sistemas de control: el primario y el secundario. Los ensambles del sistema primario tienen un canal interior de forma hexagonal que contiene los pines con carburo de boro natural, mientras que los ensambles del secundario tienen forma circular que contiene los pines con carburo de boro enriquecido. La estructura y los conductos utilizan EM10 como material, la altura de absorción activa es igual a la altura del núcleo activo (100.56cm), el resto es un conducto lleno de sodio. Para el funcionamiento normal del núcleo los materiales de absorción permanecen en la parte superior de la zona del núcleo activo, una vez que se insertan quedan a la misma altura del núcleo activo. En las Tablas 1.3 y 1.4 se proporcionan los parámetros de los ensamblaje de control, y en las Figuras 1.11 y 1.12 se muestran los ensambles de control primario y secundario.

Tabla 1.3 Parámetros de las barras de control primario del núcleo de Carburo

	unidades	Núcleo de carburo
Pitch del ensamble	cm	20.9889
Ancho del conducto del ensamble plano-plano		20.2641
Exterior del ancho del conducto interno plano-plano		15.6883
Interior del ancho del conducto interno plano-plano		15.286
Número de pins		37
Diámetro exterior del encamisado	cm	2.2953
Diámetro interior del encamisado		2.0948
Diámetro de las pastillas		1.8404
Material de las pastillas		B ₄ C (Natural)
Distancia pin-pin	cm	2.4438

En la Tabla 1.3 y 1.4 se observa la distancia entre 1 centro de un ensambles al centro de otro (pitch), el material de las pastillas, así como su diámetro de la pastilla, la distancia que hay entre pastillas (pin-pin), y el número de pastillas que contiene el ensamblaje de control.

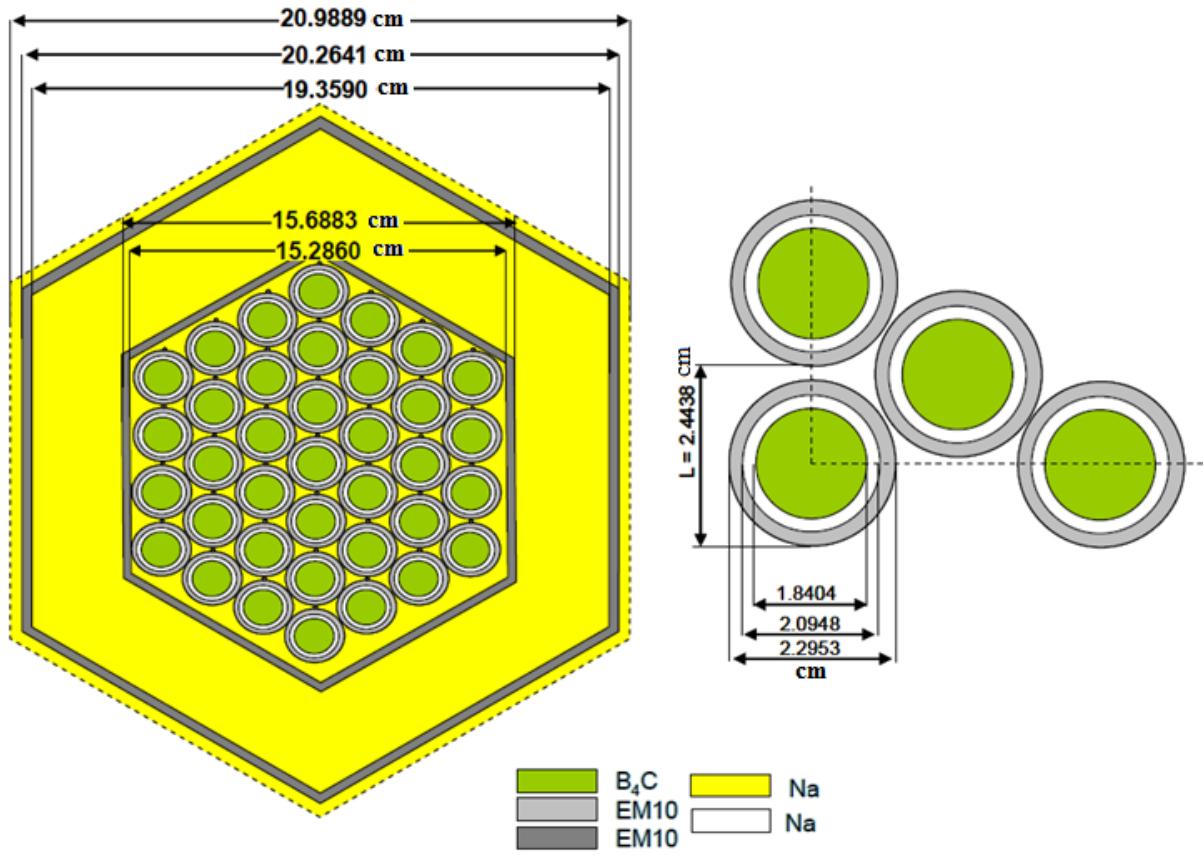


Figura 1.11 Descripción del ensamble control (sistema primario) del núcleo de Carburo

Tabla 1.4 Parámetros de las barras de control secundario del núcleo de Carburo

	unidades	Núcleo de carburo
Pitch del ensamble		20.9889
Ancho del conducto del ensamble plano-plano	cm	20.2641
Diámetro exterior del conducto interno		14.8838
Diámetro interior del conducto interno		14.4815
Número de pines		55
Diámetro exterior del encamisado		1.6443
Diámetro interior del encamisado	cm	1.5417
Diámetro de las pastillas		1.4079
Material de las pastillas		B ₄ C (Enriquecido)
Distancia pin-pin	cm	1.7519

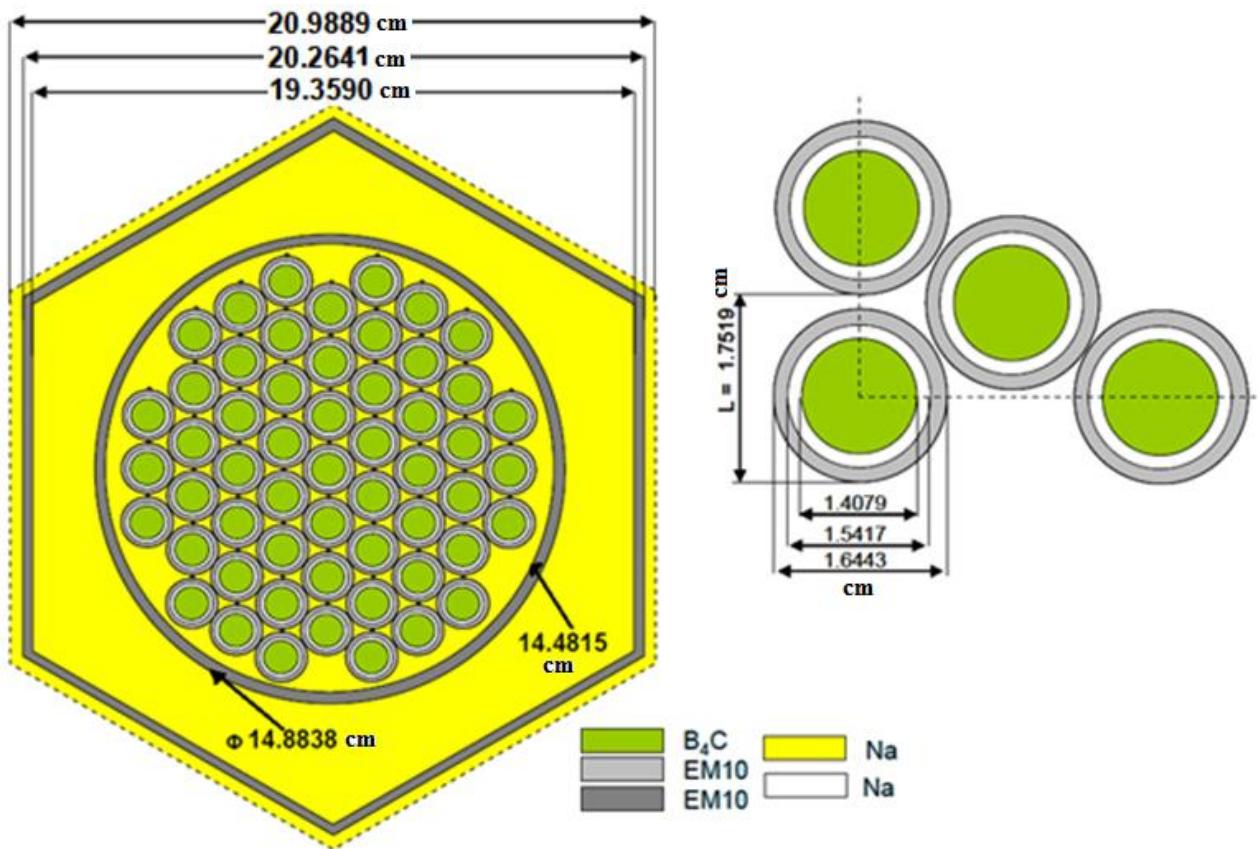


Figura 1.12 Descripción del ensamble control (sistema secundario) del núcleo de Carburo

Para el ensamblaje reflector se utiliza un medio homogéneo único para el núcleo de carburo. El porcentaje en volumen de cada segmento del ensamblaje de control del sistema primario y secundario se representa en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5 Porcentaje de volumen del ensamblaje control primario y secundario del núcleo de Carburo

	Control		Conducto vacío
	Primario	Secundario	
B4C	25.8	22.44	-
Refrigerante	56.07	64.96	91.84
Estructura (EM10)	18.13	12.6	8.14

1.3.3 Descripción de los materiales

Materiales del combustible: Los datos que se utilizan corresponden a la condición de operación nominal se presentan y se calculan tomando en consideración los efectos de expansión térmica y el hinchamiento debido a la irradiación respecto del estado de fabricación del combustible. La composición del ensamblaje de combustible es dado para el principio y el fin del ciclo del núcleo. El ensamblaje en la parte activa del núcleo se divide en 5 segmentos de concentración para cada segmento axial la composición es diferente tanto para el núcleo interno como el externo. Las composiciones de los pinos es una mezcla de uranio, plutonio, neptunio, americio, curio, molibdeno para los productos de fisión y carbono, para cada segmento se dan para condiciones de calor y se muestran en las Tablas 1.6 y 1.7.

Tabla 1.6 Densidades del núcleo interno de la parte activa por segmentos (pin)*.

Núclido	20.11 (cm)	40.2 (cm)	60.33 (cm)	80.44 (cm)	100.55 (cm)
C	2.6385E-02	2.6385E-02	2.6385E-02	2.6385E-02	2.6385E-02
U ₂₃₄	1.1919E-06	1.1668E-06	1.1555E-06	1.1735E-06	1.2112E-06
U ₂₃₅	4.6799E-05	4.4631E-05	4.3713E-05	4.5174E-05	4.8320E-05
U ₂₃₆	2.8136E-06	3.1423E-06	3.3299E-06	3.0230E-06	2.4244E-06
U ₂₃₈	2.2303E-02	2.2143E-02	2.2084E-02	2.2177E-02	2.2382E-02
Np ₂₃₇	2.5168E-06	3.4681E-06	3.7208E-06	3.3324E-06	2.2640E-06
Np ₂₃₉	3.5946E-06	4.4531E-06	4.7916E-06	4.2607E-06	3.1154E-06
Pu ₂₃₈	1.0646E-04	1.0306E-04	1.0175E-04	1.0383E-04	1.0844E-04
Pu ₂₃₉	1.8140E-03	1.8594E-03	1.8745E-03	1.8508E-03	1.7942E-03
Pu ₂₄₀	1.0229E-02	1.0161E-03	1.0165E-03	1.0155E-03	1.0185E-03
Pu ₂₄₁	2.4210E-04	2.3422E-04	2.3224E-04	2.3519E-04	2.4351E-04
Pu ₂₄₂	3.4136E-04	3.3784E-04	3.3674E-04	3.3844E-04	3.4252E-04
Am ₂₄₁	3.7572E-05	3.6180E-05	3.5616E-05	3.6509E-05	3.8462E-05
Am _{242g}	1.0156E-08	1.1575E-08	1.2270E-08	1.1142E-08	8.7856E-09
Am _{242m}	6.9199E-07	7.7557E-07	8.1635E-07	7.4933E-07	6.0460E-07
Am ₂₄₃	1.4205E-05	1.6267E-05	1.7351E-05	1.5594E-05	1.2110E-05
Cm ₂₄₂	1.0156E-08	1.1575E-08	1.2270E-08	1.1142E-08	8.7856E-09
Cm ₂₄₃	1.6209E-06	1.8657E-06	1.9718E-06	1.7856E-06	1.3992E-06
Cm ₂₄₄	4.3067E-08	5.3407E-08	6.0550E-08	4.9215E-08	3.0944E-08
Cm ₂₄₅	1.0655E-06	1.4363E-06	1.6492E-06	1.3185E-06	7.7128E-07
Cm ₂₄₆	2.7855E-08	4.4683E-08	5.5003E-08	3.9501E-08	1.7550E-08
Cm ₂₄₇	3.6683E-10	7.3090E-10	9.7114E-10	6.2267E-10	-
Mo	1.3400E-03	1.3400E-03	1.3400E-03	1.3400E-03	1.3400E-03

(*) Unidades en átomos/barn-cm

En las Tabla 1.6 y 1.7 en la primera columna se muestra la composición del núclido y las siguientes cinco columnas se muestra las densidades de cada isótopo que compone el núclido, ya que la parte activa del núcleo tiene una altura de 100.55 cm, el cual está dividido en cinco segmentos y cada segmento tiene una altura como se puede observar en la primera fila de las Tablas.

Tabla 1.7 Densidades del núcleo externo de la parte activa por segmentos (pin)*.

Núclido	20.11 (cm)	40.2 (cm)	60.33 (cm)	80.44 (cm)	100.55 (cm)
C	2.6385E-02	2.6385E-02	2.6385E-02	2.6385E-02	2.6385E-02
U ₂₃₄	2.2313E-05	2.1245E-06	2.0828E-06	2.1405E-06	2.2687E-06
U ₂₃₅	3.6556E-05	3.3005E-05	3.1658E-05	3.3521E-05	3.7812E-05
U ₂₃₆	3.8682E-06	4.4412E-06	4.7031E-06	4.3381E-06	3.5850E-06
U ₂₃₈	1.9613E-02	1.9319E-02	1.9211E-02	1.9359E-02	1.9697E-02
Np ₂₃₇	4.0477E-06	5.6298E-06	6.0470E-06	5.4769E-06	3.7682E-06
Np ₂₃₉	3.0567E-06	3.9393E-06	4.2728E-06	3.8143E-06	2.7851E-06
Pu ₂₃₈	1.2031E-04	1.1288E-04	1.1019E-04	1.1390E-04	1.2263E-04
Pu ₂₃₉	2.1078E-03	2.1362E-03	2.1436E-03	2.1335E-03	2.1219E-03
Pu ₂₄₀	1.2520E-03	1.2386E-03	1.2385E-03	1.2384E-03	1.2492E-03
Pu ₂₄₁	2.7216E-04	2.5863E-04	2.5524E-04	2.5984E-04	2.7437E-04
Pu ₂₄₂	4.0896E-04	4.0010E-04	3.9726E-04	4.0115E-04	4.1086E-04
Am ₂₄₁	5.2029E-05	4.8117E-05	4.6701E-05	4.8656E-05	5.3279E-05
Am _{242g}	1.3235E-08	1.5409E-08	1.6296E-08	1.5069E-08	1.2281E-08
Am _{242m}	1.2674E-06	1.5394E-06	1.6065E-06	1.5130E-06	1.2836E-06
Am ₂₄₃	2.6522E-05	3.1778E-05	3.4010E-05	3.0910E-05	2.4305E-05
Cm ₂₄₂	2.3638E-06	2.7689E-06	2.9338E-06	2.7054E-06	2.1894E-06
Cm ₂₄₃	1.0326E-07	1.3838E-07	1.5726E-07	1.3092E-07	8.5277E-08
Cm ₂₄₄	3.2259E-06	4.8143E-06	5.5901E-06	4.5164E-06	2.6306E-06
Cm ₂₄₅	1.3656E-07	2.5044E-07	3.1218E-07	2.2707E-07	9.9197E-08
Cm ₂₄₆	3.0878E-09	7.2444E-09	9.7807E-09	6.3131E-09	1.9680E-09
Mo	1.8258E-03	1.8258E-03	1.8258E-03	1.8258E-03	1.8258E-03

(*) Unidades en átomos/barn-cm

Materiales para la estructura, refrigerante y absorbedor: El núcleo utiliza la misma composición de material para todo lo que no tiene combustible. Los conductos son de acero EM10, que es un acero con cromo, silicio, titanio y otros materiales. El revestimiento es de acero ODS que es de acero con cromo, fósforo y otros materiales. El refrigerante es sodio. Las barras de control son de carbono y boro, el sistema primario tiene boro natural y el secundario contiene boro enriquecido, la composición se muestra en las Tablas 1.8 y 1.9.

Tabla 1.8 Densidad del material de la estructura y el refrigerante*

Elemento	EM10	ODS	Sodio
Na	-	-	2.1924E-02
C	3.8254E-04	3.5740E-04	-
O	-	3.9924E-04	-
Si	4.9089E-04	-	-
Ti	1.9203E-05	5.3824E-04	-
Cr	7.5122E-03	1.7753E-02	-
Fe	7.3230E-02	5.3872E-02	-
Ni	3.9162E-04	3.6588E-04	-
Mo	4.7925E-04	-	-
Mn	4.1817E-04	2.3441E-04	-
P	-	2.7718E-05	-
Al	-	9.1482E-03	-
Co	-	2.1852E-04	-
Cu	-	1.0135E-04	-
Y	-	2.6616E-04	-

Tabla 1.9 Densidad del material absorbedor*

Elemento	Control	
	Primario	Secundario
C	2.70E-02	2.70E-02
B ₁₀	2.32E-02	9.81E-02
B ₁₁	8.49E-02	9.91E-02

(*) Unidades en átomos/barn-cm

1.4 Descripción del núcleo de óxido

El núcleo de óxido consiste de 453 ensambles combustible, 337 ensambles reflectores radiales y 27 ensambles de control. El núcleo se divide en uno interno y otro externo el cual está compuesto por 225 y 228 ensambles de combustible respectivamente. Al igual que el núcleo de carburo el núcleo de óxido tiene dos sistemas, el sistema primario consta de 6 ensambles en el núcleo interno y 12 ensambles en la interfaz del núcleo interno y externo. El sistema secundario consta de 9 ensambles

que se encuentran ubicados en el séptimo anillo y alrededor del núcleo externo se encuentran los 337 ensambles de reflector radial (ver Figura 1.13).

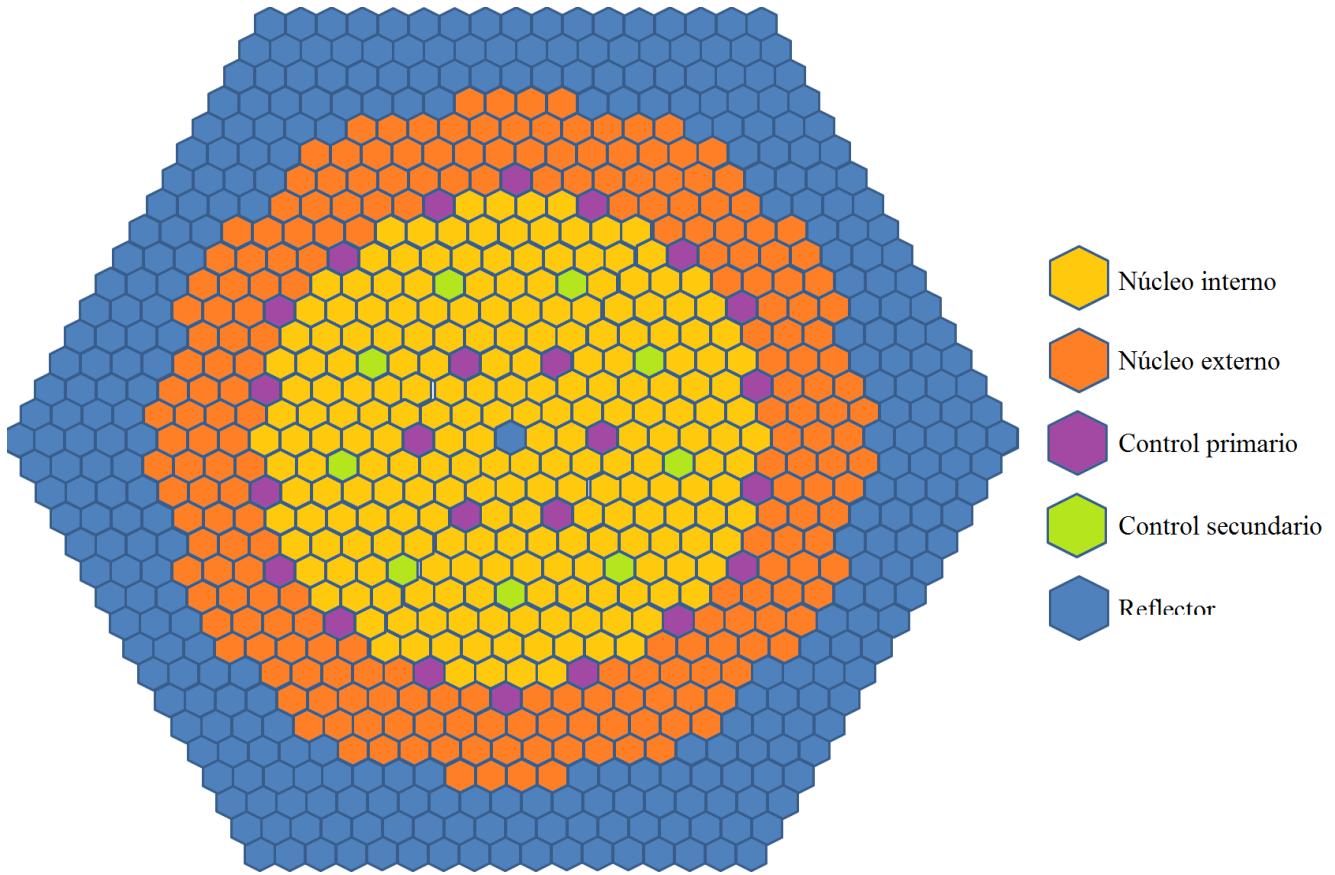


Figura 1.13 Vista superior del núcleo de Óxido

1.4.1 Descripción del ensamble combustible

El ensamble combustible tiene la misma composición que la del núcleo de carburo, pero las dimensiones del núcleo de óxido son diferentes y hay menos pines, así como la composición del combustible es de $(U, Pu)O_2$ con óxido de acero reforzado (ODS) como encamisado. Las características se dan en la Tabla 1.10, los valores que se utilizan son dados en condiciones de operación nominal.

Tabla 1.10 Parámetros del ensamble combustible del núcleo de Óxido

	Unidad	
Altura del ensamble	cm	311.16
-Gas inferior		89.91
-Reflector Axial inferior		30.17
-Núcleo activo		100.56
-Gas superior		10.05
-Reflector axial superior		80.45
Pitch del ensamble	cm	21.2205
Distancia del conducto del ensamble plano-plano	cm	20.7468
Espesor de la pared del conducto del ensamble	cm	0.4525
Número de pins del combustible		271
Radios exterior del encamisado	cm	0.5419
Radio interior del encamisado	cm	0.4893
Radio del combustible	cm	0.4742
Distancia pin-pin	cm	1.1897

En la Tabla 1.10 se muestra en cuantos segmentos está dividido el ensamble combustible así como su altura de cada segmento, la distancia que hay del centro de un ensamble combustible a otro (pitch), la distancia entre las pastillas (pin-pin), así como su radio y el número de pastillas.

La descripción axial del ensamble de combustible se observa en la Figura 1.14. La zona activa es de un metro y está en la parte central del tubo rodeada de dos segmentos de gas y dos de reflector axial. El porcentaje en volumen de cada segmento axial del ensamble de combustible se observa en la Tabla 1.11.

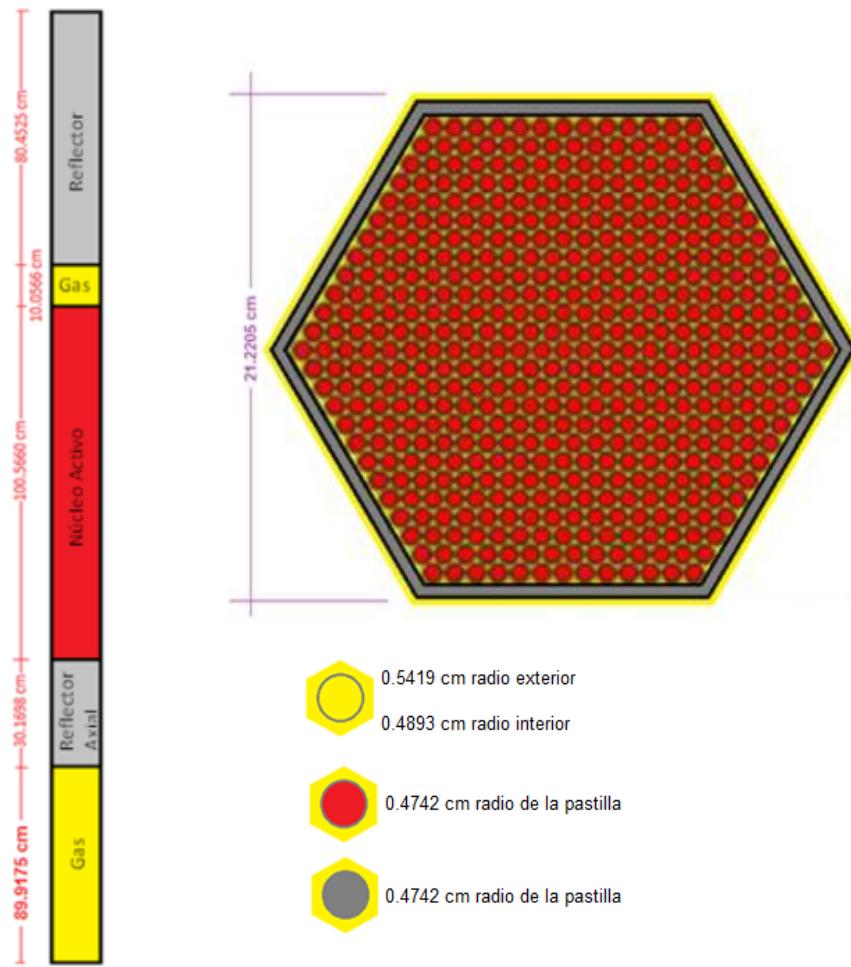


Figura 1.14 Descripción axial y radial del ensamble combustible del núcleo de Óxido

Tabla 1.11 Porcentaje de volumen del ensamble combustible del núcleo de Óxido

	Combustible	Sodio	ODS	EM10
Combustible	45.63	27.74	11.85	8.14
Gas superior	-			
Gas inferior	-			
Reflector axial	-			
				51.5

1.4.2 Descripción de los ensambles de control primario y secundario

Los ensambles de control primario y secundario tienen la misma composición que los del núcleo de carburo. En la Tabla 1.12 y 1.13 se muestran las características de las barras de control, y en las Figuras 1.15 y 1.16 se muestra una vista superior de los ensambles de control.

Tabla 1.12 Parámetros de la barra de control primario del núcleo de Óxido

	unidades	Núcleo de Óxido
Pitch del ensamble	cm	21.2205
Ancho del conducto del ensamble plano-plano		20.7468
Exterior del ancho del conducto interno plano-plano		15.6883
Interior del ancho del conducto interno plano-plano		15.286
Número de pins		37
Diámetro exterior del encamisado	cm	2.2953
Diámetro interior del encamisado		2.0948
Diámetro de las pastillas		1.8404
Material de las pastillas		B ₄ C (Natural)
Distancia pin-pin	cm	2.4438

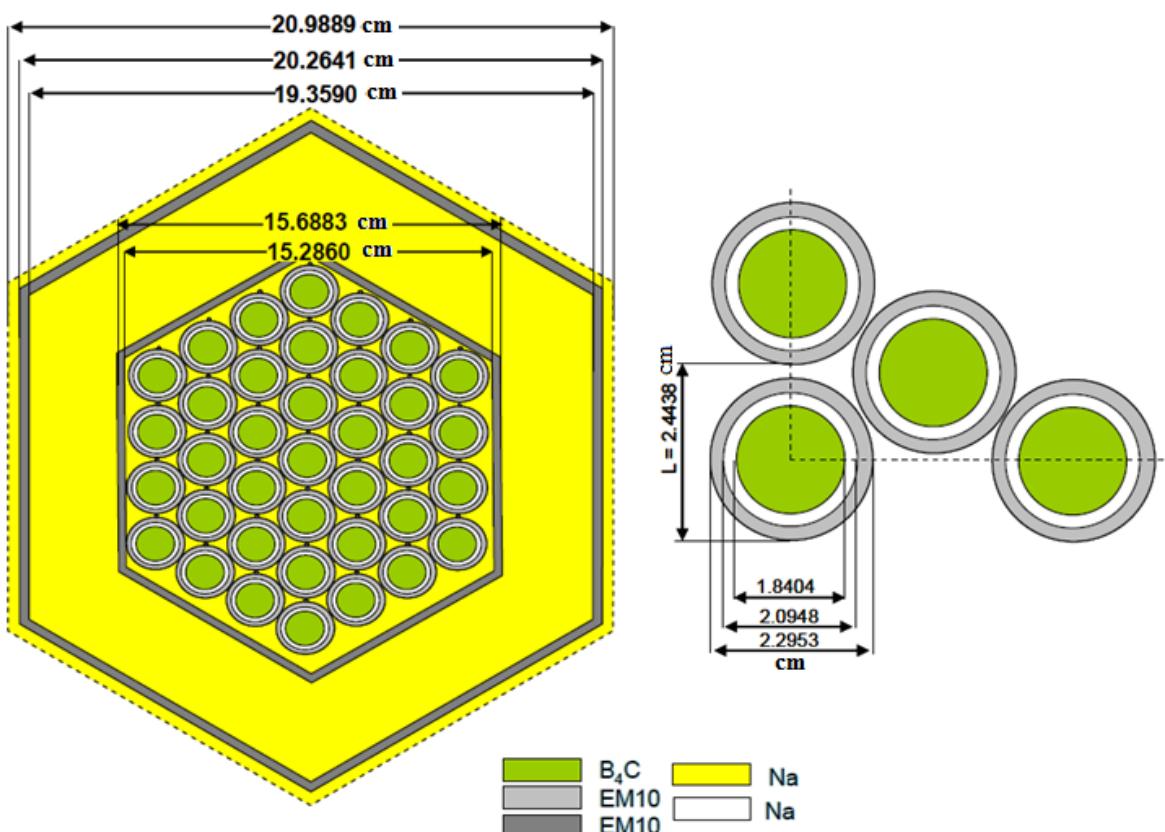


Figura 1.15 Descripción del ensamble de control (sistema primario) del núcleo de Óxido

Tabla 1.13 Parámetros de la barra de control secundario del núcleo de Óxido

	unidades	Núcleo de Óxido
Pitch del ensamble	cm	21.2205
Ancho del conducto del ensamble plano-plano		20.7468
Diámetro exterior del conducto interno		14.8838
Diámetro interior del conducto interno		14.4815
Número de pines		55
Diámetro exterior del encamisado	cm	1.6443
Diámetro interior del encamisado		1.5417
Diámetro de las pastillas		1.4079
Material de las pastillas		B ₄ C (Enriquecido)
Distancia pin-pin	cm	1.7519

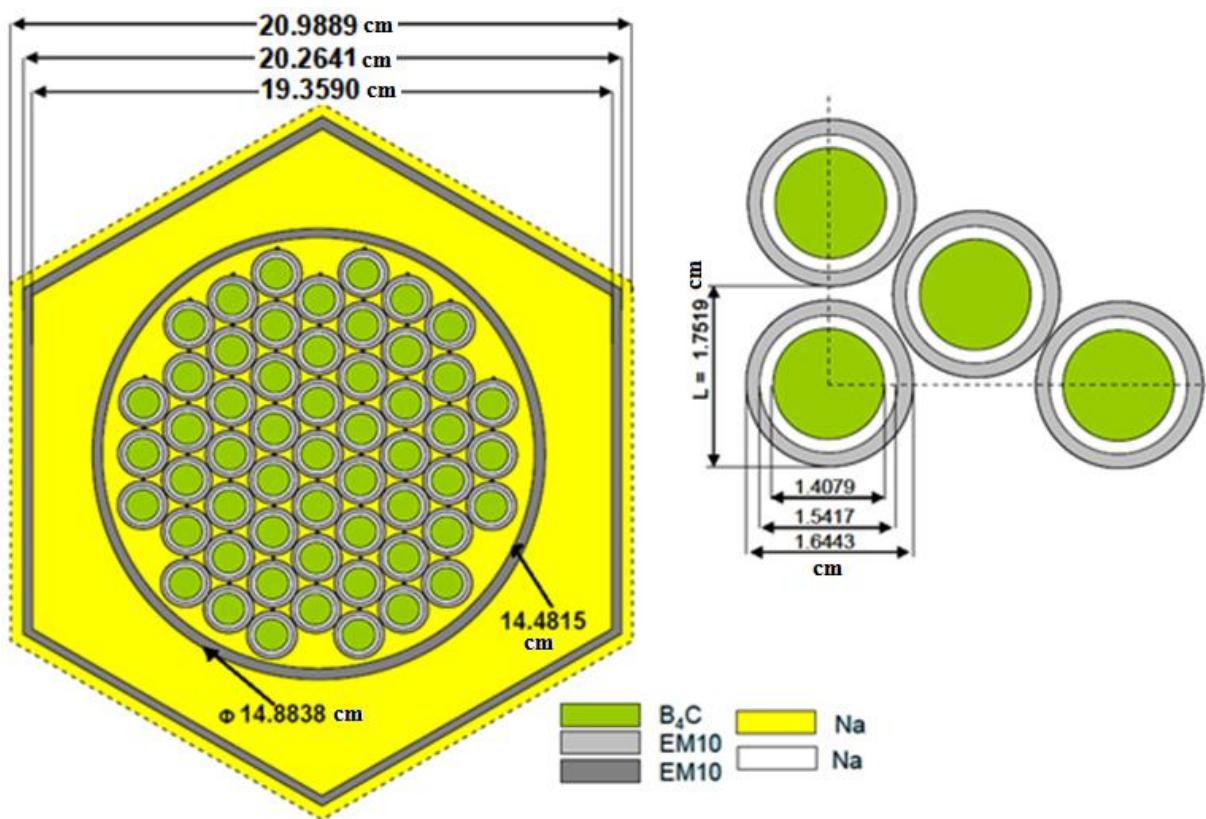


Figura 1.16 Descripción del ensamble control (sistema secundario) del núcleo de Óxido

1.4.3 Descripción de los materiales

Materiales del combustible: Los datos que se utilizan corresponden a la condición de operación nominal los cuales se calculan tomando en consideración los efectos de expansión térmica y el hinchamiento debido a la irradiación respecto del estado de fabricación del combustible. La composición del ensamblaje de combustible es dada para el principio y el fin del ciclo del núcleo. El ensamblaje en la parte activa del núcleo se divide en 5 segmentos de concentración para cada segmento axial la composición es diferente tanto para el núcleo interno como el externo. Las composiciones de los pinos son una mezcla de uranio, plutonio, neptunio, americio, curio, molibdeno para los productos de fisión y oxígeno, para cada segmento se dan para condiciones en caliente y se presentan en las Tablas 1.14 y 1.15.

En las Tabla 1.14 y 1.15 en la primera columna se muestra la composición del núclido y las siguientes cinco columnas se muestra las densidades de cada isótopo que compone el núclido, ya que la parte activa del núcleo tiene una altura de 100.55 cm, el cual está dividido en cinco segmentos el cual cada segmento tiene una altura como se puede observar en la primera fila de las Tablas.

Las densidades de los isótopos que componen al núclido están en átomos/barn-cm* para ambas Tablas 1.14 y 1.15 la cual cada una se refiere a la parte activa del núcleo interno y externo respectivamente.

Tabla 1.14 Densidades del núcleo interno de la parte activa por segmentos (pin) del núcleo de Óxido*.

Núclido	20.11 (cm)	40.2 (cm)	60.33 (cm)	80.44 (cm)	100.55 (cm)
O	4.2825E-02	4.2825E-02	4.2825E-02	4.2825E-02	4.2825E-02
U ₂₃₄	1.7602E-06	1.6854E-06	1.6555E-06	1.7055E-06	1.8159E-06
U ₂₃₅	3.3412E-05	3.0308E-05	2.9137E-05	3.1106E-05	3.5674E-05
U ₂₃₆	4.0730E-06	4.5416E-06	4.7679E-06	4.3769E-06	3.5242E-06
U ₂₃₈	1.8692E-02	1.8418E-02	1.8322E-02	1.8479E-02	1.8833E-02
Np ₂₃₇	3.7863E-06	5.1775E-06	5.5220E-06	4.9657E-06	3.3888E-06
Np ₂₃₉	3.5878E-06	4.5073E-06	4.8411E-06	4.2905E-06	3.0633E-06
Pu ₂₃₈	9.4366E-05	8.8933E-05	8.6992E-05	9.0233E-05	9.7746E-05
Pu ₂₃₉	1.8178E-03	1.8701E-03	1.8845E-03	1.8611E-03	1.7967E-03
Pu ₂₄₀	1.0177E-03	1.0093E-03	1.0108E-03	1.0077E-03	1.0089E-03
Pu ₂₄₁	2.1797E-04	2.0709E-04	2.0474E-04	2.0843E-04	2.1989E-04
Pu ₂₄₂	3.2651E-04	3.1969E-04	3.1762E-04	3.2097E-04	3.2894E-04
Am ₂₄₁	4.0395E-05	3.7459E-05	3.6419E-05	3.8152E-05	4.2233E-05
Am _{242g}	1.2900E-08	1.4609E-08	1.5317E-08	1.4098E-08	1.2116E-08
Am _{242m}	1.2243E-06	1.3387E-06	1.3853E-06	1.3029E-06	1.0866E-06
Am ₂₄₃	2.4048E-05	2.7848E-05	2.9501E-05	2.6690E-05	2.0522E-05
Cm ₂₄₂	2.2643E-06	2.5789E-06	2.7086E-06	2.4860E-06	1.9640E-06
Cm ₂₄₃	1.0596E-07	1.3294E-07	1.4828E-07	1.2228E-07	7.5767E-08
Cm ₂₄₄	3.2454E-06	4.5321E-06	5.1600E-06	4.1266E-06	3.2121E-06
Cm ₂₄₅	1.4745E-07	2.4624E-07	2.9876E-07	2.1432E-07	8.9736E-08
Cm ₂₄₆	3.4906E-09	7.2920E-09	9.5184E-09	6.0399E-09	1.8811E-09
Mo	2.7413E-03	2.7413E-03	2.7413E-03	2.7413E-03	2.7413E-03

Tabla 1.15 Densidades del núcleo externo de la parte activa por segmentos (pin) del núcleo de Óxido*.

Núclido	20.11 (cm)	40.2 (cm)	60.33 (cm)	80.44 (cm)	100.55 (cm)
O	4.2825E-02	4.2825E-02	4.2825E-02	4.2825E-02	4.2825E-02
U ₂₃₄	2.0797E-06	1.9802E-06	1.9413E-06	1.9951E-06	2.1146E-06
U ₂₃₅	3.4073E-05	3.0762E-05	2.9508E-05	3.1243E-05	3.5243E-05
U ₂₃₆	3.6055E-06	4.1395E-06	4.3836E-06	4.0434E-06	3.3415E-06
U ₂₃₈	1.8281E-02	1.8006E-02	1.7906E-02	1.8044E-02	1.8359E-02
Np ₂₃₇	3.7727E-06	5.2474E-06	5.6362E-06	5.1048E-06	3.5123E-06
Np ₂₃₉	2.8490E-06	3.6717E-06	3.9825E-06	3.5552E-06	2.5959E-06
Pu ₂₃₈	1.1214E-04	1.0521E-04	1.0271E-04	1.0616E-04	1.1430E-04
Pu ₂₃₉	1.9646E-03	1.9910E-03	1.9980E-03	1.9885E-03	1.9591E-03
Pu ₂₄₀	1.1670E-03	1.1545E-03	1.1543E-03	1.1543E-03	1.1643E-03
Pu ₂₄₁	2.5367E-04	2.4106E-04	2.3790E-04	2.4218E-04	2.5573E-04
Pu ₂₄₂	3.8118E-04	3.7292E-04	3.7027E-04	3.7390E-04	3.8295E-04
Am ₂₄₁	4.8494E-05	4.4849E-05	4.3528E-05	4.5350E-05	4.9660E-05
Am _{242g}	1.2336E-08	1.4363E-08	1.5189E-08	1.4045E-08	1.1447E-08
Am _{242m}	1.2745E-06	1.4348E-06	1.4973E-06	1.4102E-06	1.1964E-06
Am ₂₄₃	2.4720E-05	2.9619E-05	3.1700E-05	2.8811E-05	2.2654E-05
Cm ₂₄₂	2.2032E-06	2.5808E-06	2.7345E-06	2.5216E-06	2.0406E-06
Cm ₂₄₃	9.6244E-08	1.2898E-07	1.4657E-07	1.2203E-07	7.9484E-08
Cm ₂₄₄	3.0067E-06	4.4873E-06	5.2103E-06	4.2096E-06	2.4519E-06
Cm ₂₄₅	1.2729E-07	2.3343E-07	2.9097E-07	2.1164E-07	9.2458E-08
Cm ₂₄₆	2.8780E-09	6.7522E-09	9.1163E-09	5.8843E-09	1.8343E-09
Mo	2.9100E-03	2.9100E-03	2.9100E-03	2.9100E-03	2.9100E-03

(*) Unidades en átomos/barn-cm

1.5 Descripción del núcleo metálico

El núcleo metálico consiste de 180 ensambles de combustible, 114 ensambles reflectores radiales, 66 ensambles radiales de blindaje y 19 ensambles de control. El núcleo se divide en dos, uno interno y el otro externo que se componen de 78 y 102 ensambles de combustible respectivamente. Tiene dos sistemas de control de seguridad el primario que consiste de 3 ensambles de control que se localizan en el cuarto anillo y 12 ensambles de control en el séptimo anillo. El sistema secundario consta de 4 ensambles de control que están localizados en el centro del núcleo y en el cuarto anillo (ver Figura 1.17).

La potencia es de 1000 MW_t, la temperatura a la entrada y salida del núcleo es de 355 y 510 C respectivamente.

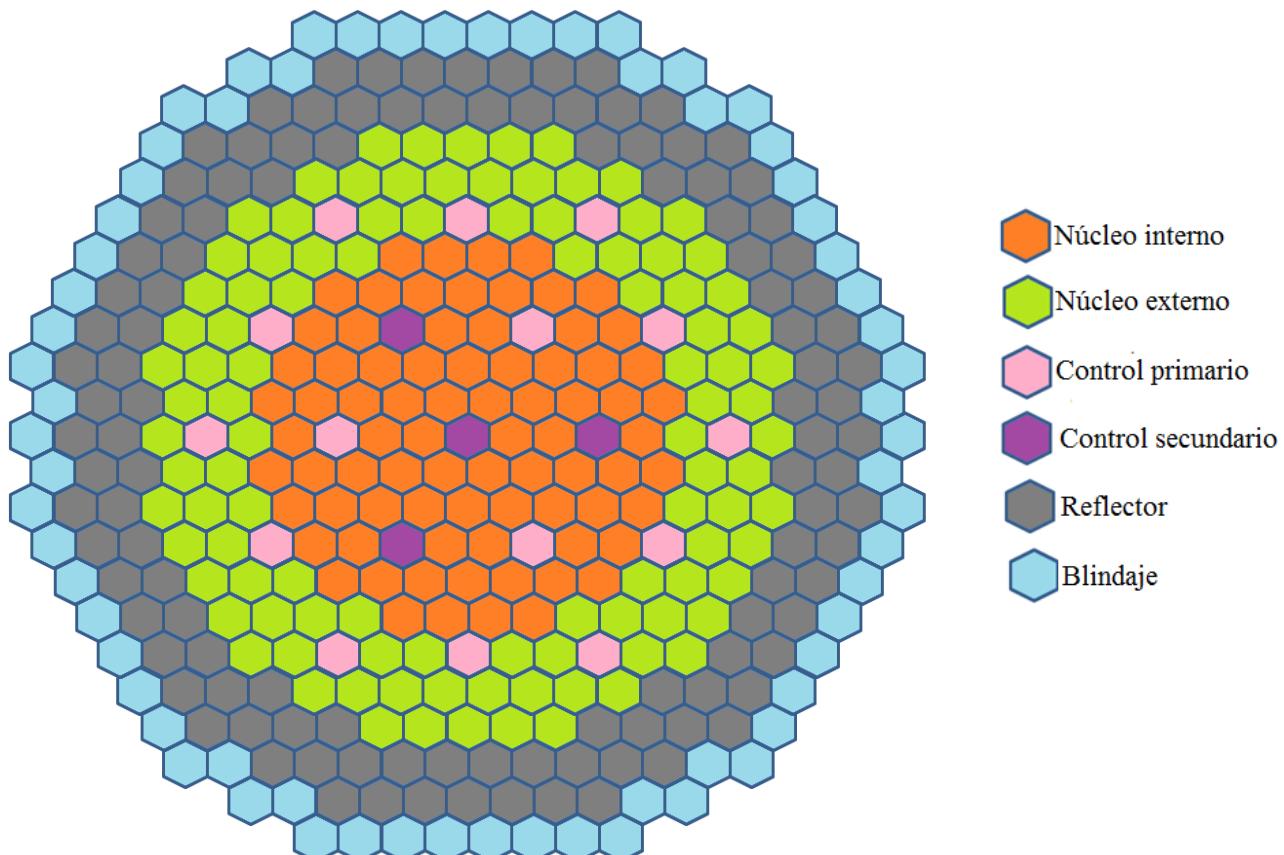


Figura 1.17 Vista superior del núcleo Metálico

1.5.1 Descripción del ensamble combustible

Los ensambles de combustible contienen 271 pines, los conductos y el revestimiento está hecho de HT-9, cada pin se divide en 6 segmentos axiales que son la parte del núcleo activo, sodio, helio, reflector inferior y la estructura superior e inferior, la estructura superior tiene la misma composición que la del reflector inferior. La composición de la estructura superior consta de una mezcla homogénea de sodio y SS-216 (ver Figura 1.18). En la Tabla 1.16 se muestran las características del ensamble combustible.

Tabla 1.16 Parámetros del ensamble combustible del núcleo Metálico

	Unidad	
Altura del ensamble de combustible	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		125.16
-Altura del núcleo activo		85.82
-Sodio		20.06
-Gas		101.01
-Estructura superior		112.39
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conductor del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del ducto del ensamble		0.3966
Número de pins		271
Radio externo del encamisado	cm	0.3857
Radio interno del encamisado		0.3236
Distancia pin-pin		0.8966

En la Tabla 1.16 se muestran las alturas de cada segmento del ensamble combustible, la distancia que hay entre el centro de un ensamble al centro de otro (pitch), número de pastillas como la distancia entre cada pastilla (pin-pin).

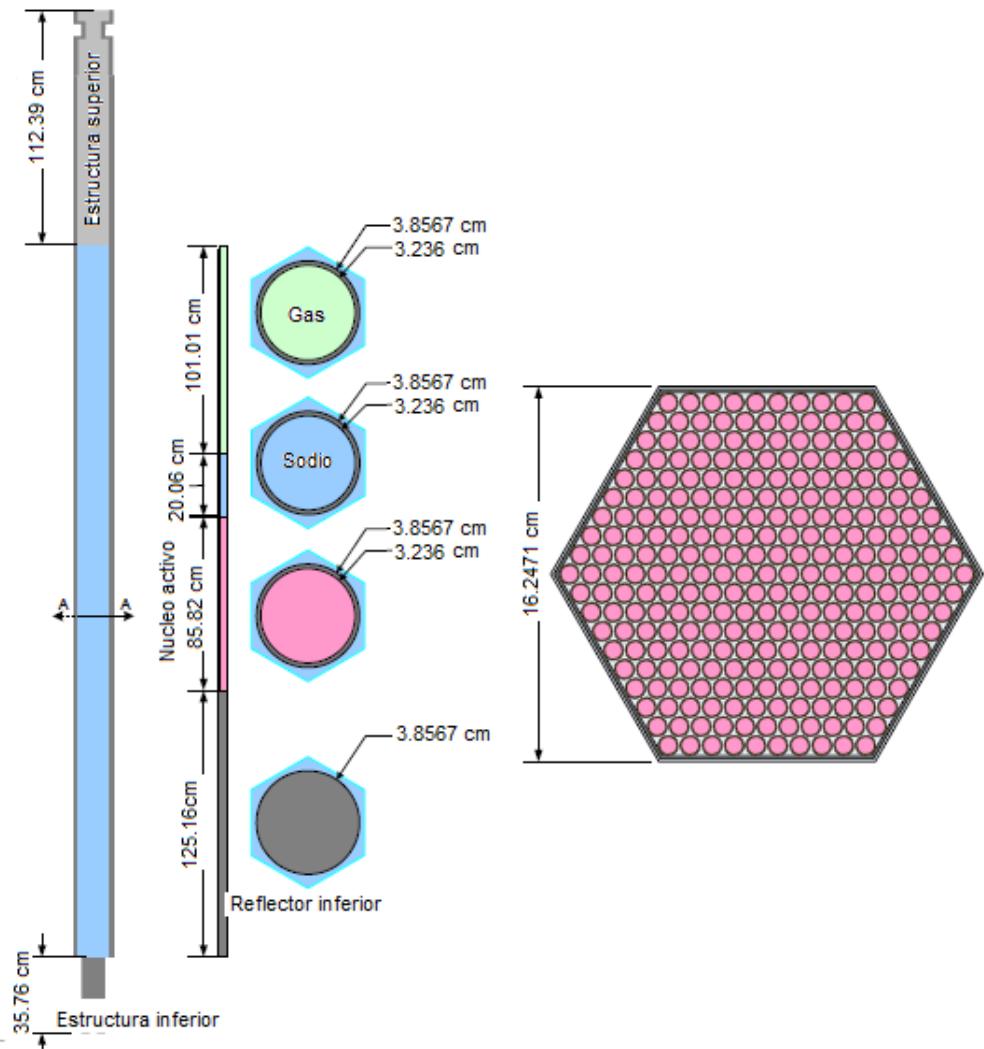


Figura 1.18 Vista axial y radial del ensamble combustible del núcleo Metálico

1.5.2 Descripción del ensamble blindaje

El ensamble blindaje consta de 19 tubos de HT-9 los cuales contienen pastillas de carburo de boro, el cual es boro natural, en la Tabla 1.17 se muestran los parámetros del ensamble y en la Figura 1.19 se observa la vista axial y radial del ensamble.

Tabla 1.17 Parámetros del ensamble blindaje del núcleo Metálico

	Unidad	
Altura del ensamble de combustible	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		125.16
-Blindaje radial		206.89
-Estructura superior		112.39
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conductor del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del ducto del ensamble		0.3966
Número de pins		19
Radio externo del encamisado	cm	1.6794
Radio interno del encamisado		1.4277
Distancia pin-pin		3.3603

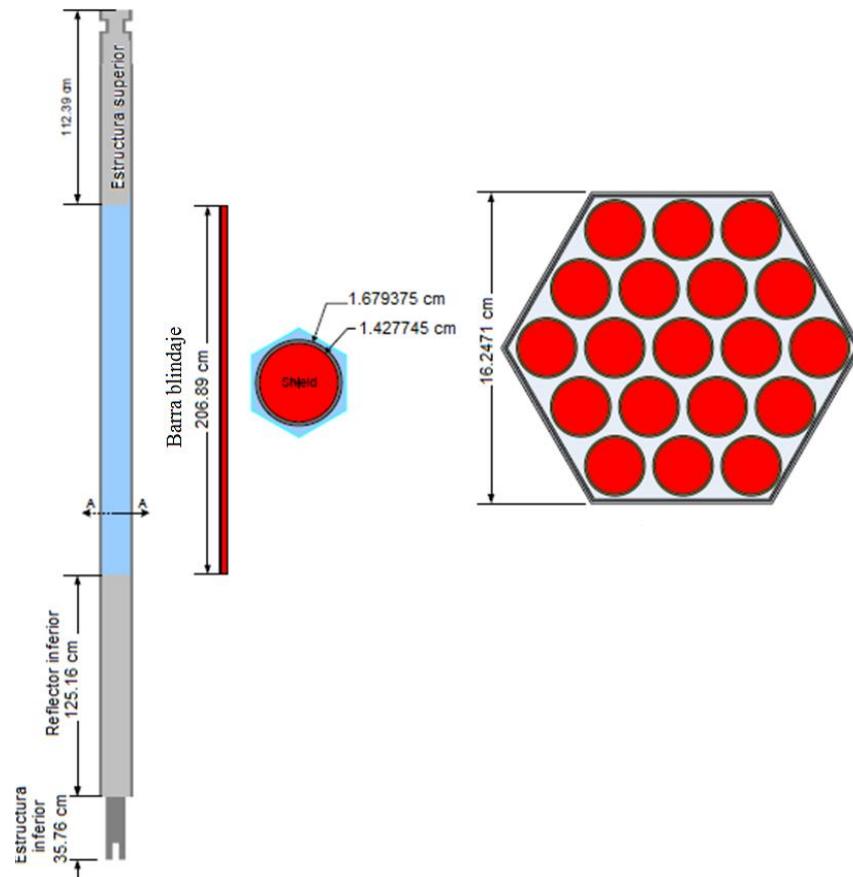


Figura 1.19 Vista axial y radial del ensamble blindaje del núcleo Metálico

1.5.3 Descripción del ensamble de control

El ensamble de control consta de dos conductos: el interno y el externo, la dimensión externa del conducto interior es más pequeño que la del conducto exterior para poder permitir el movimiento libre dentro del conducto exterior. Consta de siete tubos de HT-9 que contiene pastillas de carburo de boro, pero el boro es enriquecido. Los parámetros del ensamble se muestran en la Tabla 1.18 y la vista axial se muestra en la Figura 1.20.

Tabla 1.18 Parámetros del ensamble de control del núcleo Metálico

	Unidad	
Altura del ensamble de combustible	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		125.16
-Absorbedor		86.75
-Conducto vacío		232.53
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conductor del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del ducto del ensamble		0.3966
Distancia externa del conducto interno plano-plano		14.214
Espesor del conducto interno		0.3966
Número de pins		271
Radio externo del encamisado	cm	2.3606
Radio interno del encamisado		2.289
Distancia pin-pin		4.8578

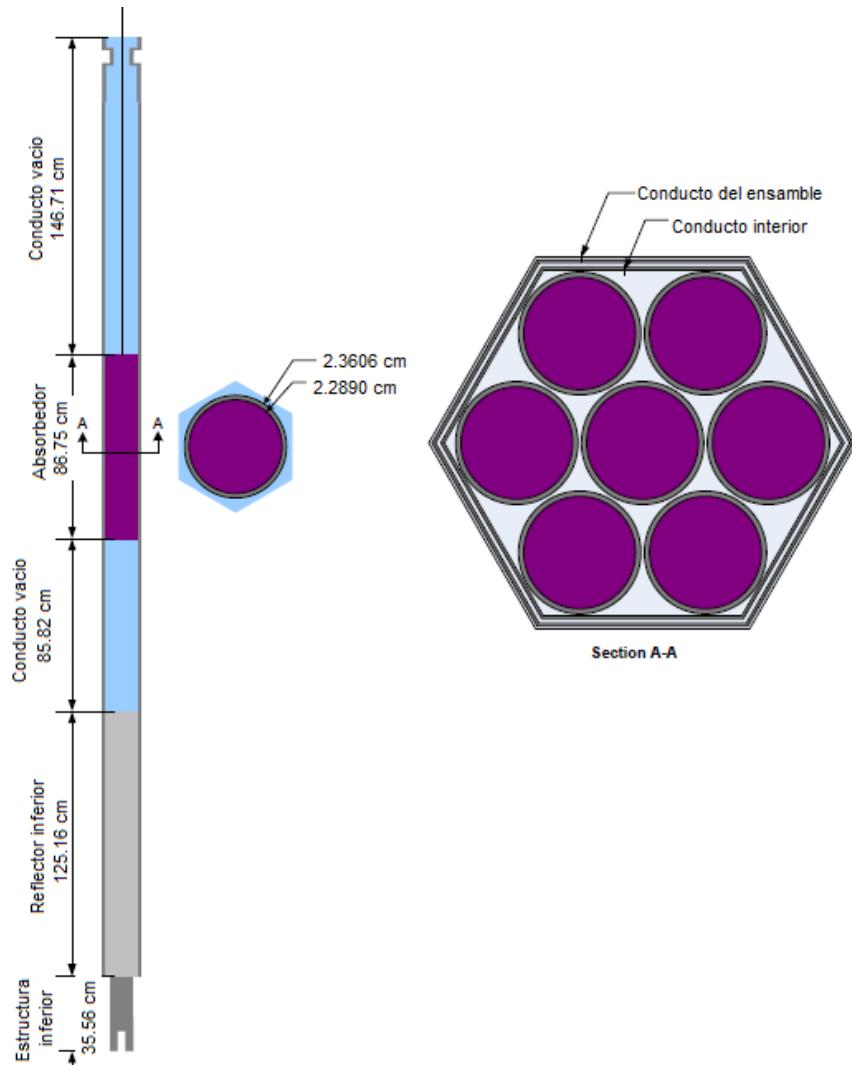


Figura 1.20 Vista axial y radial del ensamble control del núcleo Metálico

1.5.4 Descripción del ensamble reflector

El ensamble reflector contiene 91 tubos con HT-9 [7] como material tanto para el conducto como para el encamisado. En la Tabla 1.19 se muestran los parámetros del ensamble y en la Figura 1.21 se observa la vista axial y radial del ensamble.

Tabla 1.19 Parámetros del ensamble reflector del núcleo Metálico

	Unidad	
Altura del ensamble reflector	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		125.16
-Reflector radial		206.89
-Estructura superior		112.39
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conductor del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del ducto del ensamble		0.3966
Número de pins		91
Radio de la barra	cm	0.7757
Distancia pin-pin		1.5528

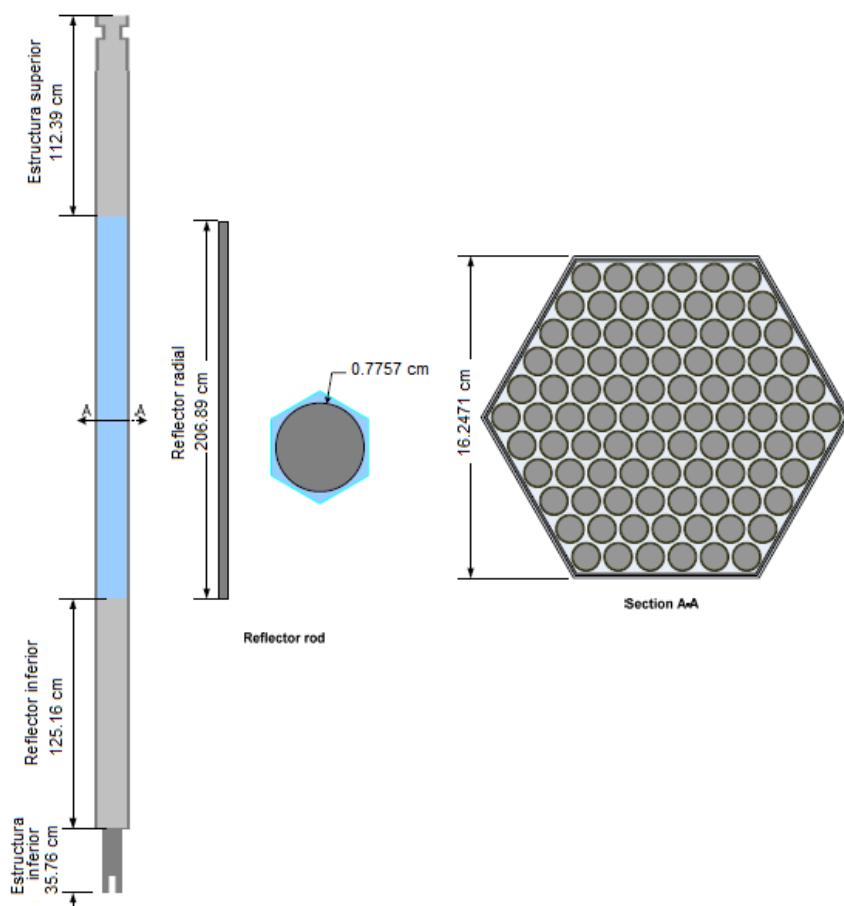


Figura 1.21 Vista axial y radial del ensamble reflector del núcleo Metálico

1.5.5 Descripción de los materiales

Para la composición del ensamblaje de combustible los datos se obtienen de la referencia [3] anteriormente ya mencionada.. El núcleo activo se divide en 5 segmentos axiales y la composición del combustible es uniforme para cada segmento. Las composiciones para el núcleo interno y externo son diferentes para cada segmento axial.

En la Tabla 1.20 se proporcionan las densidades para los materiales del refrigerante y las estructuras, así como en las Tablas 1.21 y 1.22 se proporciona la composición del combustible para cada segmento axial.

Las unidades para las densidades de los materiales de la Tabla 1.20 son en átomos/barn

Tabla 1.20 Materiales de la estructura y el refrigerante*

Material	Elemento	Densidad
Estructura inferior	Na	1.5591E-02
	Fe	1.5878E-02
	Ni	3.2604E-03
	Cr	3.2355E-03
	Mn ₅₅	5.0846E-04
	Mo	4.3524E-04
Refrigerante	Na	2.2272E-02
HT-9	Fe	6.9715E-02
	Ni	4.2984E-04
	Cr	1.0366E-02
	Mn ₅₅	4.5921E-04
	Mo	4.9007E-04
	C	1.9657E-02
Natural B ₄ C	B ₁₀	1.5018E-02
	B ₁₁	6.3609E-02
	C	2.0632E-02
Enriquecido B ₄ C	B ₁₀	5.3642E-02
	B ₁₁	2.8884E-02

En las Tabla 1.21 y 1.22 en la primera columna se muestra la composición del núclido y las siguientes cinco columnas se muestra las densidades de cada isótopo que compone el núclido, ya que la parte activa del núcleo tiene una altura de 85.82 cm, el cual está dividido en cinco segmentos teniendo cada uno de ellos la altura que se proporciona en la primera fila de las Tablas.

Tabla 1.21 Densidades del ensamble combustible para el núcleo interno del núcleo Metálico*

Núclido	17.16 (cm)	34.33 (cm)	51.49 (cm)	68.66 (cm)	85.82 (cm)
U ₂₃₄	1.1369E-06	1.0856E-06	1.0727E-06	1.1028E-06	1.1759E-06
U ₂₃₅	3.0421E-05	2.9338E-05	2.8961E-05	3.0070E-05	3.2571E-05
U ₂₃₆	2.4897E-06	2.5117E-06	2.5536E-06	2.3779E-06	2.0226E-06
U ₂₃₈	1.9613E-02	1.9474E-02	1.9433E-02	1.9550E-02	1.9801E-02
Np ₂₃₇	4.6686E-05	4.6962E-05	4.6782E-05	4.7603E-05	4.8895E-05
Pu ₂₃₆	4.9700E-10	5.5883E-10	5.6701E-10	5.5075E-10	4.8775E-10
Pu ₂₃₈	1.1695E-04	1.1284E-04	1.1196E-04	1.1370E-04	1.1829E-04
Pu ₂₃₉	2.2076E-03	2.1814E-03	2.1754E-03	2.1813E-03	2.2011E-03
Pu ₂₄₀	1.3244E-03	1.2955E-03	1.2902E-03	1.2986E-03	1.3248E-03
Pu ₂₄₁	1.9375E-04	1.8610E-04	1.8518E-04	1.8537E-04	1.8845E-04
Pu ₂₄₂	2.9277E-04	2.8911E-04	2.8818E-04	2.9038E-04	2.9569E-04
Am ₂₄₁	1.0791E-04	1.0465E-04	1.0353E-04	1.0686E-04	1.1421E-04
Am _{242m}	9.2989E-06	9.0848E-06	9.0224E-06	9.1756E-06	9.4890E-06
Am ₂₄₃	1.0017E-04	9.8324E-05	9.7993E-05	9.8630E-05	1.0032E-04
Cm ₂₄₂	5.6250E-06	5.8208E-06	5.9476E-06	5.4901E-06	4.5416E-06
Cm ₂₄₃	5.4321E-07	5.0246E-07	5.1360E-07	4.8876E-07	4.8480E-07
Cm ₂₄₄	6.7240E-05	6.5722E-05	6.5622E-05	6.5349E-05	6.5394E-05
Cm ₂₄₅	1.7397E-05	1.6743E-05	1.6663E-05	1.6696E-05	1.7026E-05
Cm ₂₄₆	9.2285E-06	9.1426E-06	9.1307E-06	9.1364E-06	9.1805E-06
Zr	7.2802E-03	7.2802E-03	7.2802E-03	7.2802E-03	7.2802E-03
Mo	9.2873E-04	1.1464E-03	1.2031E-03	1.0625E-03	7.4065E-04

(*) Unidades en átomos/barn-cm

Tabla 1.22 Densidades del ensamble combustible para el núcleo externo del núcleo Metálico*

Núclido	17.16 (cm)	34.33 (cm)	51.49 (cm)	68.66 (cm)	85.82 (cm)
U ₂₃₄	1.6317E-06	1.5766E-06	1.5638E-06	1.5894E-06	1.6552E-06
U ₂₃₅	3.0822E-05	2.9870E-05	2.9561E-05	3.0391E-05	3.2250E-05
U ₂₃₆	1.7881E-06	1.8534E-06	1.8941E-06	1.7528E-06	1.4710E-06
U ₂₃₈	1.8244E-02	1.8144E-02	1.8115E-02	1.8119E-02	1.8359E-02
Np ₂₃₇	9.8244E-05	9.7300E-05	9.6775E-05	9.8481E-05	1.0175E-04
Pu ₂₃₆	7.1175E-10	8.2505E-10	8.4282E-10	8.0703E-10	6.8053E-10
Pu ₂₃₈	1.6436E-04	1.6026E-04	1.5949E-04	1.6063E-04	1.6416E-04
Pu ₂₃₉	2.8147E-03	2.7664E-03	2.7538E-03	2.7786E-03	2.8416E-03
Pu ₂₄₀	1.7467E-03	1.7190E-03	1.7135E-03	1.7231E-03	1.7508E-03
Pu ₂₄₁	2.8976E-04	2.8138E-04	2.8012E-04	2.8135E-04	2.8697E-04
Pu ₂₄₂	4.0754E-04	4.0412E-04	4.0321E-04	4.0530E-04	4.1028E-04
Am ₂₄₁	1.8607E-04	1.8127E-04	1.7970E-04	1.8397E-04	1.9339E-04
Am _{242m}	1.2185E-05	1.2045E-05	1.2021E-05	1.2039E-05	1.2064E-05
Am ₂₄₃	1.3234E-04	1.3019E-04	1.2985E-04	1.3036E-04	1.3206E-04
Cm ₂₄₂	6.4688E-06	6.8630E-06	7.0553E-06	6.4446E-06	5.1976E-06
Cm ₂₄₃	6.3471E-07	6.0893E-07	6.0900E-07	5.9753E-07	5.9372E-07
Cm ₂₄₄	8.0107E-05	7.8889E-05	7.8847E-05	7.8479E-05	7.8359E-05
Cm ₂₄₅	2.0200E-05	1.9678E-05	1.9613E-05	1.9635E-05	1.9913E-05
Cm ₂₄₆	1.0443E-05	1.0371E-05	1.0361E-05	1.0367E-05	1.0410E-05
Zr	7.2802E-03	7.2802E-03	7.2802E-03	7.2802E-03	7.2802E-03
Mo	8.1524E-04	1.0174E-03	1.0697E-03	9.4870E-04	6.6172E-04

(*) Unidades en átomos/barn-cm

1.6 Descripción del núcleo de óxido pequeño

En la Figura 1.22 se muestra la vista del ABR del núcleo de referencia de óxido, éste se compone de 180 ensambles de combustible, 114 ensambles reflectores radiales, 66 ensambles blindaje y 19 ensambles de control. Su núcleo está dividido en tres: uno interno, otro denominado medio y uno más llamado externo y están compuestos por 30, 90 y 92 ensambles combustibles, respectivamente.

Los parámetros del núcleo de óxido son en su mayoría parecidos a los parámetros de los ensambles del núcleo metálico.

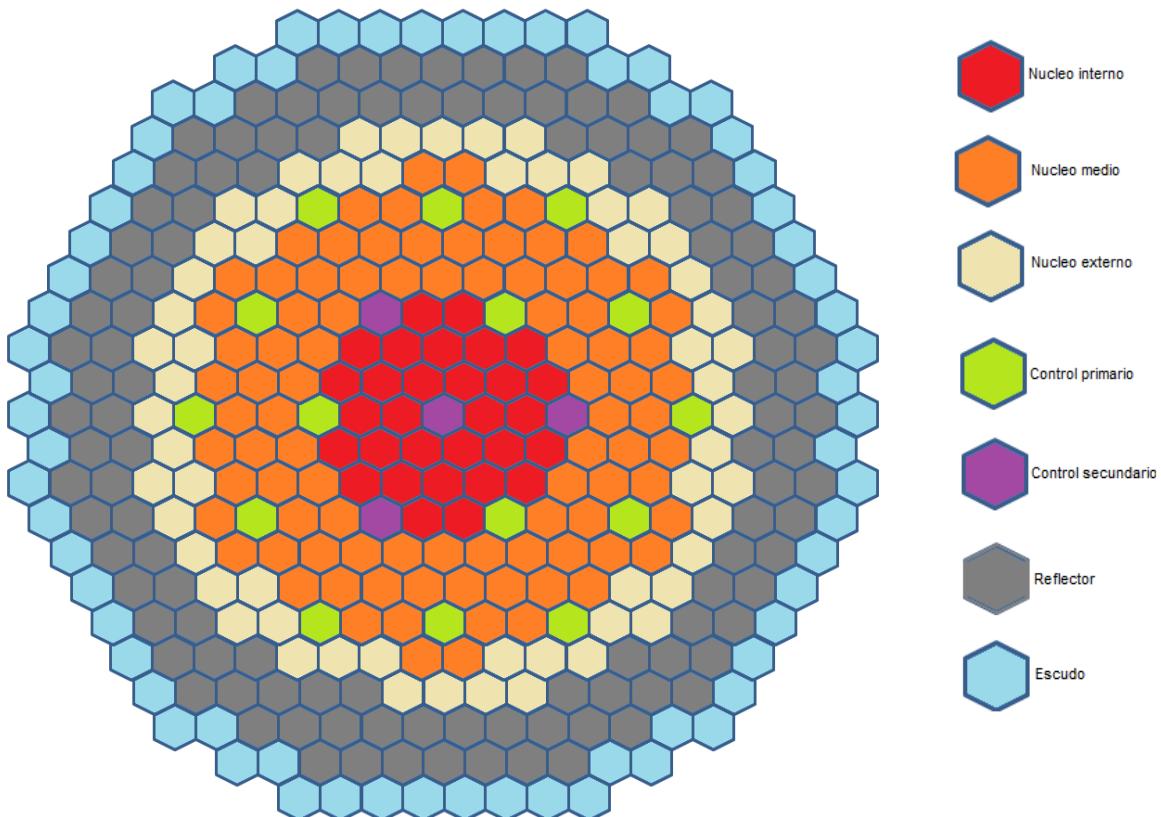


Figura 1.22 Vista del núcleo de Óxido pequeño

La potencia y las temperaturas son iguales a las del núcleo metálico, a excepción de la temperatura del núcleo medio del ensamble de combustible. Se supone que la temperatura promedio del óxido de combustible es de 1,027 C.

1.6.1 Descripción del ensamble combustible

Los parámetros del ensamble se muestran en la Tabla 1.23 y en la Figura 1.23 se observa una vista axial y radial del ensamble de combustible, el material que se utiliza para el ensamble, el revestimiento y el conducto es HT-9.

Tabla 1.23 Parámetros del ensamble combustible del núcleo de Óxido pequeño

	Unidad	
Altura del ensamble	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		112.39
-Altura del núcleo activo		114.94
-Gas		172.41
-Estructura superior		44.7
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conducto exterior del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del conducto del ensamble		0.3966
Número de pines		271
Radio exterior del encamisado	cm	0.3928
Radio interior del encamisado		0.03322

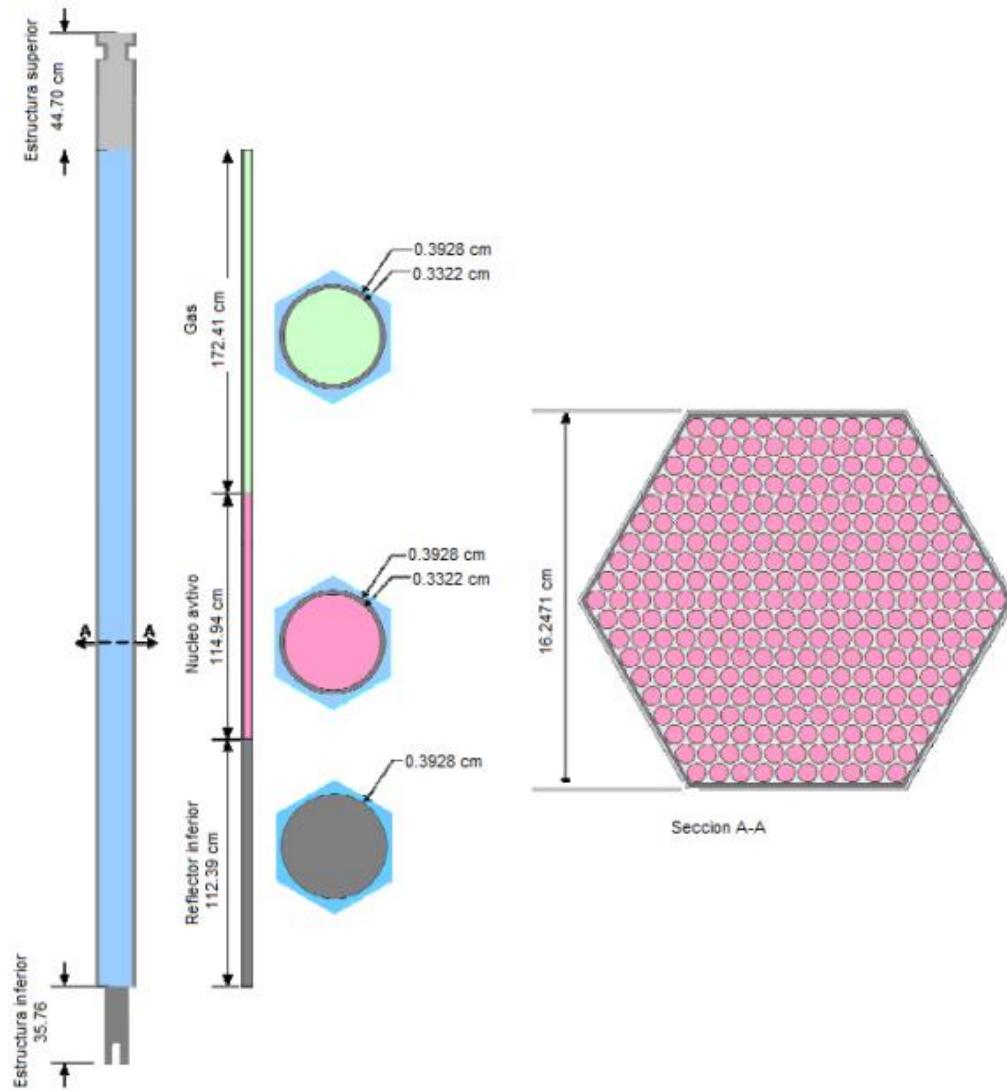


Figura 1.23 Vista axial y radial del ensamble combustible del núcleo de Óxido pequeño

1.6.2 Descripción del ensamble blindaje

El material que utiliza es HT-9 para el revestimiento, el conducto y el ensamblaje, los parámetros se observan en la Tabla 1.24 y en la Figura 1.24 se puede observar una vista axial y radial del ensamblaje.

Tabla 1.24 Parámetros del ensamble blindaje del núcleo de Óxido pequeño

	Unidad	
Altura del ensamble	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		112.39
-Blindaje radial		287.35
-Estructura superior		40.7
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conducto exterior del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del conducto del ensamble		0.3966
Número de pins		19
Radio exterior		1.6794
Radio interior	cm	1.4277

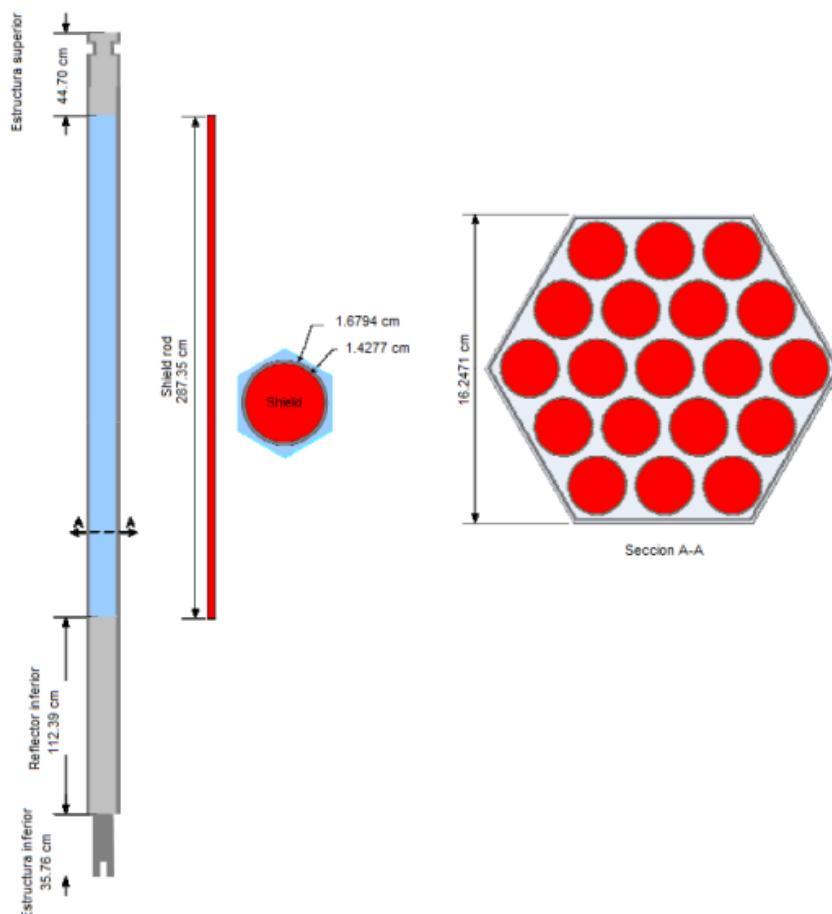


Figura 1.24 Vista axial y radial del ensamble blindaje del núcleo de Óxido pequeño

1.6.3. Descripción del ensamble de control

En la Tabla 1.25 están los parámetros del ensamble, así como en la Figura 1.25 se observa la vista axial y radial de dicho ensamble. El ensamble de control está compuesto por carburo de boro el cual tiene la misma altura que el núcleo activo del ensamble de combustible, ya que al insertar barras queda el carburo de boro en la misma posición que la parte activa del núcleo.

Tabla 1.25 Parámetros del ensamble de control del núcleo de Óxido pequeño

	Unidad	
Altura del ensamble de combustible	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		112.39
-Absorbedor		119.97
-Conducto vacío		212.08
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conductor del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del ducto del ensamble		0.3966
Distancia externa del conducto interno plano-plano		14.214
Espesor del conducto interno		0.3966
Número de pines		7
Radio externo del encamisado	cm	2.3606
Radio interno del encamisado		2.289

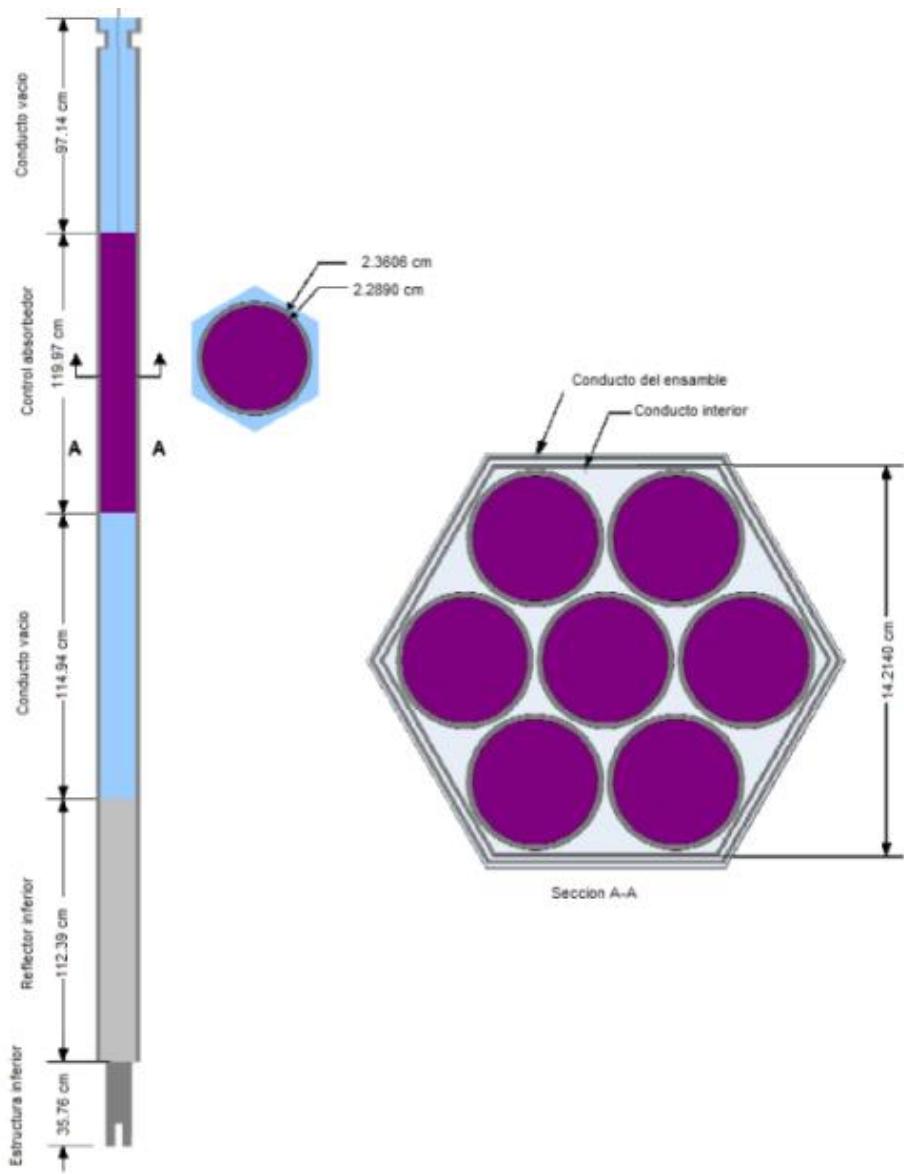


Figura 1.25 Vista axial y radial del ensamble control del núcleo de Óxido pequeño

1.6.4. Descripción del ensamble reflector

Los parámetros del ensamble reflector se muestran en la Tabla 1.26, se observa cuantos segmentos tiene el ensamble así como su altura de cada uno, l distancia que hay entre el centro de un ensamble al centro de otro (pitch), el número de pastillas (pin) y en la Figura 1.26 se muestra la vista axial y radial de dicho ensamble.

Tabla 1.26 Parámetros del ensamble reflector del núcleo de Óxido pequeño

	Unidad	
Altura del ensamble	cm	480.2
-Estructura inferior		35.76
-Reflector inferior		112.39
-Reflector radial		287.35
-Estructura superior		40.7
Pitch del ensamble	cm	16.2471
Distancia del conducto exterior del ensamble plano-plano		15.8123
Espesor del conducto del ensamble		0.3966
Número de pins		91
Radio	cm	0.7756

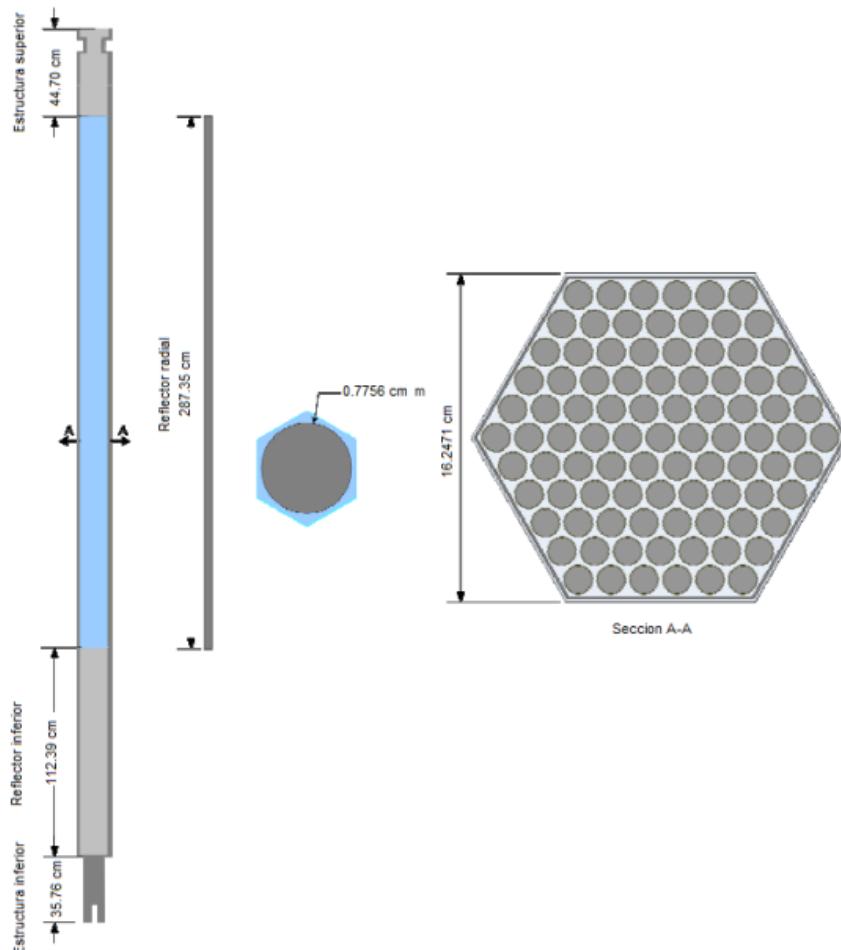


Figura 1.26 Vista axial y radial del ensamble reflector del núcleo de Óxido pequeño

1.6.5. Descripción de los materiales

En la Tabla 1.27 se proporciona el porcentaje en volumen para los materiales de los ensambles que tiene el núcleo de óxido.

Para la composición del combustible se utiliza la base de datos ABR, el núcleo está dividido en 5 segmentos axiales, por lo tanto tenemos 15 materiales diferentes, 5 para cada núcleo (interno, medio y externo respectivamente). Se muestran en las Tablas 1.28 a la 1.30.

Los materiales del refrigerante y las estructuras son iguales a las que tiene el núcleo metálico.

Tabla 1.27 Porcentaje de volumen del núcleo de Óxido pequeño

Región	Refrigerante	HT-9	Combustible	Natural B ₄ C	Enriquecido B ₄ C
Estructura inferior	Mezcla homogénea de SS-316 y Sodio				
Reflector inferior	33.27	66.73	-	-	-
Estructura superior	33.27	66.73	-	-	-
Driver	Núcleo activo	33.27	25.64	41.09	-
	Gas	33.27	25.64	-	-
Reflector radial	15.5	84.5	-	-	-
Blindaje radial	17.1	29.68	-	53.22	-
Absorbedor en el ensamble de control	28.83	20.77	-	-	50.4
Conducto vacío en el ensamble de control	90.74	9.26	-	-	-

En las Tablas 1.28, 1.29 y 1.30, en la primera columna se muestra la composición del núclido y las siguientes cinco columnas muestran las densidades de cada isótopo que compone el núclido, ya que la parte activa del núcleo tiene una altura de 100.55 cm, la cual está dividida en cinco segmentos cuya altura se proporciona en la primera fila de las Tablas.

Tabla 1.28 Densidad del ensamble combustible para el núcleo interno del núcleo de Óxido pequeño*

Núclido	22.99 (cm)	45.98 (cm)	68.96 (cm)	91.95 (cm)	114.94 (cm)
U ₂₃₄	1.6447E-06	1.5173E-06	1.4786E-06	1.5459E-06	1.7187E-06
U ₂₃₅	2.2148E-05	1.9773E-05	1.9063E-05	2.0326E-05	2.4028E-05
U ₂₃₆	2.7420E-06	3.0518E-06	3.1560E-06	2.9636E-06	2.3408E-06
U ₂₃₈	1.5260E-02	1.5263E-02	1.5155E-02	1.5342E-02	1.5804E-02
Np ₂₃₇	2.8455E-05	2.7231E-05	2.6699E-05	2.7645E-04	3.0062E-05
Pu ₂₃₆	2.6787E-10	3.0567E-10	3.1027E-10	3.0165E-10	2.6100E-10
Pu ₂₃₈	1.0478E-04	9.9425E-05	9.7979E-05	1.0044E-04	1.0650E-04
Pu ₂₃₉	1.7966E-03	1.7969E-03	1.7950E-03	1.7977E-03	1.7949E-03
Pu ₂₄₀	1.2659E-03	1.2398E-03	1.2352E-03	1.2427E-03	1.2665E-03
Pu ₂₄₁	2.0302E-04	2.0015E-04	2.0069E-04	1.9942E-04	1.9665E-04
Pu ₂₄₂	2.7492E-04	2.6951E-04	2.6801E-04	2.7060E-04	2.7751E-04
Am ₂₄₁	1.0157E-04	9.2311E-05	8.9477E-05	9.4499E-05	1.0862E-04
Am _{242m}	8.5597E-06	8.0757E-06	7.9066E-06	8.1989E-06	8.8286E-06
Am ₂₄₃	9.0780E-05	8.8952E-05	8.8520E-05	8.9254E-05	9.1126E-05
Cm ₂₄₂	5.2317E-06	6.0295E-06	6.2924E-06	5.8156E-06	4.3648E-06
Cm ₂₄₃	6.2354E-07	6.5464E-07	6.7759E-07	6.3601E-07	5.5773E-07
Cm ₂₄₄	6.8704E-05	6.9053E-05	6.9488E-05	6.8673E-05	6.6685E-05
Cm ₂₄₅	2.0198E-05	1.9681E-05	1.9724E-05	1.9628E-05	1.9641E-05
Cm ₂₄₆	1.2227E-05	1.2189E-05	1.2198E-05	1.2182E-05	1.2175E-05
O ₁₆	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02
Mo	9.9952E-04	1.3906E-03	1.5100E-03	1.3041E-03	7.9560E-04

(*) Unidades en átomos/barn-cm

Tabla 1.29 Densidad del ensamble combustible para el núcleo medio del núcleo de Óxido pequeño*

Núclido	22.99 (cm)	45.98 (cm)	68.96 (cm)	91.95 (cm)	114.94 (cm)
U ₂₃₄	2.0465E-06	1.9126E-06	1.8732E-06	1.9406E-06	2.1162E-06
U ₂₃₅	2.2682E-05	2.0487E-05	1.9835E-05	2.0978E-05	2.4330E-05
U ₂₃₆	2.3109E-06	2.6280E-06	2.7334E-06	2.5427E-06	1.9463E-06
U ₂₃₈	1.4972E-02	1.4695E-02	1.4608E-02	1.4757E-02	1.5136E-02
Np ₂₃₇	4.0907E-05	3.8847E-05	3.8073E-05	3.9439E-05	4.3081E-05
Pu ₂₃₆	3.4311E-10	3.9750E-09	4.0506E-10	3.9131E-10	3.3031E-10
Pu ₂₃₈	1.2787E-04	1.2257E-04	1.2120E-04	1.2349E-04	1.2912E-04
Pu ₂₃₉	2.0192E-03	1.9884E-03	1.9789E-03	1.9948E-03	2.0350E-03
Pu ₂₄₀	1.4917E-03	1.4584E-03	1.4514E-03	1.4629E-03	1.4962E-03
Pu ₂₄₁	2.3846E-04	2.3537E-04	2.3568E-04	2.3481E-04	2.3280E-04
Pu ₂₄₂	3.3130E-04	3.2522E-04	2.3358E-04	3.2638E-04	3.3390E-04
Am ₂₄₁	1.3318E-04	1.2228E-04	1.1897E-04	1.2476E-04	1.4113E-04
Am _{242m}	1.0409E-05	9.9923E-06	9.8445E-06	1.0094E-05	1.0571E-05
Am ₂₄₃	1.0795E-04	1.0617E-04	1.0574E-04	1.0646E-04	1.0836E-04
Cm ₂₄₂	5.4312E-06	6.4340E-06	6.7599E-06	6.1780E-06	4.4316E-06
Cm ₂₄₃	6.7016E-07	6.9834E-07	7.1920E-07	6.8204E-07	6.1805E-07
Cm ₂₄₄	7.8031E-05	7.8523E-05	7.8991E-05	7.8125E-05	7.6004E-05
Cm ₂₄₅	2.2913E-05	2.2393E-05	2.2414E-05	2.2359E-05	2.2485E-05
Cm ₂₄₆	1.4005E-05	1.3948E-05	1.3949E-05	1.3946E-05	1.3968E-05
O ₁₆	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02
Mo	9.4050E-04	1.3135E-03	1.4238E-03	1.2352E-03	7.4992E-04

(*) Unidades en átomos/barn-cm

Tabla 1.30 Densidad del ensamble combustible para el núcleo externo del núcleo de Óxido pequeño*

Núclido	22.99 (cm)	45.98 (cm)	68.96 (cm)	91.95 (cm)	114.94 (cm)
U ₂₃₄	2.6988E-06	2.6165E-06	2.5937E-06	2.6318E-06	2.7258E-06
U ₂₃₅	2.3608E-05	2.2094E-05	2.1619E-05	2.2437E-05	2.4556E-05
U ₂₃₆	1.6709E-06	1.9238E-06	2.0136E-06	1.8557E-06	1.4522E-06
U ₂₃₈	1.3148E-02	1.3003E-02	1.2957E-02	1.3036E-02	1.3226E-02
Np ₂₃₇	9.2076E-05	8.8023E-05	8.6593E-05	8.9074E-05	9.5114E-05
Pu ₂₃₆	4.5834E-10	5.6008E-10	5.7870E-10	5.4614E-10	4.2758E-10
Pu ₂₃₈	1.6474E-04	1.6257E-04	1.6222E-04	1.6271E-04	1.6393E-04
Pu ₂₃₉	2.4843E-03	2.4268E-03	2.4096E-03	2.4387E-03	2.5140E-03
Pu ₂₄₀	1.7818E-03	1.7561E-03	1.7505E-03	1.7595E-03	1.7854E-03
Pu ₂₄₁	3.1516E-04	3.1113E-04	3.1085E-04	3.1111E-04	3.1325E-04
Pu ₂₄₂	4.1709E-04	4.1260E-04	4.1141E-04	4.1341E-04	4.1866E-04
Am ₂₄₁	2.1009E-04	1.9871E-04	1.9509E-04	2.0133E-04	2.1720E-04
Am _{242m}	1.2218E-05	1.2292E-05	1.2303E-05	1.2272E-05	1.2020E-05
Am ₂₄₃	1.2806E-04	1.2703E-04	1.2682E-04	1.2717E-04	1.2818E-04
Cm ₂₄₂	5.2929E-06	6.4415E-06	6.8371E-06	6.1466E-06	4.3903E-06
Cm ₂₄₃	6.9679E-07	7.1777E-07	7.3352E-07	7.0640E-07	6.7018E-07
Cm ₂₄₄	8.1967E-05	8.2744E-05	8.3252E-05	8.2346E-05	8.0531E-05
Cm ₂₄₅	2.3635E-05	2.3305E-05	2.3329E-05	2.3275E-05	2.3406E-05
Cm ₂₄₆	1.3986E-05	1.3948E-05	1.3948E-05	1.3947E-05	1.3970E-05
O ₁₆	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02	4.1265E-02
Mo	7.0138E-04	9.6980E-04	1.0490E-03	9.1486E-04	5.7735E-04

(*) Unidades en átomos/barn-cm

CAPÍTULO **2**

SERPENT

En este capítulo se describe el método de Monte Carlo y el código SERPENT, el cual tiene un formato libre. También se describirá la estructura de los archivos de entrada así como algunos de los elementos e instrucciones que utiliza el código SERPENT para que se elabore un archivo de entrada.

2.1 Método de Monte Carlo

El código SERPENT usa el método de Monte Carlo [8-10] para realizar cálculos en aplicaciones nucleares. Los cálculos de blindaje y los análisis neutrónicos (flujo) se obtienen mediante el muestreo de un gran número de historias de partículas individuales, cuyas trayectorias se simulan por un cálculo numérico.

El método de Monte Carlo está basado en la generación de una secuencia de números aleatorios, que es utilizada junto con una estadística para simular el proceso deseado. Este algoritmo consiste generalmente en generar números aleatorios que se encuentren dentro de un dominio, para después calcular un resultado con una ecuación. Este tipo de algoritmo es bueno para hacer cálculos con un gran número de grados.

El código de Monte Carlo es adecuado para los cálculos de transporte de neutrones, debido al hecho de que los neutrones no interactúan unos con otros. Esto permite que el cálculo se base en un neutrón a la vez. Estos tipos de códigos se basan generalmente en ciclos, y cada ciclo consta de un número fijo de neutrones que se simulan uno a uno.

Cada uno de los neutrones que se tienen inicialmente, inician en una posición en particular y un número aleatoriamente es mostrado para determinar la dirección del movimiento, otro número aleatorio se usa para determinar la longitud del camino, cuando se observa que la longitud es larga entonces el neutrón interactúa con un núcleo, entonces se toma en cuenta otro número aleatorio para definir la interacción que hay, una vez que esto sucede entonces otro neutrón aparecerá e iniciará el proceso. Cada vez que el proceso se complete, es decir, desde la creación del neutrón hasta su desaparición entonces se llamará historia de neutrones.

Un ciclo es un número fijo de historias de neutrones. Cada vez que termina un ciclo, otro comienza con los neutrones colocados en las posiciones en las que el ciclo anterior los creó. Los datos obtenidos entre los ciclos se utilizan al final del cálculo para obtener algunos resultados.

Una ventaja de utilizar códigos basados en el método de Monte Carlo es por su versatilidad, ya que el código permite utilizar los datos de sección eficaz para modelar cualquier configuración de combustible o reactor sin que se pierda el esquema del cálculo.

2.2 Descripción del código SERPENT

El código SERPENT [11] está basado en el método de Monte Carlo, el código es desarrollado bajo la dirección de Jaakko Leppänen (El programa fue parte de su tesis doctoral). El código sirve para la obtención de secciones eficaces, la construcción de núcleos y celdas en 2D y 3D, también se especializa en la generación de constantes de grupos (secciones eficaces XS), cálculo de quemado y es un código de fuente abierta, también utiliza datos de interacción en formato ENDF, leídos en formato ACE bibliotecas de sección eficaz.

El programa se ejecuta en el sistema operativo Linux, tiene la capacidad de realizar cálculos paralelos, esto es posible por el algoritmo que se utiliza en los cálculos de Monte Carlo. El código SERPENT no tiene una interfaz visual de usuario, todo se realiza desde la línea de instrucciones u órdenes en una terminal. Para que el código SERPENT pueda ejecutar un archivo de entrada se tiene que hacer desde una terminal con el archivo ejecutable “./sss” una vez que termina de correr el archivo SERPENT produce varios archivos de salida que son:

<name>.out : muestra el proceso que se enlistó en la terminal
<name>.seed : contiene a la semilla generada por el código
<name>_res.m : contiene los resultados del cálculo de k_{eff} , XS, fórmula de los 6 factores, etc.

Todas las salidas de cálculo se escriben en formato Matlab (m-formato) para simplificar el post-procesamiento simultáneo de varios casos de cálculo. El código también tiene la capacidad de realizar gráficos mediante la instrucción plotter.

2.3 Archivo de entrada

Para realizar un archivo de entrada se escribe el input en cualquier editor de texto simple, como el Gas el cual tiene un formato libre. Se proporcionan algunas reglas básicas que se toman en cuenta como es: el nombre del archivo de entrada para que SERPENT lo reconozca, también se definen varios elementos como son: pin, lattice, superficies, celdas, materiales, bibliotecas, slots, mes, etc.

2.3.1 Descripción del elemento pin

Este elemento se utiliza para la generación de celdas de combustible, refrigerante, reflector, etc. Dicho elemento se define de la siguiente forma: con un nombre, también se define el radio del pin así como el material que utiliza como se puede observar en el siguiente ejemplo.

```
% --- Fuel:  
pin 1  
Fuel1 0.3319  
He 0.3470  
ODS 0.3954  
Na
```

2.3.2 Descripción del elemento lattice

Es un arreglo ordenado, este elemento lattice depende del tipo de arreglo que se pretenda utilizar para contener a los elementos pins.

Existen 4 tipos para 2D

- Cuadrado
- Hexagonal del tipo X
- Hexagonal del tipo Y
- Circular

Para utilizar el elemento lattice considerando una forma de cuadrado o hexágono se define de la siguiente forma:

lat. <u0> <tipo> <x0> <y0> <no> <ni> <p>

<u0> = nombre del lattice

<tipo> = tipo del lattice (1. cuadrado, 2. hexagonal tipo X, 3. hexagonal tipo Y)

<x0> = coordenadas en x

<y0> = coordenadas en y

<nx> = número de elementos en la dirección x

<ny> = número de elementos en la dirección y

<p> = pitch

Para utilizar el elemento lattice considerando una forma circular se define de la siguiente forma:

lat <u0> <type> <x0> <y0> <nr>

<u0> = nombre del lattice

<type> = tipo del lattice (4)

<x0> = coordenadas en x

<y0> = coordenadas en y

<nr> = número de anillos en el arreglo

y 5 tipos diferentes para 3D

- Cúbico,
- Prisma hexagonal del tipo X
- Prisma hexagonal del tipo Y
- Apilar verticalmente
- Cuboidal

Para utilizar el elemento lattice considerando una forma cubica y prisma hexagonal se define de la siguiente forma:

lat <u0> <type> <x0> <y0> <p>

$\langle u_0 \rangle$ = nombre del lattice

<type> = tipo del lattice (6. Cubica, 7. prisma hexagonal tipo X, 8. prisma hexagonal tipo Y)

$\langle x_0 \rangle$ = coordenadas en X

<y0> = coordenadas en Y

$\langle p \rangle$ = pitch

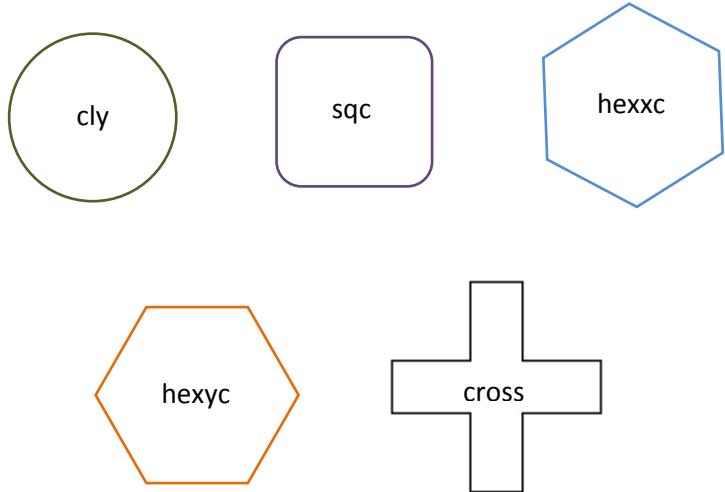
Un ejemplo del elemento lattices para 2D del tipo hexagonal X se observa a continuación:

lat 35 2 0.0 0.0 27 27 0.8850

2.3.3 Descripción de la geometría

Para definir la geometría que tiene el núcleo, existen diferentes tipos de superficies que son:

- Cilíndricas (cly)
- Cuadrado (scq)
- Hexagonal (hexxc,hexyc)
- Cruz (cross)



2.3.4 Descripción de los materiales

Se utiliza “mat” para cuando se quiere definir un material, seguido de un nombre, y después la información sobre la composición isotópica de dicho material. La composición del material se puede definir con diferentes unidades ya sea masa atómica (-) o densidad atómica (+). Un ejemplo es el siguiente:

La composición del combustible 1 tiene los siguientes elementos U, Np, Pu, Am, Cm, Mo y C, entonces para definirlos en SERPENT se utiliza la siguiente estructura:

```
mat <nombre> < dens >
<iso> <frac1>
```

donde "iso" indica el nombre del núclido y "frac1" indica la fracción, "sum" nos indica que el valor se calcula a partir de la composición isotópica como se observa a continuación:

```
mat Fuel1 sum
92234.03c 1.1919E-06
92235.03c 4.6799E-05
92236.03c 2.8136E-06
92238.03c 2.2303E-02
93237.03c 2.5168E-06
93239.03c 3.5946E-06
94238.03c 1.0646E-04
94239.03c 1.8140E-03
94240.03c 1.0229E-03
94241.03c 2.4210E-04
94242.03c 3.4136E-04
95241.03c 3.7572E-05
```

```
95242.03c 1.0156E-08  
95242.03c 6.9199E-07  
95243.03c 1.4205E-05  
96242.03c 1.0156E-08  
96243.03c 1.6209E-06  
96244.03c 4.3067E-08  
96245.03c 1.0655E-06  
96246.03c 2.7855E-08  
96244.03c 3.6683E-10  
42000.03c 1.3400E-03  
6000.03c 2.6385E-02
```

2.3.5 Visualización usando plot y mesh

La instrucción plot funciona para el diseño de imágenes y poder visualizar el núcleo sin correr todo el archivo de entrada. La instrucción se da de la siguiente forma:

```
plot 3 5000 5000 100
```

donde 3 indica el plano "xy", los dos 5000 indican la resolución (pixeles) de la imagen y 100 la altura en z, en la Figura 2.1 se visualiza una salida de esta instrucción.

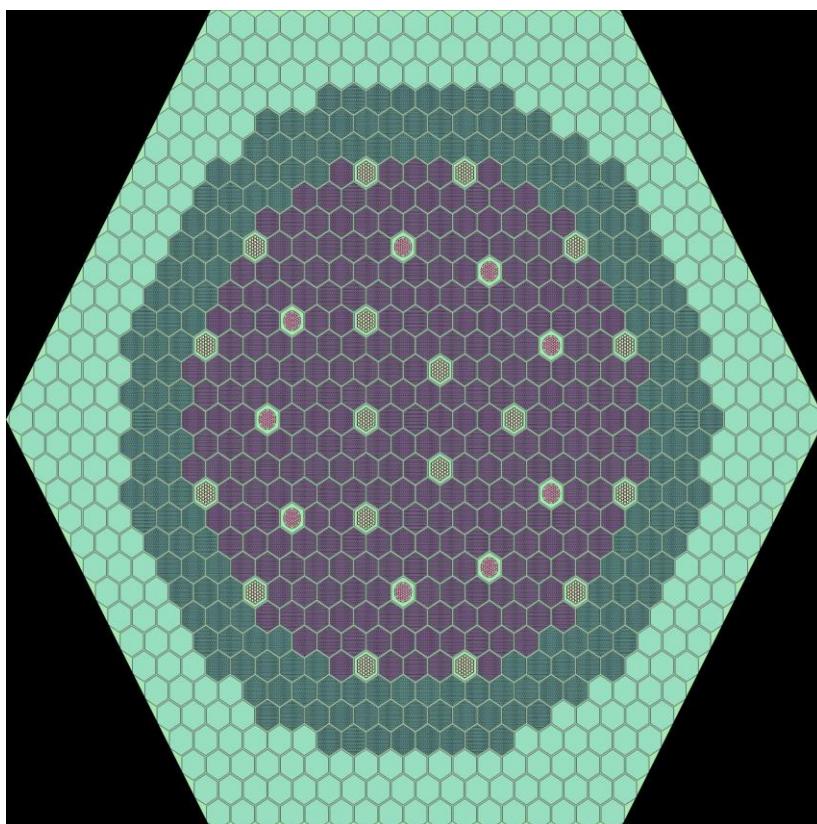


Figura 2.1 Visualización del núcleo usando la instrucción plot

En la Figura 2.1 se visualizan los diferentes ensambles del núcleo con distintos colores, indicando cada color a cuál ensamble corresponde. El ensamble combustible del núcleo interno está indicado

por el color morado, el ensamble del núcleo externo con el color verde fuerte, el ensamble reflector con el color verde claro, el ensamble del sistema de control primario en color amarillo y el ensamble del sistema de control secundario en color rosa.

La instrucción mesh permite visualizar los resultados de la neutrónica, la Figura 2.2 se observa una vez que el archivo de entrada terminó de correr. La instrucción es parecida a la instrucción de plot. En este caso los colores más intensos aquellos que tienden a ser negros representan los valores más bajos del flujo de neutrones mientras que los más claros representan los valores más altos de éste.

Mesh 3 5000 5000

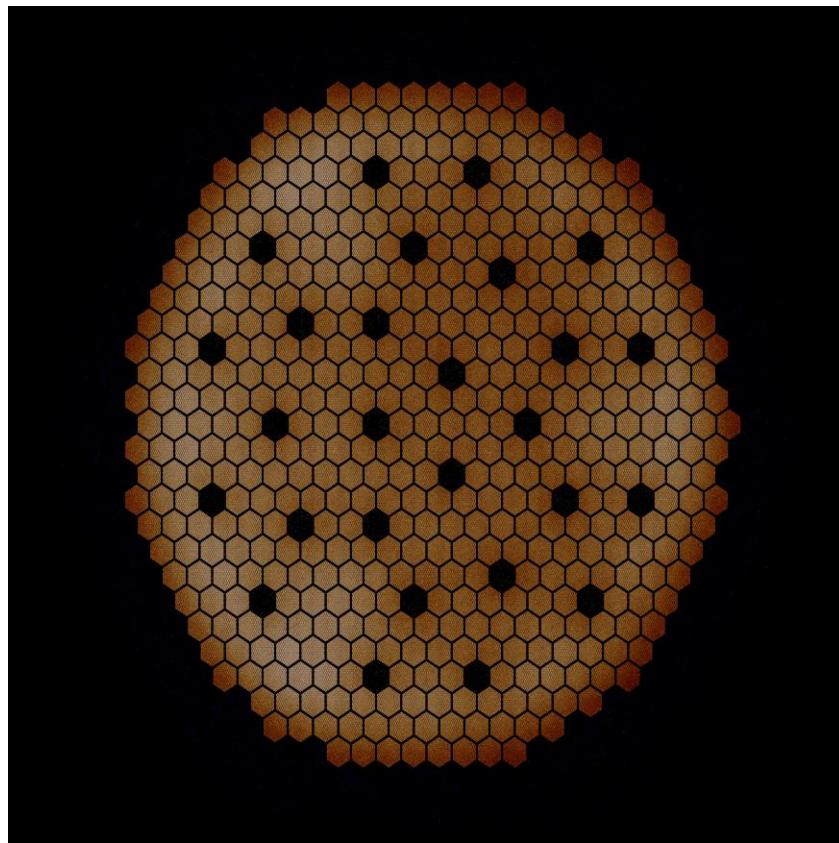


Figura 2.2 Visualización del núcleo usando la instrucción mesh

2.3.6 Biblioteca de secciones eficaces (xs)

Para utilizar las bibliotecas de secciones eficaces (XS) se utiliza la opción “set gcu” que permite calcular las XS de todo el universo (0) o de un universo en específico.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA USANDO SERPENT

En este capítulo se describen los archivos de entrada utilizando el código SERPENT [11], para los 4 núcleos que se están estudiando en esta tesis, se va a hacer la simulación en 2 y 3 dimensiones respectivamente. Para los archivos de 2D se va a simular cada segmento por separado que constituye a cada ensamble diferente de los núcleos, para los segmentos que no tienen fisiones como son el sodio, gas, reflector, y absorbedor entonces alrededor de dicho material se coloca un material combustible (hay fisiones) ya que SERPENT marca error al no tener un material que genere fisiones. Para los archivos en 3D se definirá el núcleo completo del reactor SFR.

3.1 Archivos de entrada para 2D

Se crearon varios archivos de entrada en el código SERPENT para los 4 diferentes núcleos tipo SFR, en el Apéndice A se encuentran todos los archivos que se realizaron para este trabajo, a continuación se describirá un archivo de entrada en el cual se puede observar la estructura que tienen (para los demás archivos el formato es igual) para obtener varios parámetros como son la k_{eff} y las XS.

Se creó el archivo de entrada para los diferentes tipos de combustibles. El formato de las distintas variables que se definen en el archivo de entrada es libre, es decir que el usuario no tiene que colocar en un lugar preciso de una línea y con una cantidad de dígitos el valor numérico de dicha variable. A continuación se muestra un ejemplo para el núcleo Metálico (pequeño):

Se define el título del caso bajo análisis:

```
% ---SFR Core -----
set title "Fuel1"
```

A continuación se definen las librerías que se utilizan para la creación de las XS, en este caso se usó la JEFF 3.11

```
set declib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.dec"
set nfylib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.nfy"
set acelib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311u.xsdata"
```

Inmediatamente después, se define la condición de frontera (bc), SERPENT tiene tres opciones para la condición de frontera: 1-nula, 2-reflectiva, 3-periodica, para nuestro caso utilizamos la opción 2, también se define la semilla (seed) en caso de ser necesario.

```
set ures 1
set bc 2
%set seed 1426702825
```

Acto seguido se define la simetría (sym), para cuando la geometría es un hexágono, hay dos opciones que la simetría sea de 6 o 12, en este caso se utilizó la simetría de 12. Ya que la selección de los cortes energéticos va más allá del propósito de este trabajo de tesis se utilizaron los cortes energéticos (nfg), un total de 4, definidos en la Ref. [12].

```
set gcu 0
set sym 12
set nfg 4 2.15443E-03 4.64159E-02 4.00000E-01
```

Ahora, se utiliza la estructura "set pop" para indicar el número de neutrones en este caso se trabajaron con 200000, se indicaron los ciclos activos (500) y por último los ciclos inactivos (100), también se utiliza "set power" que indica la potencia.

```
set pop 200000 500 100  
set power 1.0E+09 W
```

Una vez definido lo anterior se procede a definir los pins que se van a ocupar en donde se indica el material que contiene, así como sus radios.

%--pins--%

pin 99
Na

Driver

pin 1
Fuel1 0.3236
HT9 0.3857
Na

Después se define el lattice donde, 32 indica el nombre con el cual se va llamar el lattice, el 2 indica el tipo de lattice que se utiliza en este caso es hexagonal, los dos 0.0 indican las coordenadas en "X" y "Y", los 21 indican el número de elementos que hay en "X" y "Y" y por último el 0.8966 indica el pitch.

%%-----Lattices / Driver / Combustible-----

lat 32 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

```
%%%-----Universos-----
```

```
% --- Universo 65 --- --- FuelI
```

```
surf C0 hexyc 0.0 0.0 7.70785  
surf C1 hexyc 0.0 0.0 7.90615  
surf C2 hexyc 0.0 0.0 8.12355  
cell C6 0 fill 32 -C0  
cell C7 0 HT9 C0 -C1  
cell C8 0 Na C1 -C2  
cell C9 0 outside C2
```

Después de lo anterior se define la composición de los materiales que se utilizan.

```
%---Materiales del ESFR--- %%
```

```
mat FuelI sum
```

```
92234.03c 1.1369E-06  
92235.03c 3.0421E-05  
92236.03c 2.4896E-06  
92238.03c 1.9613E-02  
93237.03c 4.6686E-05  
94236.03c 4.9700E-10  
94238.03c 1.1695E-04  
94239.03c 2.2076E-03  
94240.03c 1.3244E-03  
94241.03c 1.9375E-04  
94243.03c 2.9277E-04  
95241.03c 1.0791E-04  
95242.03c 9.2989E-06  
95243.03c 1.0017E-04  
96242.03c 5.6250E-06  
96243.03c 5.4321E-07  
96244.03c 6.7240E-05  
96245.03c 1.7397E-05  
96246.03c 9.2285E-06  
40000.03c 7.2802E-03  
42000.03c 9.2873E-04
```

```
mat Na -0.681
```

```
11023.03c 2.2272E-02
```

```
mat He sum
```

```
2004.03c 1.50455E-11
```

Por último se definen las instrucciones plot y mesh

```
% ----- Plot-----
```

```
plot 1 5000 5000  
plot 2 5000 5000  
plot 3 5000 5000 100
```

```
plot 3 5000 5000 30  
mesh 1 5000 5000  
mesh 2 5000 5000  
mesh 3 5000 5000
```

En la Figura 3.1 se observa una imagen del archivo de entrada que se creó.

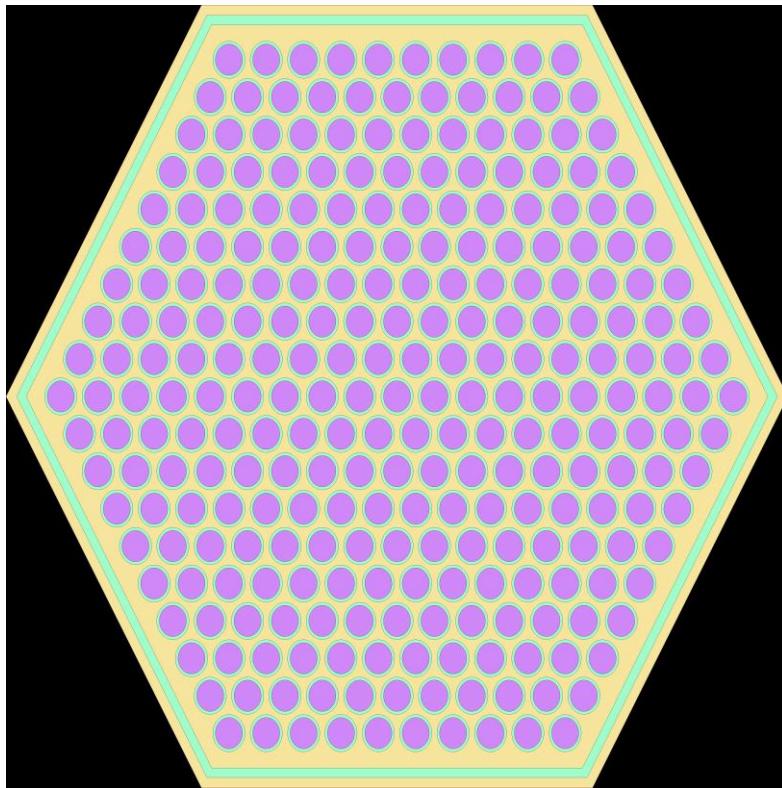


Figura 3.1 Segmento del ensamble combustible del núcleo Metálico

Para crear los archivos de entrada de los materiales cuando no hay fisiones, lo único que se hace es que alrededor del material (reflector, absorbedor, etc.) se coloca un material combustible (fisiones) como se puede observar a continuación:

Igual se definen los pins, los lattices, universos y celdas de los materiales que se van a ocupar en este caso se define para un material absorbedor entonces alrededor se coloca combustible (mat 1, indica la primera composición de un segmento de la parte activa del núcleo interno del ensamblaje combustible).

Se creó un lattice donde se colocan los diferentes universos que se le asignan a los materiales que se ocupan, los universos se identifican asignándole un número entero, en este caso ocupamos 700, 200 y 100 para identificar los universos a utilizar para los materiales.

El universo 700 indica un ensamblaje vacío, el 200 nos indica un material absorbedor y el 100 indica un material combustible.

% --- Universo del núcleo del SFR -----

% --- Core lattice

lat 119 3 0.0 0.0 5 5 16.2471

700 700 700 700 700

700 700 100 100 700

700 100 200 100 700

700 100 100 700 700

700 700 700 700 700

% --- REACTOR CORE -----

surf B001 hexxc 0.0 0.0 24.37065

cell B005 0 fill 119 -B001

cell B006 0 outside B001

En la Figura 3.2 se observa un segmento del ensamble control indicando los dos materiales que se están simulando, el hexágono que contiene pins color naranja indica un material absorbedor y los hexágonos a su alrededor indican un material combustible.

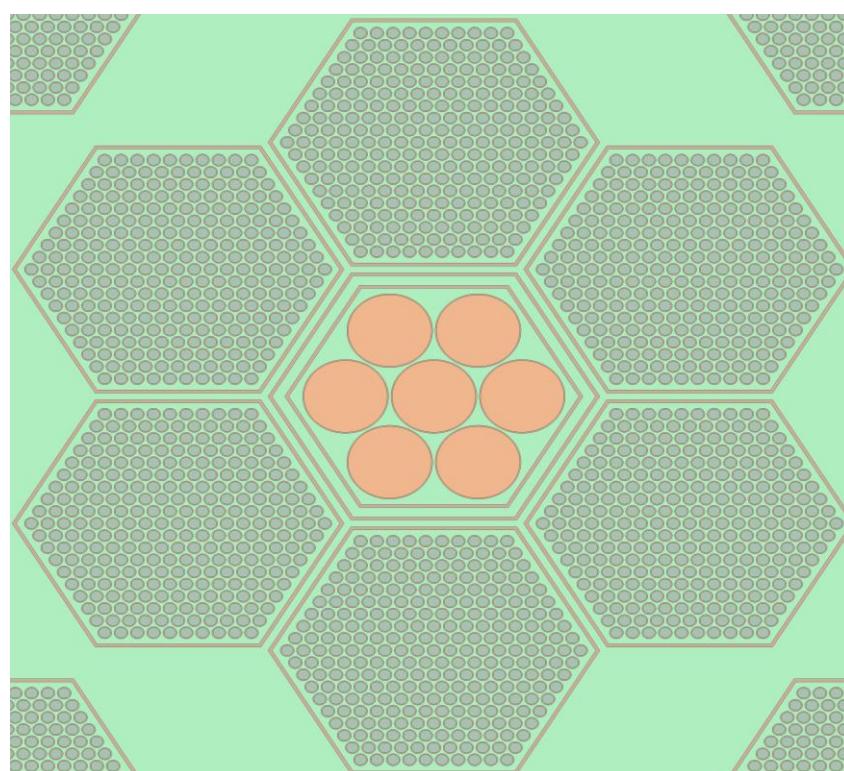


Figura 3.2 Segmento del ensamble control del núcleo Metálico

3.2 Archivos de entrada para 3D

Se crearon varios archivos de entrada en el código SERPENT para los 4 diferentes núcleos del SFR, en el Apéndice B se encuentran todos los archivos que se realizaron en este trabajo, a continuación se describirá un archivo de entrada para uno de los núcleos con los cuales se está trabajando en este caso, se describirá el núcleo de Óxido.

Título del problema

```
% ---Nombre -----
set title "oxide core"
```

definición de las librerías, en este caso se utiliza la "jeff 3.1"

% --- Librerías

```
set declib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.dec"
set nfylib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.nfy"
set acelib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311u.xsdata"
```

bc indica la condición de frontera, en este caso se utiliza la condición de frontera denominada "black" que se refiere a que todos los neutrones que salen del sistema no pueden regresar y se define la semilla (seed) que emplea el generador de números aleatorios.

```
set ures 1
set bc 1
set seed 1424108708
```

"set gcu", nos genera las secciones eficaces (XS), 0 indica el universo general, es decir nos indica las XS del núcleo completo del SFR, del 16-23 y del 40-48 indica las XS de cada segmento del ensamble combustible del núcleo interno y del externo respectivamente, del 52-53 y del 57-58 los segmentos del ensamble del sistema primario y el sistema secundario respectivamente, el 24,49,54,59,y 60 nos indica que se requiere la generación de XS de los ensambles completos de combustibles (interno y externo), ensamble reflector y ensambles de sistema primario y secundario respectivamente , "set sym" indica la simetría que se utiliza en este caso es 12 y "set nfg" es para indicar cuantos cortes energético se van a utilizar, en este caso son 4.

```
set gcu 0
15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
40 41 42 43 44 45 46 47 48 49
52 53 54
57 58 59
60
set sym 12
set nfg 4 4.64159E-02 4.00000E-01 1.05000E+01
```

se utilizaron 200000 neutrones, 500 ciclos activos y 100 ciclos inactivos y se define la potencia (set power)

```
set pop 200000 500 100  
set power 3.60E+09 W
```

se definen todos los materiales que contiene el núcleo de Óxido para los diferentes ensambles solo se muestran algunos pins en el Apéndice B se pueden ver los archivos completos.

% --- Núcleo interno -----

% --- Fuel:

```
pin 1  
Fuel1 0.4742  
He 0.4893  
ODS 0.5419  
Na
```

% ---Gas:

```
pin 6  
He 0.4893  
ODS 0.5419  
Na
```

% --- Núcleo externo -----

% --- Fuel:

pin 27

```
Fuel7 0.4742  
He 0.4893  
ODS 0.5419  
Na
```

se define la estructura del lattices en donde se colocan los pin una vez definidos, la geometría del lattices en este caso va ser hexagonal.

% --- Núcleo externo -----

% -----Lattice-----

lat 33.2 0.0 0.0 21 21 1.1897

se definen varios universos para localizar los diferentes lattices y definir su superficie hexagonal así como su celda donde se indica el material que hay dentro o fuera de dicha superficie, todos los universos están en planos.

Por ejemplo para indicar el combustible 3 se define primero en que universo se va encontrar en este caso en el universo 15, luego definimos las superficies (surf) la cual tiene la siguiente estructura: se indica el nombre por el cual se reconoce la superficie, tipo de superficie que se utiliza y los parámetros

% --- Universo 15 --- Fuel3

surf A0 hexyc 0.0 0.0 9.92085 indica la superficie con el nombre (A0), el tipo de superficie en este caso es hexagonal (hexyc) la posición en "X" y "Y" respectivamente (0.0) y el radio (9.92085)

surfA1 hexyc 0.0 0.0 10.3734

surfA2 hexyc 0.0 0.0 10.61025

surfA3 pz -10.055

surfA4 pZ 10.055

cell A5 15 outside A4 la celda es para indicar que hay dentro o fuera de los límites de las superficies, también se indica el universo y a que superficie nos referimos.

cell A6 15 fill 10 -A0 A3 -A4

cell A7 15 EM10 A0 -A1 A3 -A4

cell A8 15 Na A1 -A2 A3 -A4

cell A9 15 Na A2 A3 -A4

cell A10 15 outside -A3

Se crea un universo donde se colocan todos los universos pequeños que indican los materiales por separado para la construcción del ensamble completo ya sea de combustible, ensamble reflector, ensamble control primario o secundario.

% --- Núcleo externo -----

% --- --- Universo 49 --- ---

surf S0 hexyc 0.0 0.0 10.61025

surf S1 pz -170.3623

surf S2 pz -80.4448

surf S3 pz -50.275

surf S4 pz -30.165

surf S5 pz -10.055

surf S6 pz 10.055

surf S7 pz 30.165

surf S8 pz 50.275

surf S9 pz 60.3316

surf S10 pz 140.7841

cell S11 49 outside S10

cell S12 49 fill 48 -S0 S9 -S10

cell S13 49 Na S0 S9 -S10

cell S14 49 fill 47 -S0 S8 -S9

cell S15 49 Na S0 S8 -S9

cell S16 49 fill 46 -S0 S7 -S8

cell S17 49 Na S0 S7 -S8

cell S18 49 fill 45 -S0 S6 -S7

cell S19 49 Na S0 S6 -S7

cell S20 49 fill 40 -S0 S5 -S6

cell S21 49 Na S0 S5 -S6

cell S22 49 fill 41 -S0 S4 -S5

cell S23 49 Na S0 S4 -S5

cell S24 49 fill 42 -S0 S3 -S4

cell S25 49 Na S0 S3 -S4

cell S26 49 fill 43 -S0 S2 -S3

cell S27 49 Na S0 S2 -S3

cell S28 49 fill 44 -S0 S1 -S2

cell S29 49 Na S0 S1 -S2

cell S30 49 outside -S1

una vez que se definieron los ensambles (combustible 24 y 49, reflector 60, control: primario 54 y secundario 59) con sus respectivos universos se creó un lattice donde se localizan como se observa.

% --- lattice del n\'ucleo

lat 61.3 0.0 0.0 35 35 21.2205

se definen las superficies que tiene el núcleo (hexagonal) completo y su altura, así también como la estructura de los materiales.

% --- REACTOR CORE -----

```

surf B01 hexxc 0.0 0.0 311.16 % core boundary
surf B02 pz -170.3623 % bottom
surf B03 pz 140.7841 % top

```

cell B04 0 outside B03
cell B05 0 fill 61 -B01 B02 -B03
cell B06 0 outside B01 B02 -B03
cell B07 0 outside -B02

%%% ---Materials for ESFR--- %%%

mat ODS -7.25

```

26000.03c 5.3872E-02
24000.03c 1.7753E-02
6000.03c 3.5740E-04
8016.03c 3.9924E-04
22000.03c 5.3824E-04
28000.03c 3.6588E-04

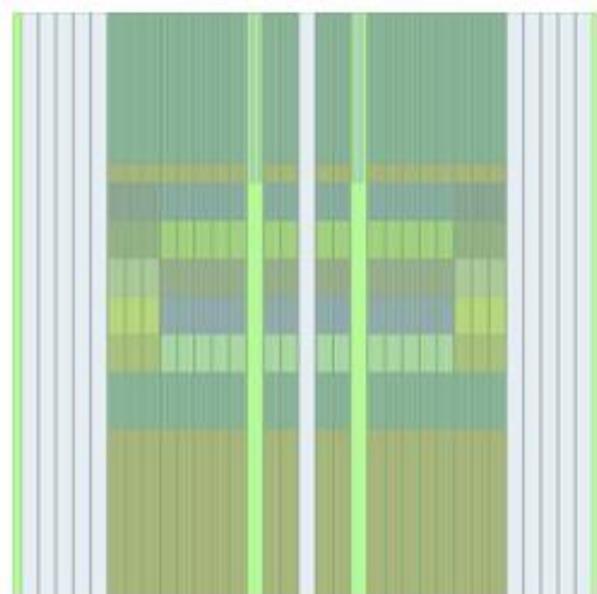
```

```
25055.03c 2.3441E-04  
15031.03c 2.7718E-05  
13027.03c 9.1482E-03  
27059.03c 2.1852E-04  
29000.03c 1.0135E-04  
39089.03c 2.6616E-04
```

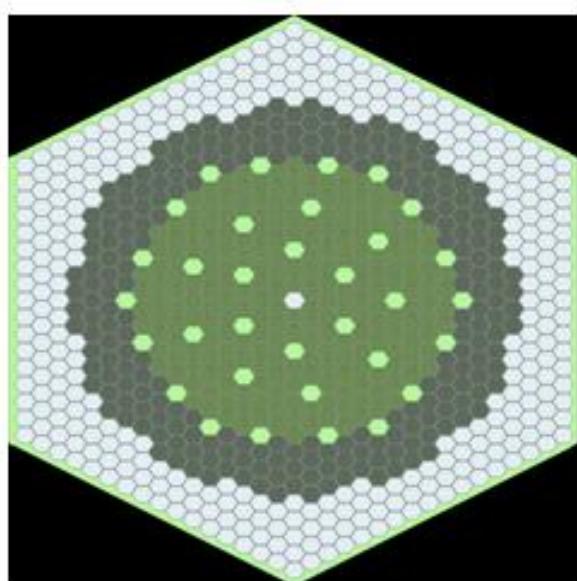
finalmente se utilizan las indicaciones plot y mesh en la Figura 3.3 se visualiza una vista axial y radial del núcleo completo en 3D.

```
% ----- Plot-----
```

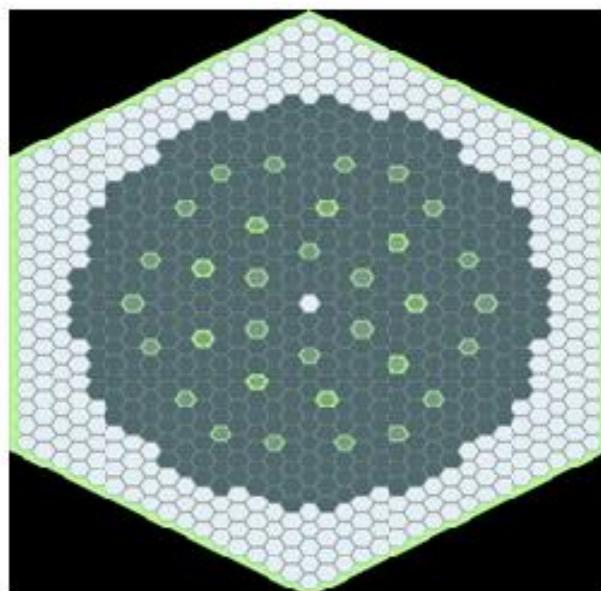
```
plot 1 5000 5000  
plot 2 5000 5000  
plot 3 5000 5000 100  
plot 3 5000 5000 30  
mesh 1 5000 5000  
mesh 2 5000 5000  
mesh 3 5000 5000
```



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3: a) vista axial del núcleo completo del SFR con las barras de control afuera, b) vista radial, se observan los diferentes ensambles, así como el núcleo interno (verde) y el externo (café), c) vista radial donde se distinguen los dos sistemas de control

CAPÍTULO 4

GENERACIÓN DE SECCIONES EFICACES (XS) CON EL CÓDIGO SERPENT

En este capítulo se habla sobre las secciones eficaces en 2 y 3 dimensiones respectivamente, las cuales se extrajeron de los archivos de salida que se generan con SERPENT, los valores de los parámetros que se ocupan son: coeficiente de difusión, remoción, el producto del número promedio de neutrones producidos por fisión por la sección de fisión, el espectro de fisión, la matriz de dispersión, lambda, beta y las velocidades, también se hablará de la estructura que tendrán los ensambles para distinguir cada material.

4.1 Secciones eficaces (xs) en 3D

Para la generación de las XS en 3D se consideran los ensambles completos, de los cuatro distintos núcleos del SFR, en la Figura 4.1 se observan los ensambles combustibles, ensambles reflectores, ensambles blindaje y ensambles de control. En las Tablas 4.1 a la 4.8 se muestran las XS para los distintos núcleos del SFR cuando las barras de control están todas en su totalidad extraídas y cuando las barras de control están en su totalidad dentro del núcleo. SERPENT también proporciona el factor de multiplicación el cual se observa en la Tabla 4.9 para los 4 núcleos. No es recomendable obtener las XS en tres dimensiones ya que el costo computacional sería demasiado alto.

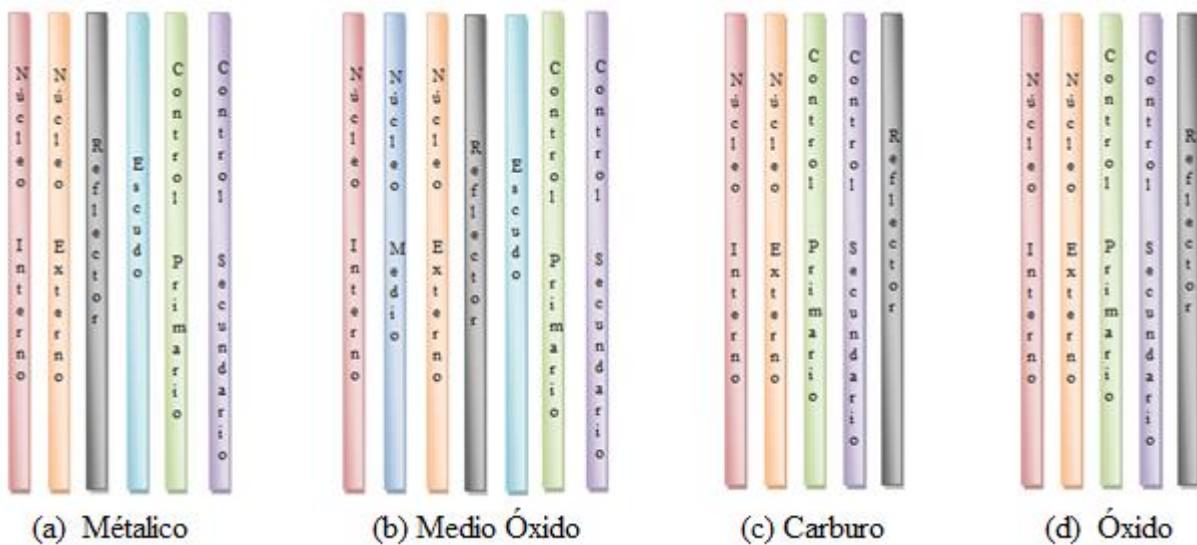


Figura 4.1 Vista de los ensambles de los núcleos del reactor SFR

En las Tablas 4.1 a 4.8 se muestran las secciones eficaces que son el coeficiente de difusión, la sigma de remoción, la matriz de dispersión, el espectro de fisión y el producto del número promedio de neutrones producidos por fisión por la sección de fisión del modelo 3D de cada núcleo.

Tabla 4.1 Secciones eficaces en 3D del núcleo Carburo (barras de control afuera)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
						0.00000E+00	5.00983E-02	4.90095E-03	1.78124E-04
1	1	5.36171E-02	4.09661E+00	7.28708E-02	1.30505E-03	0.00000E+00	5.00983E-02	4.90095E-03	1.78124E-04
	2	9.47777E-03	2.30162E+00	1.98899E-02	9.09310E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.54361E-02	2.30304E-04
	3	3.33553E-03	1.55450E+00	8.32829E-03	8.55298E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.56236E-03
	4	3.99923E-03	1.07986E+00	6.49822E-03	3.85541E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	5.24437E-02	4.18033E+00	7.10131E-02	1.31905E-03	0.00000E+00	4.88770E-02	4.93440E-03	1.51790E-04
	2	1.02544E-02	2.34531E+00	1.95329E-02	9.09417E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.48897E-02	2.22550E-04
	3	3.79005E-03	1.57647E+00	8.34702E-03	8.54063E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.46305E-03
	4	4.44922E-03	1.08568E+00	6.77477E-03	3.85774E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	0.00000E+00	1.02407E+01	3.01936E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.32750E-02	9.12127E-04	4.12018E-05
	2	0.00000E+00	4.29368E+00	8.98953E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.67823E-03	4.90841E-05
	3	0.00000E+00	3.14682E+00	5.42974E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.45401E-03
	4	0.00000E+00	2.18145E+00	3.54261E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	1.01675E+01	2.96688E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.33139E-02	9.01802E-04	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	4.33688E+00	9.21916E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.50863E-03	4.82090E-05
	3	0.00000E+00	3.27917E+00	6.02474E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.74710E-03
	4	0.00000E+00	2.33371E+00	3.49076E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	2.83664E+00	1.05948E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	9.00399E-02	6.14743E-03	1.39382E-04
	2	0.00000E+00	1.77622E+00	1.65257E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.59143E-02	2.45365E-04
	3	0.00000E+00	1.31997E+00	6.82350E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.45849E-03
	4	0.00000E+00	7.84679E-01	3.18517E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.2 Secciones efficaces en 3D del núcleo Carburo (barras de control adentro)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
1	1	5.36505E-02	4.09890E+00	7.26095E-02	1.30522E-03	0.00000E+00	4.97437E-02	4.98415E-03	1.73816E-04
	2	9.44359E-03	2.30787E+00	1.97429E-02	9.09229E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.53046E-02	2.30289E-04
	3	3.27192E-03	1.56647E+00	8.16453E-03	8.55982E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.45583E-03
	4	3.62812E-03	1.08066E+00	6.10562E-03	3.86783E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	5.27795E-02	4.17937E+00	7.11119E-02	1.32606E-03	0.00000E+00	4.90079E-02	4.82206E-03	1.36018E-04
	2	1.03435E-02	2.34502E+00	1.95108E-02	9.09474E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.48361E-02	2.23655E-04
	3	3.82999E-03	1.57108E+00	8.31847E-03	8.53646E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.40858E-03
	4	4.48890E-03	1.07652E+00	6.83381E-03	3.83498E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	0.00000E+00	5.55575E+00	5.66564E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	4.78017E-02	1.76682E-03	6.10475E-05
	2	0.00000E+00	2.59832E+00	1.95579E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.74722E-02	7.74629E-05
	3	0.00000E+00	1.89882E+00	1.48972E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.98875E-03
	4	0.00000E+00	1.68573E+00	1.18194E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	6.37715E+00	5.06967E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	3.88831E-02	1.77203E-03	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	2.84744E+00	2.14276E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.52031E-02	6.65709E-05
	3	0.00000E+00	2.27204E+00	1.87883E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.86765E-03
	4	0.00000E+00	2.09532E+00	1.13838E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	2.81831E+00	1.06302E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	8.85365E-02	6.18620E-03	3.01577E-04
	2	0.00000E+00	1.77699E+00	1.64599E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.58535E-02	2.45425E-04
	3	0.00000E+00	1.32060E+00	6.76370E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.39131E-03
	4	0.00000E+00	7.86587E-01	3.15971E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.3 Secciones eficaces en 3D del núcleo Óxido (barras de control afuera)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	Σ_{sl-g} [1/cm]			
1	1	5.51610E-02	3.56184E+00	8.16961E-02	1.30596E-03	0.00000E+00	5.51384E-02	4.82439E-03	1.64218E-04
	2	1.05560E-02	2.02198E+00	2.22232E-02	9.09529E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.73429E-02	2.24801E-04
	3	3.79608E-03	1.35367E+00	9.39560E-03	8.53007E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.33418E-03
	4	4.53629E-03	1.01818E+00	7.10997E-03	3.86443E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	5.63480E-02	3.57866E+00	8.16196E-02	1.31053E-03	0.00000E+00	5.45922E-02	4.96877E-03	1.50178E-04
	2	1.13260E-02	2.01826E+00	2.23623E-02	9.09411E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.72288E-02	2.24262E-04
	3	4.16998E-03	1.34350E+00	9.50711E-03	8.54323E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.27669E-03
	4	4.87068E-03	1.00753E+00	7.43389E-03	3.84588E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	0.00000E+00	1.01220E+01	2.96786E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.32604E-02	1.09327E-03	4.83647E-05
	2	0.00000E+00	4.38113E+00	7.75181E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.47866E-03	4.64242E-05
	3	0.00000E+00	3.19713E+00	5.33411E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.54082E-03
	4	0.00000E+00	2.23258E+00	2.81653E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	1.04633E+01	3.03427E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.26028E-02	1.00872E-03	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	4.42717E+00	7.82000E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.29214E-03	4.58657E-05
	3	0.00000E+00	3.31284E+00	5.73822E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.97500E-03
	4	0.00000E+00	2.35645E+00	2.76241E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	2.80562E+00	1.06424E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	8.97850E-02	6.26551E-03	2.43877E-04
	2	0.00000E+00	1.74827E+00	1.58667E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.52542E-02	2.25768E-04
	3	0.00000E+00	1.29023E+00	7.14235E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.76594E-03
	4	0.00000E+00	7.70485E-01	3.26712E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.4 Secciones eficaces en 3D del núcleo Óxido (barras de control adentro)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
						$MW/10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]
1	1	5.50812E-02	3.56697E+00	8.17923E-02	1.31663E-03	0.00000E+00	5.50879E-02	4.77189E-03	1.53416E-04
	2	1.05102E-02	2.02823E+00	2.20002E-02	9.09457E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.71436E-02	2.24052E-04
	3	3.70774E-03	1.36738E+00	9.16065E-03	8.53949E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.17545E-03
	4	4.04089E-03	1.02166E+00	6.58290E-03	3.83166E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	5.68943E-02	3.55268E+00	8.20152E-02	1.31681E-03	0.00000E+00	5.50009E-02	4.87090E-03	1.39781E-04
	2	1.14392E-02	2.01714E+00	2.23239E-02	9.09422E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.71454E-02	2.26454E-04
	3	4.23136E-03	1.33428E+00	9.47367E-03	8.53959E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.20660E-03
	4	4.92503E-03	9.92092E-01	7.52179E-03	3.86497E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	0.00000E+00	5.70751E+00	5.45229E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	4.49723E-02	2.40386E-03	4.88866E-05
	2	0.00000E+00	2.61181E+00	1.81884E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.61084E-02	7.07109E-05
	3	0.00000E+00	1.88499E+00	1.54879E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.51566E-03
	4	0.00000E+00	1.66173E+00	1.21858E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	7.85394E+00	4.12685E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	3.47650E-02	7.97159E-04	1.58401E-04
	2	0.00000E+00	3.04015E+00	1.97595E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.34915E-02	4.19169E-05
	3	0.00000E+00	2.39310E+00	1.93407E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.12678E-03
	4	0.00000E+00	2.42822E+00	1.18246E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	2.69318E+00	1.10519E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	9.16255E-02	6.37147E-03	1.86438E-04
	2	0.00000E+00	1.74890E+00	1.58250E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.52108E-02	2.25293E-04
	3	0.00000E+00	1.29163E+00	7.07746E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.69760E-03
	4	0.00000E+00	7.72789E-01	3.23682E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.5 Secciones eficaces en 3D del núcleo Metálico (barras control afuera)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
						$MW/10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]
1	1	4.80164E-02	4.54981E+00	6.47821E-02	1.34921E-03	0.00000E+00	4.43443E-02	4.47249E-03	1.43291E-04
	2	8.82928E-03	2.66288E+00	1.51394E-02	9.10009E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.10202E-02	2.13735E-04
	3	3.36936E-03	1.88166E+00	5.27996E-03	8.48343E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.70664E-03
	4	2.82905E-03	1.16045E+00	4.93494E-03	3.80717E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	5.15460E-02	4.52635E+00	6.49679E-02	1.34518E-03	0.00000E+00	4.42689E-02	4.48590E-03	1.34656E-04
	2	1.04274E-02	2.67960E+00	1.53913E-02	9.10066E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.07526E-02	2.12324E-04
	3	3.92065E-03	1.90087E+00	5.46321E-03	8.48010E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.66947E-03
	4	3.28425E-03	1.17327E+00	5.27779E-03	3.78781E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	0.00000E+00	3.07432E+00	9.88006E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	8.07085E-02	6.25161E-03	1.40299E-04
	2	0.00000E+00	2.18526E+00	1.38053E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.31768E-02	2.36110E-04
	3	0.00000E+00	1.83580E+00	4.25411E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.90659E-03
	4	0.00000E+00	9.98330E-01	2.60154E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	4.59772E+00	8.22609E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	6.91139E-02	9.11600E-03	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	1.61617E+00	4.94394E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.49819E-02	1.04426E-04
	3	0.00000E+00	1.18212E+00	2.87364E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.75135E-02
	4	0.00000E+00	7.51350E-01	2.64046E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	1.01102E+01	2.95292E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.34916E-02	1.17653E-03	3.72921E-05
	2	0.00000E+00	4.36110E+00	9.67007E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.62509E-03	6.12419E-05
	3	0.00000E+00	3.11080E+00	6.43869E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.89612E-03
	4	0.00000E+00	1.67880E+00	6.15252E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.6 Secciones eficaces en 3D del núcleo Metálico (barras de control adentro)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
1	1	4.78870E-02	4.51444E+00	6.51407E-02	1.33795E-03	0.00000E+00	4.48998E-02	4.51010E-03	1.52447E-04
	2	8.93475E-03	2.68074E+00	1.49769E-02	9.09992E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.08268E-02	2.15365E-04
	3	3.28106E-03	1.91869E+00	5.01894E-03	8.48814E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.52682E-03
	4	2.32687E-03	1.20821E+00	4.29301E-03	3.78853E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	5.09246E-02	4.54678E+00	6.46990E-02	1.34050E-03	0.00000E+00	4.41031E-02	4.31612E-03	1.10154E-04
	2	1.03746E-02	2.70971E+00	1.51160E-02	9.10090E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.05111E-02	2.13254E-04
	3	3.58676E-03	1.98051E+00	5.07666E-03	8.47638E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.52492E-03
	4	2.19738E-03	1.25767E+00	4.03002E-03	3.80582E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	0.00000E+00	3.12358E+00	9.71554E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	7.97637E-02	6.42770E-03	1.28187E-04
	2	0.00000E+00	2.18786E+00	1.36896E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.30502E-02	2.38003E-04
	3	0.00000E+00	1.83893E+00	4.21881E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.86445E-03
	4	0.00000E+00	9.81823E-01	2.76148E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	4.57712E+00	9.22779E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	7.16346E-02	5.47196E-03	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	1.61272E+00	4.95500E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.50578E-02	1.06582E-04
	3	0.00000E+00	1.17399E+00	2.90870E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.76198E-02
	4	0.00000E+00	7.48277E-01	2.72645E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	4.76084E+00	6.75346E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	5.24981E-02	2.11407E-03	6.88793E-05
	2	0.00000E+00	2.04776E+00	3.75570E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.39813E-02	7.54477E-05
	3	0.00000E+00	1.63120E+00	3.27908E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.97020E-03
	4	0.00000E+00	1.31210E+00	1.51121E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
6	1	0.00000E+00	1.03078E+01	2.89013E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.30130E-02	1.08060E-03	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	4.36015E+00	9.78979E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.60397E-03	6.06789E-05
	3	0.00000E+00	3.11668E+00	6.65455E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.79464E-03
	4	0.00000E+00	1.70335E+00	7.48919E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.7 Secciones eficaces en 3D del núcleo de Óxido pequeño (barras de control afuera)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg \rightarrow g}$ [1/cm]			
						MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg \rightarrow g}$ [1/cm]
1	1	4.23144E-02	4.12068E+00	7.07902E-02	1.32696E-03	0.00000E+00	4.91758E-02	4.12465E-03	1.22688E-04
	2	8.90842E-03	2.34351E+00	1.86724E-02	9.09654E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.46664E-02	1.92546E-04
	3	3.46424E-03	1.56479E+00	8.11870E-03	8.51981E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.49414E-03
	4	4.89750E-03	1.06361E+00	6.93912E-03	3.82058E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	4.40555E-02	4.11241E+00	7.12072E-02	1.36448E-03	0.00000E+00	4.88703E-02	4.01111E-03	1.26969E-04
	2	9.91213E-03	2.34792E+00	1.88170E-02	9.09450E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.44805E-02	1.94418E-04
	3	3.94588E-03	1.56352E+00	8.16985E-03	8.53423E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.33996E-03
	4	5.37180E-03	1.06998E+00	7.12734E-03	3.84335E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	4.65450E-02	4.18815E+00	6.97787E-02	1.37809E-03	0.00000E+00	4.74393E-02	3.65232E-03	1.00605E-04
	2	1.16257E-02	2.38344E+00	1.89718E-02	9.09337E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.41256E-02	1.89638E-04
	3	4.81410E-03	1.60376E+00	8.24788E-03	8.54572E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.11198E-03
	4	6.67732E-03	1.10293E+00	7.76347E-03	3.82738E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	2.99641E+00	9.91280E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	8.25686E-02	6.21576E-03	1.71794E-04
	2	0.00000E+00	2.10010E+00	1.26432E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.20512E-02	2.17176E-04
	3	0.00000E+00	1.66920E+00	4.83942E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.48643E-03
	4	0.00000E+00	9.64016E-01	2.54560E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	3.87002E+00	1.11462E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.10118E-01	3.11016E-03	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	1.54570E+00	5.19489E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.71191E-02	9.79206E-05
	3	0.00000E+00	1.07526E+00	3.41680E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.07332E-02
	4	0.00000E+00	7.32398E-01	3.47671E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
6	1	0.00000E+00	1.06958E+01	2.77187E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.20020E-02	1.02811E-03	2.69005E-05
	2	0.00000E+00	4.59838E+00	7.42168E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.68208E-03	5.13287E-05
	3	0.00000E+00	3.18217E+00	6.06462E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.64523E-03
	4	0.00000E+00	1.94058E+00	4.36649E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.8 Secciones eficaces en 3D del núcleo de Óxido pequeño (barras de control adentro)

Material	Grupo de Energía g	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	Σ_{eg} $MW/10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg \rightarrow g}$ [1/cm]			
1	1	4.24483E-02	4.11607E+00	7.07637E-02	1.34747E-03	0.00000E+00	4.89375E-02	4.03739E-03	1.46429E-04
	2	9.01946E-03	2.35228E+00	1.84662E-02	9.09573E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.44194E-02	1.94773E-04
	3	3.45884E-03	1.57724E+00	7.80830E-03	8.52483E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.20590E-03
	4	4.54864E-03	1.09427E+00	6.47655E-03	3.83086E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	4.37074E-02	4.12773E+00	7.04958E-02	1.35940E-03	0.00000E+00	4.84947E-02	3.90861E-03	1.29973E-04
	2	9.86963E-03	2.37145E+00	1.83732E-02	9.09560E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.40653E-02	1.93383E-04
	3	3.77565E-03	1.61069E+00	7.61565E-03	8.52641E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.92510E-03
	4	4.27131E-03	1.14150E+00	5.90306E-03	3.81692E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	4.62320E-02	4.16047E+00	7.06454E-02	1.39233E-03	0.00000E+00	4.74682E-02	3.85259E-03	1.06129E-04
	2	1.15366E-02	2.41021E+00	1.85211E-02	9.09578E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.37212E-02	1.89072E-04
	3	4.53684E-03	1.66699E+00	7.63471E-03	8.51935E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.68820E-03
	4	5.17894E-03	1.19635E+00	6.28724E-03	3.83596E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	0.00000E+00	3.11418E+00	9.65830E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	8.07832E-02	5.94662E-03	1.45360E-04
	2	0.00000E+00	2.10102E+00	1.26420E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.20364E-02	2.18038E-04
	3	0.00000E+00	1.67238E+00	4.75936E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.40278E-03
	4	0.00000E+00	9.58873E-01	2.64993E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	0.00000E+00	4.13350E+00	1.00684E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	1.00849E-01	2.45665E-03	1.87332E-03
	2	0.00000E+00	1.54238E+00	5.22040E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.73497E-02	9.70675E-05
	3	0.00000E+00	1.06514E+00	3.47709E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.10142E-02
	4	0.00000E+00	7.28629E-01	3.62791E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
6	1	0.00000E+00	4.72674E+00	6.78508E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	5.60433E-02	1.92902E-03	6.94420E-05
	2	0.00000E+00	2.04068E+00	3.26336E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.15901E-02	6.38389E-05
	3	0.00000E+00	1.46553E+00	3.62151E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.24804E-03
	4	0.00000E+00	1.23876E+00	2.76973E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7	1	0.00000E+00	1.05205E+01	2.90642E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.19842E-02	1.30035E-03	0.00000E+00
	2	0.00000E+00	4.60792E+00	7.41188E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.66147E-03	5.18339E-05
	3	0.00000E+00	3.19080E+00	6.17796E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.58192E-03
	4	0.00000E+00	1.96609E+00	5.20574E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

En la Tabla 4.9 se observa el factor de multiplicación para tres casos, cuando los sistemas de control primario y secundario están en su totalidad extraídos (ARO), cuando los sistemas primarios están en su totalidad insertados y los sistemas secundarios están en su totalidad extraídos (ARI_p) y por último cuando los sistemas primarios y secundarios están en su totalidad insertados (ARI_{ps}).

Tabla 4.9 Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos con todos los ensambles de control afuera (ARO), con los ensambles de control primario adentro (ARI_p) y con los ensambles primario y secundario adentro (ARI_{ps})

Núcleo	SERPENT 3D		
	k_{eff}	ARI_p	ARI_{ps}
ARO	1.05763	1.03011	1.01507
Óxido	1.06795	1.02928	1.01246
Metálico	1.03755	0.900364	0.835966
Óxido Pequeño	1.08116	0.938865	0.877197

4.1 Secciones eficaces (xs) en 2D

Para obtener las secciones eficaces en 2D se utilizó el código SERPENT, para el núcleo de carburo y el núcleo de óxido, dividiendo los ensambles en 9 segmentos. Para obtener las XS se simuló cada segmento de los ensambles, tomando en cuenta para los materiales combustibles únicamente el segmento de cada parte del núcleo activo (ver Figura 4.2). Para obtener las XS de los materiales no combustibles se colocó alrededor de éstos un material combustible, y dependiendo de la posición del material no combustible, se considera el material combustible a utilizar. En la Figura 4.3 se observan algunos ejemplos.

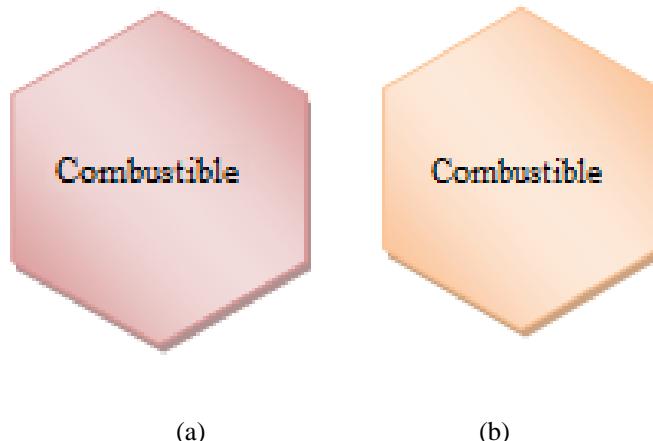


Figura 4.2 Vista de un segmento combustible del núcleo a) interno (rojo) y el núcleo b) externo (naranja) para los núcleos de Carburo y Óxido

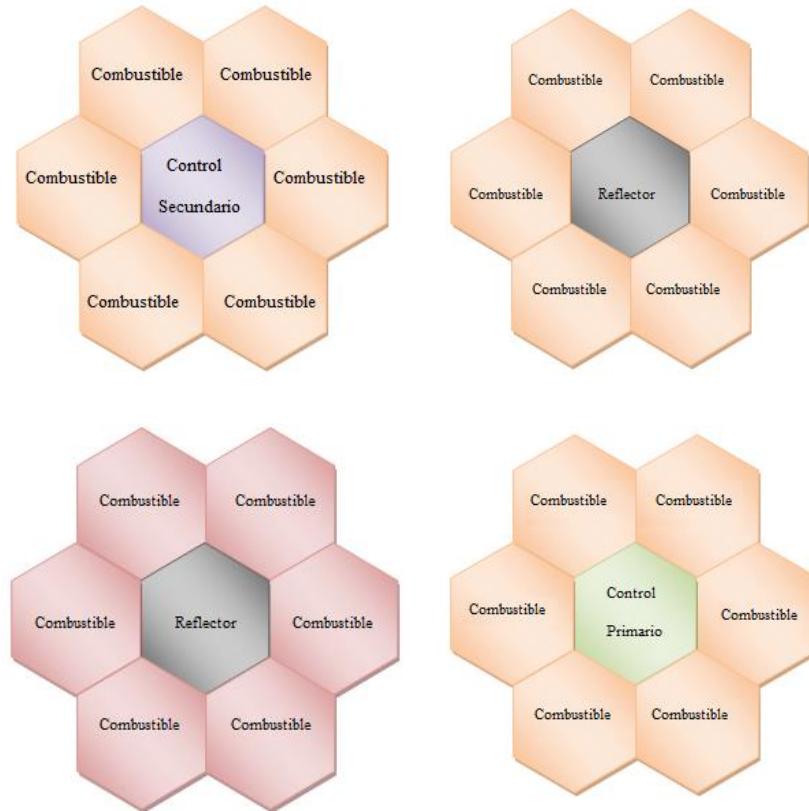


Figura 4.3 Vista de materiales no combustibles rodeados con materiales combustibles

Para los núcleos de potencia de 1000MWt (Metálico y Óxido pequeño) los ensambles se dividen en 11 segmentos, se utilizó el mismo procedimiento para obtener las XS. En la Figura 4.4 sólo se muestran los segmentos combustibles de los núcleos: interno, medio y externo, y en la Figura 4.5 se observan algunos materiales no combustibles rodeados con materiales combustibles para obtener las XS de dichos materiales.

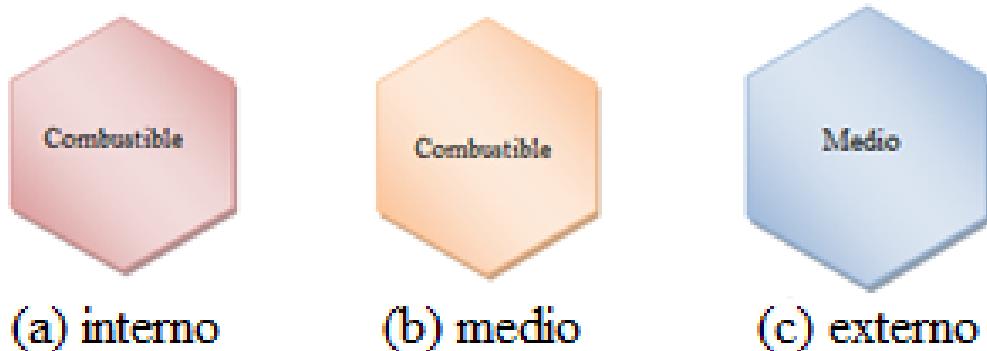


Figura. 4.4 Vista de materiales combustibles del núcleo Metálico y núcleo de Óxido pequeño

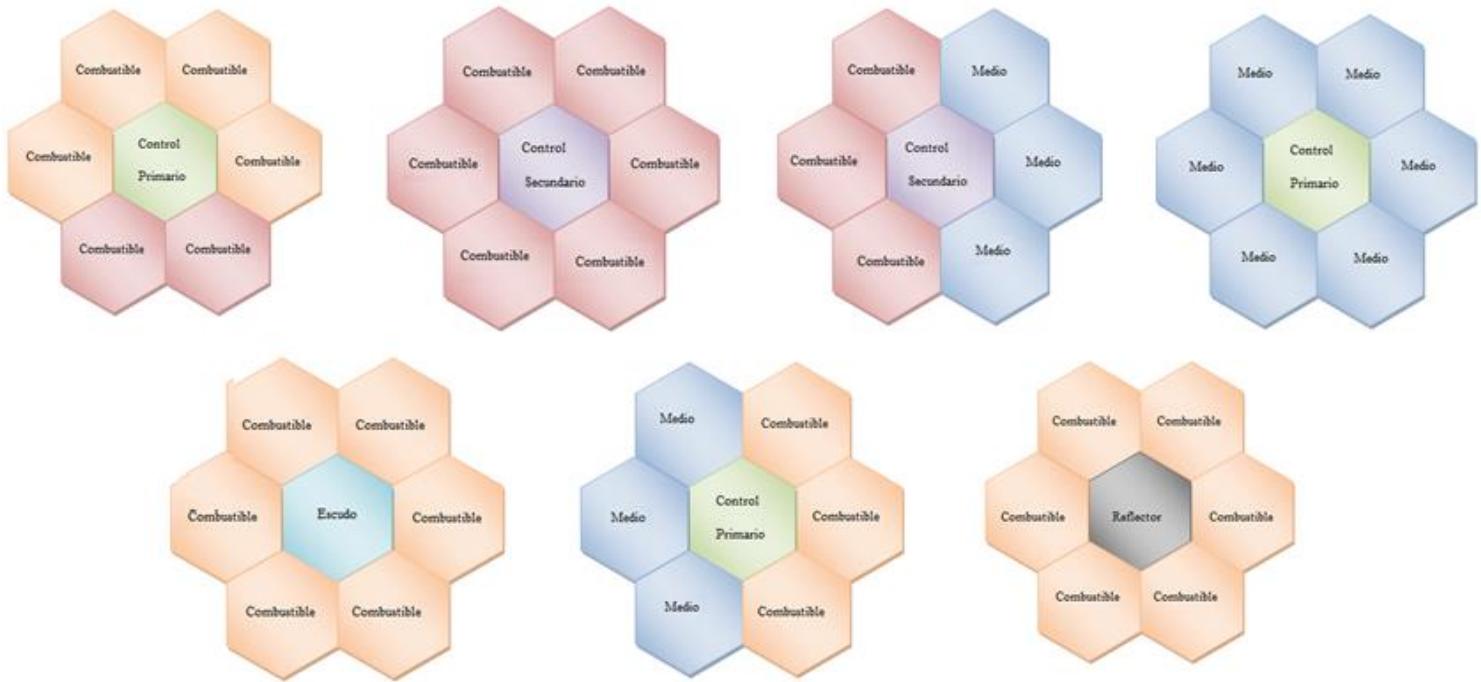


Figura. 4.5 Vista de materiales no combustibles rodeados con materiales combustibles del núcleo Metálico y del núcleo de Óxido pequeño

En la Figura 4.5 se pueden observar materiales no combustibles de los ensambles de control (primario y secundario), ensamble blindaje y ensambles reflectores, con materiales combustibles de los ensambles correspondientes al núcleo interno (rojo), al núcleo medio (azul fuerte) y al núcleo externo (naranja) del núcleo Metálico y del núcleo de Óxido pequeño.

En la Tabla 4.10 se observa un ejemplo de las XS obtenidas del código SERPENT para el núcleo metálico, para sus 48 materiales diferentes, y de la Tabla 4.11 hasta la 4.18 se muestran los parámetros lambda, beta y las velocidades obtenidos de los archivos de salida (.res) del código SERPENT, cuyos parámetros se utilizan para la parte dependiente del tiempo en el código AZNHEX.

Tabla 4.10 Secciones eficaces en 2D de los materiales del núcleo Metálico

Material	Grupo de Energía g	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
						MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]
1	1	2.57567E+00	1.62258E-02	1.01771E-02	9.11315E-01	0.00000E+00	1.14907E-02	2.22486E-04	1.73012E-06
	2	1.69960E+00	6.26160E-03	4.83641E-03	8.48738E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.66334E-03	8.12018E-07
	3	1.18143E+00	8.67539E-03	5.67038E-03	3.77348E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.06083E-03
	4	9.37517E-01	2.03478E-02	1.62403E-02	3.78887E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
2	1	2.57633E+00	1.61574E-02	1.00275E-02	9.11353E-01	0.00000E+00	1.14760E-02	2.21644E-04	1.69864E-06
	2	1.70028E+00	6.23045E-03	4.75975E-03	8.48380E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.67040E-03	8.19495E-07
	3	1.18290E+00	8.62916E-03	5.57827E-03	3.77093E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.07142E-03
	4	9.38456E-01	2.02356E-02	1.60025E-02	3.82618E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
3	1	2.57656E+00	1.61399E-02	9.99615E-03	9.11361E-01	0.00000E+00	1.14722E-02	2.21603E-04	1.69626E-06
	2	1.70061E+00	6.22683E-03	4.74425E-03	8.48283E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.67147E-03	8.05897E-07
	3	1.18334E+00	8.62082E-03	5.56041E-03	3.77251E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.07310E-03
	4	9.38969E-01	2.01961E-02	1.59600E-02	3.85104E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
4	1	2.57503E+00	1.60796E-02	1.00350E-02	9.11606E-01	0.00000E+00	1.13851E-02	2.16843E-04	1.72502E-06
	2	1.70014E+00	6.18256E-03	4.60731E-03	8.46113E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.66717E-03	8.27580E-07
	3	1.17991E+00	8.59459E-03	5.29168E-03	3.74593E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.08538E-03
	4	9.37738E-01	1.98640E-02	1.47350E-02	3.72415E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	1	2.57355E+00	1.61651E-02	1.01785E-02	9.11571E-01	0.00000E+00	1.14131E-02	2.17910E-04	1.70631E-06
	2	1.69876E+00	6.21601E-03	4.66199E-03	8.46435E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.66300E-03	8.06016E-07
	3	1.17777E+00	8.64649E-03	5.35354E-03	3.74792E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.07515E-03
	4	9.36492E-01	1.99618E-02	1.48892E-02	3.78827E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
6	1	4.04053E+00	8.34469E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.13611E-03	8.66624E-05	8.43564E-07
	2	3.24179E+00	2.84262E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.72882E-03	1.26180E-08
	3	2.19902E+00	2.76915E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.53777E-03
	4	1.45874E+00	1.26134E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
7	1	5.37757E+00	5.90556E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.70728E-03	7.97350E-05	8.54214E-07
	2	4.34090E+00	1.90494E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.80093E-03	1.41828E-08
	3	2.95724E+00	1.71796E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.50364E-03
	4	1.74815E+00	1.10836E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
8	1	2.50361E+00	1.20328E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.15328E-02	2.01191E-04	2.09107E-06
	2	2.05601E+00	3.64548E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.37291E-03	4.06506E-08
	3	1.40562E+00	3.58006E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.02621E-03
	4	6.90258E-01	2.96004E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
9	1	2.50437E+00	1.20191E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.15098E-02	2.01488E-04	2.20548E-06
	2	2.05537E+00	3.65744E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.37887E-03	3.70752E-08
	3	1.40556E+00	3.56425E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.01017E-03
	4	6.90754E-01	2.93977E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.10 Continuación de las XS del núcleo Metálico

Material	Grupo de Energía g	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	Σ_{eg} $MW/10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
						$MW/10^2 n.cm$	Σ_{eg} [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]
10	1	1.86535E+00	1.80922E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.75699E-02	1.60397E-04	1.59629E-06
	2	1.35598E+00	6.77728E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.45896E-03	1.42649E-07
	3	7.40814E-01	8.20562E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.35932E-03
	4	6.27126E-01	3.80219E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
11	1	2.58511E+00	1.66920E-02	1.25038E-02	9.11472E-01	0.00000E+00	1.11923E-02	2.17816E-04	1.73606E-06
	2	1.70373E+00	6.63388E-03	6.07523E-03	8.47225E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.50391E-03	7.51303E-07
	3	1.16963E+00	9.36245E-03	6.95758E-03	3.76650E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.24117E-04
	4	9.10610E-01	2.33403E-02	1.86359E-02	3.85987E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
12	1	2.62166E+00	1.64754E-02	1.23132E-02	9.11519E-01	0.00000E+00	1.10638E-02	2.14565E-04	1.71532E-06
	2	1.73064E+00	6.54054E-03	5.96223E-03	8.46819E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.48672E-03	7.50718E-07
	3	1.18454E+00	9.22245E-03	6.83039E-03	3.76168E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.38600E-04
	4	9.21918E-01	2.28761E-02	1.83424E-02	3.71054E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
13	1	2.62365E+00	1.64503E-02	1.22692E-02	9.11473E-01	0.00000E+00	1.10712E-02	2.14995E-04	1.67949E-06
	2	1.73222E+00	6.52633E-03	5.93526E-03	8.47288E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.48875E-03	7.41444E-07
	3	1.18571E+00	9.20094E-03	6.80044E-03	3.75935E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.40867E-04
	4	9.22476E-01	2.28152E-02	1.82861E-02	3.91629E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
14	1	2.58539E+00	1.66334E-02	1.23505E-02	9.11532E-01	0.00000E+00	1.11913E-02	2.17226E-04	1.71299E-06
	2	1.70403E+00	6.60162E-03	5.98430E-03	8.46666E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.51162E-03	7.40089E-07
	3	1.17056E+00	9.31276E-03	6.85215E-03	3.76274E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.31835E-04
	4	9.11435E-01	2.32173E-02	1.83674E-02	3.84237E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
15	1	2.58461E+00	1.67370E-02	1.25864E-02	9.11534E-01	0.00000E+00	1.12050E-02	2.18201E-04	1.73829E-06
	2	1.70316E+00	6.65483E-03	6.11598E-03	8.46636E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	2.49977E-03	7.66429E-07
	3	1.16847E+00	9.39371E-03	6.99728E-03	3.76397E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	9.19524E-04
	4	9.09954E-01	2.34478E-02	1.87123E-02	3.80253E-05	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
16	1	4.05087E+00	8.21520E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.99844E-03	8.74469E-05	8.53526E-07
	2	3.24897E+00	2.71370E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.60388E-03	1.57328E-08
	3	2.20925E+00	2.55461E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.32772E-03
	4	1.45293E+00	1.23644E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
17	1	5.38874E+00	5.81524E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.61522E-03	7.95314E-05	9.00220E-07
	2	4.35288E+00	1.81990E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.71434E-03	1.49010E-08
	3	2.97242E+00	1.57560E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.36424E-03
	4	1.74887E+00	1.10793E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
18	1	2.50751E+00	1.18937E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.13796E-02	2.02729E-04	2.17533E-06
	2	2.06150E+00	3.49896E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.22476E-03	4.55501E-08
	3	1.41378E+00	3.36684E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.82372E-03
	4	6.93642E-01	2.93335E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.10 Continuación de las XS del núcleo Metálico

Material	Grupo de Energía g	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg^{i \rightarrow g}}$ [1/cm]			
19	1	2.50792E+00	1.18999E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.13822E-02	2.02063E-04	2.17275E-06
	2	2.06141E+00	3.49983E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.22908E-03	3.54127E-08
	3	1.41322E+00	3.37095E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.83253E-03
	4	6.93886E-01	2.92073E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
20	1	1.86856E+00	1.78876E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.73599E-02	1.61562E-04	1.61516E-06
	2	1.35861E+00	6.54999E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.22789E-03	1.40947E-07
	3	7.43840E-01	7.91341E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.05568E-03
	4	6.24896E-01	3.79937E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
21	1	2.17061E+00	1.38070E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.31828E-02	2.37767E-04	2.55596E-06
	2	1.81072E+00	4.39304E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.04266E-03	5.46733E-08
	3	1.24851E+00	5.04367E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.33064E-03
	4	5.02925E-01	5.89983E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
22	1	2.17105E+00	1.38029E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.31766E-02	2.38147E-04	2.53204E-06
	2	1.81103E+00	4.39561E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.04298E-03	5.65629E-08
	3	1.24837E+00	5.04950E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.33622E-03
	4	5.02935E-01	5.90109E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
23	1	2.17082E+00	1.38023E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.31765E-02	2.38034E-04	2.53168E-06
	2	1.81102E+00	4.39546E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.04254E-03	5.34499E-08
	3	1.24821E+00	5.04874E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.33626E-03
	4	5.02931E-01	5.90236E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
24	1	2.17082E+00	1.38122E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.31833E-02	2.38083E-04	2.53617E-06
	2	1.81059E+00	4.39711E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.04548E-03	5.18919E-08
	3	1.24844E+00	5.04935E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.33423E-03
	4	5.02935E-01	5.89753E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
25	1	2.17062E+00	1.38100E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.31827E-02	2.37970E-04	2.46843E-06
	2	1.81082E+00	4.38976E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.04131E-03	5.07005E-08
	3	1.24857E+00	5.04375E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	4.32970E-03
	4	5.02967E-01	5.89782E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
26	1	1.61024E+00	3.89695E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.39456E-02	1.21586E-04	1.45080E-06
	2	9.57173E-01	3.65239E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.92337E-02	2.79511E-08
	3	6.77988E-01	5.19340E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.88785E-03
	4	5.65051E-01	1.40292E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
27	1	1.60978E+00	3.89471E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.39402E-02	1.18887E-04	1.37815E-06
	2	9.57271E-01	3.65114E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.92210E-02	1.31754E-08
	3	6.78057E-01	5.19536E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.89674E-03
	4	5.65144E-01	1.40443E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.10 Continuación de las XS del núcleo Metálico

Material	Grupo de Energía g	D _g [cm]	Σ _{rg} [1/cm]	vΣ _{fg} [1/cm]	Σ _{cg} MW/10 ² n.cm	Σ _{sg→g} [1/cm]			
28	1	1.61039E+00	3.89412E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.39233E-02	1.20155E-04	1.39761E-06
	2	9.57314E-01	3.65135E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.92274E-02	2.10596E-08
	3	6.78070E-01	5.19427E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.90309E-03
	4	5.65512E-01	1.40263E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
29	1	1.60954E+00	3.89585E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.39465E-02	1.20621E-04	1.48796E-06
	2	9.57209E-01	3.65432E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.92455E-02	1.98684E-08
	3	6.78092E-01	5.19363E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.89370E-03
	4	5.64554E-01	1.40600E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
30	1	1.60999E+00	3.89683E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	3.39511E-02	1.19210E-04	1.35873E-06
	2	9.57197E-01	3.65090E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	1.92203E-02	1.73658E-08
	3	6.77836E-01	5.19213E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.87574E-03
	4	5.64505E-01	1.40514E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
31	1	5.22762E+00	7.00346E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.89079E-03	4.70238E-05	4.09088E-07
	2	4.13449E+00	2.52384E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.47429E-03	5.37520E-09
	3	2.91132E+00	2.38987E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.27591E-03
	4	2.26393E+00	6.55846E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
32	1	5.22533E+00	7.00375E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.89016E-03	4.73694E-05	3.92805E-07
	2	4.13445E+00	2.53059E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.48210E-03	8.29532E-09
	3	2.90958E+00	2.41304E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.29431E-03
	4	2.26548E+00	6.41940E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
33	1	5.22742E+00	7.00718E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.88885E-03	4.72087E-05	4.15664E-07
	2	4.13422E+00	2.52941E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.48417E-03	3.55769E-09
	3	2.90893E+00	2.41705E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.29529E-03
	4	2.26519E+00	6.84447E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
34	1	5.22473E+00	7.01685E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.91463E-03	4.72003E-05	4.39105E-07
	2	4.13481E+00	2.53679E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.47539E-03	7.68042E-09
	3	2.90838E+00	2.42645E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.30718E-03
	4	2.26863E+00	6.74585E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
35	1	5.22555E+00	7.02248E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.91050E-03	4.75344E-05	4.01421E-07
	2	4.13514E+00	2.51990E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.47097E-03	5.94117E-09
	3	2.90964E+00	2.40895E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.29639E-03
	4	2.26724E+00	6.43486E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
36	1	1.85023E+00	4.63223E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.83827E-02	6.32166E-05	6.31575E-07
	2	1.17595E+00	6.10833E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.61861E-03	9.27414E-09
	3	1.00755E+00	1.03553E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	8.57509E-04
	4	8.42797E-01	1.31022E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.10 Continuación de las XS del núcleo Metálico

Material	Grupo de Energía g	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	$\nu\Sigma_{fg}$ [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]			
						MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]	$\Sigma_{sg' \rightarrow g}$ [1/cm]
37	1	5.23908E+00	6.92295E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.81340E-03	4.70026E-05	4.14922E-07
	2	4.14067E+00	2.45115E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.40016E-03	5.06281E-09
	3	2.92085E+00	2.28783E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.16099E-03
	4	2.24515E+00	6.95961E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
38	1	5.23929E+00	6.91243E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.81538E-03	4.76984E-05	4.55612E-07
	2	4.14130E+00	2.44530E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.40300E-03	5.62060E-09
	3	2.91967E+00	2.29580E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.17795E-03
	4	2.24690E+00	6.53346E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
39	1	5.23812E+00	6.92626E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.81544E-03	4.72141E-05	3.83327E-07
	2	4.14123E+00	2.45647E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.40185E-03	1.86542E-09
	3	2.91912E+00	2.29245E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.17793E-03
	4	2.24798E+00	6.41945E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
40	1	5.23560E+00	6.93248E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.82901E-03	4.73359E-05	3.91970E-07
	2	4.13986E+00	2.45048E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.40389E-03	4.40417E-09
	3	2.91882E+00	2.27356E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.17452E-03
	4	2.24691E+00	6.20078E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
41	1	5.23765E+00	6.93715E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.81870E-03	4.72439E-05	4.21116E-07
	2	4.14130E+00	2.45350E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.39476E-03	5.69085E-09
	3	2.92010E+00	2.28169E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.16292E-03
	4	2.24547E+00	6.80438E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
42	1	1.85482E+00	4.59339E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.80113E-02	6.33301E-05	6.86823E-07
	2	1.17413E+00	6.09297E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.47464E-03	1.16994E-08
	3	1.00515E+00	1.03804E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.88041E-04
	4	8.41443E-01	1.30429E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
43	1	5.24395E+00	6.88699E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.78345E-03	4.68336E-05	4.30304E-07
	2	4.14379E+00	2.41644E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.36066E-03	5.82848E-09
	3	2.92529E+00	2.20797E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.09824E-03
	4	2.23386E+00	6.49015E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
44	1	5.24476E+00	6.89070E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.77991E-03	4.75380E-05	4.39614E-07
	2	4.14515E+00	2.41155E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.36497E-03	8.96812E-09
	3	2.92454E+00	2.22813E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.12034E-03
	4	2.23782E+00	6.37557E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
45	1	5.24382E+00	6.88812E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.77339E-03	4.70155E-05	4.20908E-07
	2	4.14524E+00	2.41779E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.36592E-03	4.47542E-09
	3	2.92332E+00	2.23596E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.12233E-03
	4	2.23889E+00	6.69653E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.10 Continuación de las XS del núcleo Metálico

Material	Grupo de Energía g	D_g [cm]	Σ_{rg} [1/cm]	$v\Sigma_{fg}$ [1/cm]	Σ_{eg} MW/ $10^2 n.cm$	$\Sigma_{sg \rightarrow g}$ [1/cm]			
46	1	5.24212E+00	6.90331E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.78554E-03	4.73576E-05	4.60154E-07
	2	4.14340E+00	2.41701E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.36733E-03	7.08012E-09
	3	2.92407E+00	2.22539E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.11553E-03
	4	2.23673E+00	6.07889E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
47	1	5.24296E+00	6.89563E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.78067E-03	4.72921E-05	4.11612E-07
	2	4.14442E+00	2.40818E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.35806E-03	4.55279E-09
	3	2.92540E+00	2.18813E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.09234E-03
	4	2.23349E+00	6.49061E-04	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
48	1	1.85657E+00	4.57550E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	2.78431E-02	6.28632E-05	6.35505E-07
	2	1.17328E+00	6.08567E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.39979E-03	1.59694E-08
	3	1.00371E+00	1.03875E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	7.56045E-04
	4	8.40325E-01	1.30084E-01	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00

Tabla 4.11 Parámetros cinéticos para el núcleo de Carburo con barras de control afuera

Parámetro	Grupo precursor i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	7.50985E-05	7.06171E-04	2.85024E-04	6.63499E-04	1.44066E-03	6.22160E-04	5.38036E-04	2.61024E-04
Lambda (λ_i [1/s])	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
1/v ₁ =2.12772E-10 [s/cm]		1/v ₂ =7.88061E-10 [s/cm]		1/v ₃ =2.00446E-09 [s/cm]		1/v ₄ =2.84418E-08 [s/cm]		

Tabla 4.12 Parámetros cinéticos para el núcleo de Carburo con barras de control adentro

Parámetro	Grupo precursor i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	7.83944E-05	7.42218E-04	3.01804E-04	6.97731E-04	1.51225E-03	6.59917E-04	5.58972E-04	2.78165E-04
Lambda (λ_i [1/s])	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
1/v ₁ =2.12696E-10 [s/cm]		1/v ₂ =7.87128E-10 [s/cm]		1/v ₃ =2.00232E-09 [s/cm]		1/v ₄ =3.06651E-08 [s/cm]		

Tabla 4.13 Parámetros cinéticos para el núcleo de Óxido con barras de control afuera

Parámetro	Grupo precursor <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	7.29387E-05	6.79231E-04	2.76474E-04	6.36717E-04	1.38390E-03	5.91224E-04	5.11480E-04	2.47415E-04
Lambda (λ_i) [1/s]	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
$1/v_1=2.12787E-10$ [s/cm]		$1/v_2=7.76496E-10$ [s/cm]		$1/v_3=2.04094E-09$ [s/cm]		$1/v_4=2.73885E-08$ [s/cm]		

Tabla 4.14 Parámetros cinéticos para el núcleo de Óxido con barras de control adentro

Parámetro	Grupo precursor <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	7.91381E-05	7.28192E-04	2.93877E-04	6.86813E-04	1.48550E-03	6.41728E-04	5.56008E-04	2.70108E-04
Lambda (λ_i) [1/s]	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
$1/v_1=2.12737E-10$ [s/cm]		$1/v_2=7.76017E-10$ [s/cm]		$1/v_3=2.03661E-09$ [s/cm]		$1/v_4=2.96776E-08$ [s/cm]		

Tabla 4.15 Parámetros cinéticos para el núcleo Metálico con barras de control afuera

Parámetro	Grupo precursor <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	7.15449E-05	6.57015E-04	2.64973E-04	5.98403E-04	1.30203E-03	5.43412E-04	4.70328E-04	2.29295E-04
Lambda (λ_i) [1/s]	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
$1/v_1=2.12702E-10$ [s/cm]		$1/v_2=7.97489E-10$ [s/cm]		$1/v_3=1.90319E-09$ [s/cm]		$1/v_4=6.28950E-09$ [s/cm]		

Tabla 4.16 Parámetros cinéticos para el núcleo Metálico con barras de control adentro

Parámetro	Grupo precursor <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	8.50057E-05	7.72206E-04	3.07446E-04	7.25400E-04	1.58387E-03	6.78801E-04	5.75461E-04	2.94344E-04
Lambda (λ_i) [1/s]	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
$1/v_1=2.12445E-10$ [s/cm]		$1/v_2=7.91265E-10$ [s/cm]		$1/v_3=1.87630E-09$ [s/cm]		$1/v_4=5.99695E-09$ [s/cm]		

Tabla 4.17 Parámetros cinéticos para el núcleo de Óxido pequeño con barras de control afuera

Parámetro	Grupo precursor <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	6.44830E-05	5.94942E-04	2.32337E-04	5.39047E-04	1.13829E-03	4.69140E-04	4.02846E-04	1.83840E-04
Lambda (λ_i) [1/s]	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
$1/v_1=2.12673E-10$ [s/cm]		$1/v_2=7.75402E-10$ [s/cm]		$1/v_3=2.02141E-09$ [s/cm]		$1/v_4=3.55935E-08$ [s/cm]		

Tabla 4.18 Parámetros cinéticos para el núcleo de Óxido pequeño con barras de control adentro

Parámetro	Grupo precursor <i>i</i>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Beta (β_i)	7.56242E-05	6.93869E-04	2.72394E-04	6.41963E-04	1.36966E-03	5.90713E-04	4.84445E-04	2.40703E-04
Lambda (λ_i) [1/s]	1.24667E-02	2.82917E-02	4.25244E-02	1.33042E-01	2.92467E-01	6.66488E-01	1.63478E+00	3.55460E+00
$1/v_1=2.12702E-10$ [s/cm]		$1/v_2=7.71756E-10$ [s/cm]		$1/v_3=2.00779E-09$ [s/cm]		$1/v_4=3.86868E-08$ [s/cm]		

Para los cálculos transitorios, en lugar de usar los ocho grupos de precursores, se utilizó un sólo grupo efectivo que representa a los ocho. Esto para reducir el tiempo de cómputo. Los parámetros van desde $i=1$ hasta 8. De las Tablas 4.11 a 4.18 para calcular la beta y lambda total se obtienen de la siguiente forma:

$$\beta = \sum_{i=1}^8 \beta_i \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^8 \lambda_i \beta_i \quad (2)$$

CAPÍTULO 5

MODELACIÓN 3D DE UN VVER-440 Y DE UN SFR CON EL CÓDIGO AZNHEX

Para la modelación y análisis de reactores nucleares, es indispensable que se cuente con el apoyo de herramientas de cómputo que sean capaces de realizar cálculos numéricos a gran escala, y que permitan simplificar el análisis de determinada tarea. Tal es el caso del programa de cómputo AZNHEX [13, 14,15], es un código que está especializado en el análisis neutrónico de reactores nucleares (difusión de neutrones en estado estacionario o dependiente del tiempo), que cuenten con ensambles combustibles de geometría prismática con corte transversal hexagonal.

En este capítulo se hablará sobre el código AZNHEX y la descripción de un archivo de entrada para dicho código, en el que se especifican los datos neutrónicos y geométricos del núcleo del reactor a analizar.

5.1 AZNHEX

El código AZNHEX está programado en lenguaje Fortran y resuelve de forma numérica los sistemas algebraicos o problemas de valor propio resultantes para que se obtenga el valor del factor efectivo de multiplicación de neutrones, el flujo de neutrones en cada grupo de energía, la distribución radial y axial del flujo de neutrones, la potencia en estado estacionario o en función del tiempo. AZNHEX está compuesto de subrutinas y funciones [14].

5.2 Descripción de los datos de entrada

El código AZNHEX consta de dos partes: *a*) la que corresponde al caso estático y *b*) la que corresponde al caso dependiente del tiempo, para que la parte del tiempo se realice, anteriormente se debió haber realizado el caso estático.

Algunos de los datos que requiere el programa para que se realicen los cálculos correspondientes al caso de estado estacionario son: título para el problema bajo estudio, el número de materiales diferentes que constituyen al reactor, grupos de energía, condiciones de frontera, número total de elementos de barra, la opción de almacenamiento del archivo de resultados del cálculo estacionario, malla de discretización, número máximo de iteraciones, etc. Ahora algunos de los datos requeridos para el problema dependiente del tiempo son: número de pasos de tiempo, velocidades de los neutrones, valores de producción de precursores de neutrones retardados para cada grupo de energía, constantes de decaimiento para neutrones retardados para cada grupo de energía, distribución axial de ceros, etc. Todos los datos que se requieren para la elaboración del archivo de entrada para AZNHEX tanto para el caso estacionario, como el caso dependiente del tiempo se pueden consultar en la Ref [14].

5.3 Descripción del archivo de entrada para el código AZNHEX

Primero se utilizó el código AZNHEX para la simulación del núcleo 3D de un VVER-440 [16], simplificado a 2D, con la finalidad de comprobar que el código funciona adecuadamente y proporciona los resultados deseados para el propósito de la tesis, una vez realizado lo anterior, se procedió a simular el transitorio para los cuatro núcleos de un reactor tipo SFR con el que se está trabajando.

Para el archivo de entrada del VVER-440 se consideró todo el núcleo como se observa en la Figura 5.1. Del núcleo completo se hicieron cuatro mapas, el primero indica la cantidad de ensambles diferentes que tiene el arreglo del núcleo, para este caso tiene 8 ensambles, el segundo mapa indica cuantos ensambles en total tiene el núcleo, que son en total 421 ensambles, el tercer mapa indica los cuadrantes de cada ensamble y por último se hace un mapa indicando sólo la posición de los materiales de control, también en el archivo de entrada se define el pitch, los grupos de energía, las condiciones de frontera, etc. El archivo de entrada se proporciona en el Apéndice C.

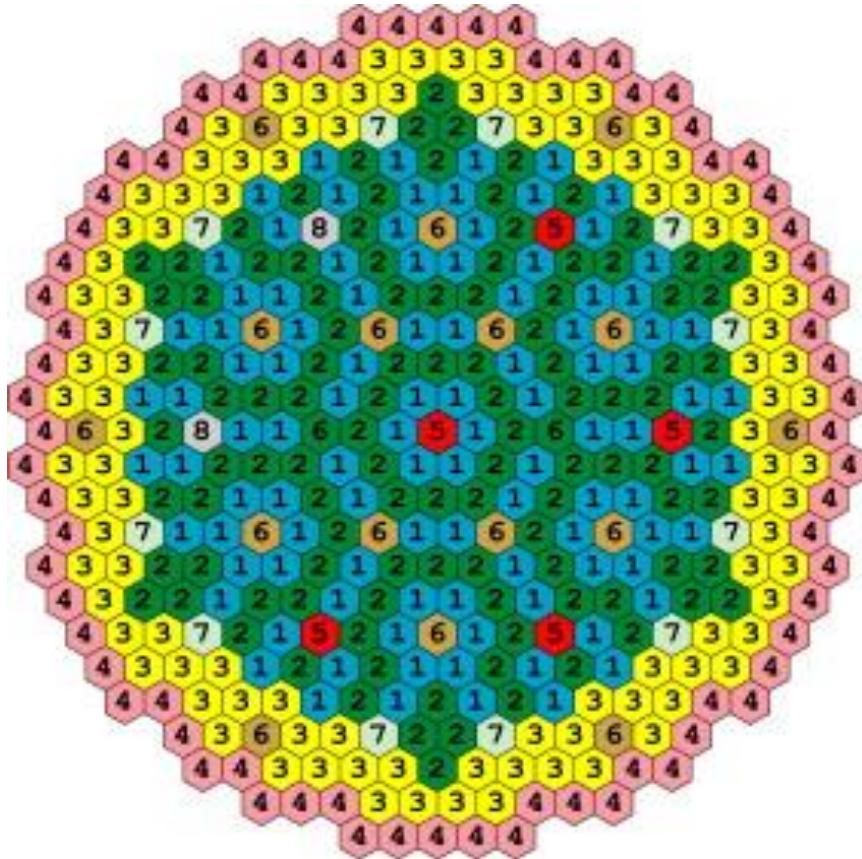


Figura 5.1 Configuración del benchmark VVER-440

En la Tabla 5.1 se proporcionan las secciones eficaces de los ocho materiales del núcleo [16] de igual forma se obtuvieron los datos para la dependencia del tiempo (lambda, beta y

velocidades) que se muestran en la Tabla 5.2, las secciones eficaces son para dos grupos de energía mientras que la cantidad total de precursores de neutrones retardados es de seis.

Se simula un transitorio para el movimiento de dos barras de control, el cual se define por medio de la evolución temporal de la sección transversal de absorción térmica Σ_{a2} para el material 8 como se muestra a continuación [15].

$$\Sigma_{a2}(t) = \begin{cases} 0.118870 \cdot (1 - t) + 0.016917 \cdot t & \text{si } 0 \leq t \leq 1, \\ 0.118870 \cdot (t - 1) + 0.016917 \cdot (2 - t) & \text{si } 1 \leq t \leq 2, \\ 0.118870 & \text{si } 2 \leq t \leq 3. \end{cases} \quad (3)$$

Tabla 5.1 Parámetros neutrónicos para el problema benchmark VVER-440.

Material	Grupo de Energía g	Parámetros neutrónicos			
		D_g	Σ_{ag}	$v\Sigma_{fg}$	$\Sigma_{1 \rightarrow 2}$
1	1	1.6557	0.008312	0.004413	-
	2	0.370075	0.064282	0.072784	0.016976
2	1	1.337728	0.008745	0.005491	-
	2	0.367411	0.079145	0.104256	0.016000
3	1	1.332264	0.009411	0.006990	-
	2	0.363171	0.099536	0.147261	0.014974
4	1	1.447520	0.000933	0.00000	-
	2	0.251741	0.033037	0.00000	0.032215
5	1	1.231711	0.012120	0.027352	-
	2	0.240027	0.118846	0.005492	0.020782
6	1	1.337727	0.008747	0.104316	-
	2	0.367479	0.079153	0.004416	0.015996
7	1	1.346561	0.008317	0.0728416	-
	2	0.370177	0.064282	0.001342	0.016968
8	1	1.231640	0.012123	0.027299	-
	2	0.239942	0.118870	0.00000	0.020785

Tabla 5.2 Parámetros cinéticos para el problema benchmark VVER–440

Parámetro	Grupo precursor i					
	1	2	3	4	5	6
Beta (β_i)	0.000247	0.0013845	0.001222	0.0026455	0.000832	0.000169
Lambda (λ_i) [1/s]	0.0127	0.0317	0.115	0.311	1.4	3.87
$v_1 = 1.25 \times 10^7$ [s/cm]		$v_2 = 2.5 \times 10^5$ [s/cm]			$\beta=0.0065$	

El transitorio que se simuló en este trabajo sólo considera un grupo de neutrones retardado efectivo. Es decir que el valor de beta usado fue de 0.0065 y el de lambda fue de 0.4352517 s⁻¹. Se prepararon tres archivos de entrada, uno para cada mallado interior de cada uno de los cuadrantes que constituyen un hexágono. Los resultados obtenidos para el factor de multiplicación efectivo se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 k_{eff} obtenida en el estado estacionario

Malla	k_{eff}	Diferencia (pcm)
1x1	1.002636	55
2x2	1.002922	27
3x3	1.003086	10
4x4	1.003188	-

Como se puede ver k_{eff} va acercándose en forma consistente a un punto fijo va convergiendo conforme se va refinando la malla. Una vez que se ha obtenido el estado estacionario respectivo se realizaron simulaciones del transitorio descrito anteriormente para cuatro pasos de tiempo diferentes, $\Delta t = 0.02$ s, 0.01 s, 0.005 s y 0.001 s. Los resultados obtenidos para la potencia normalizada se muestran en las Figuras 5.2 a 5.5 para cada uno de los pasos de tiempo respectivamente, donde la potencia normalizada es $P(t)/P(0)$. Cada figura muestra el resultado obtenido para los tres distintos mallados espaciales, es decir para los mallados 1x1, 2x2 y 3x3.

La Tabla 5.4 muestra en forma resumida el valor máximo de la potencia alcanzada, el tiempo aproximado en que ésta se alcanza y finalmente el valor de ésta al final del transitorio, es decir a los tres segundos.

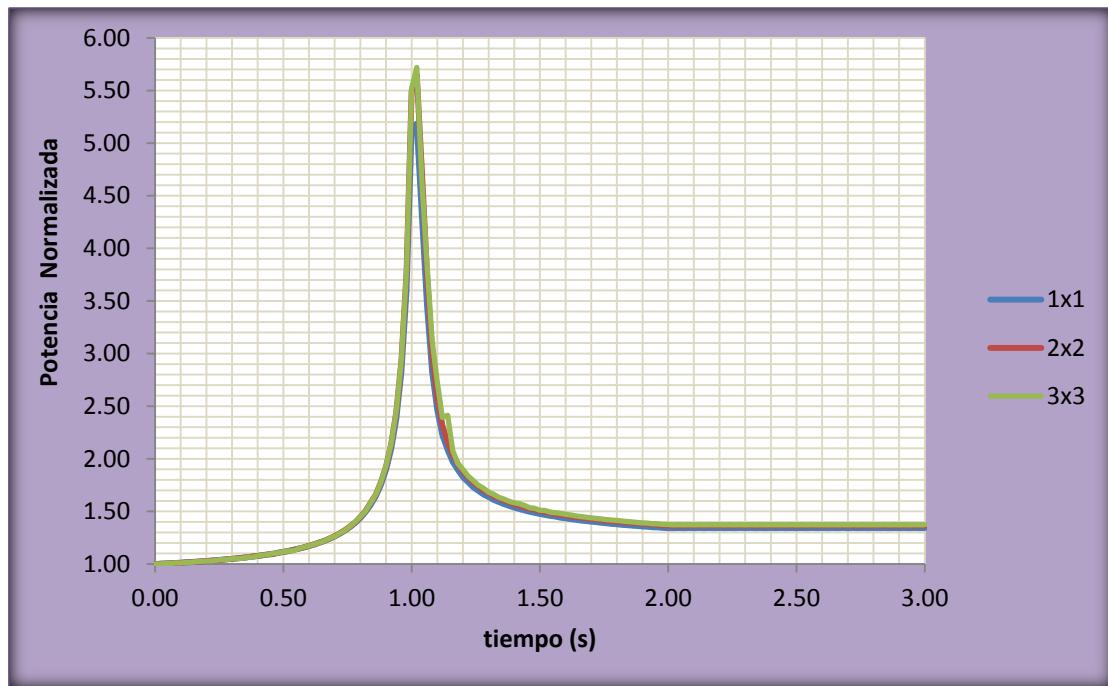


Figura 5.2 Paso de tiempo de 0.02 seg.

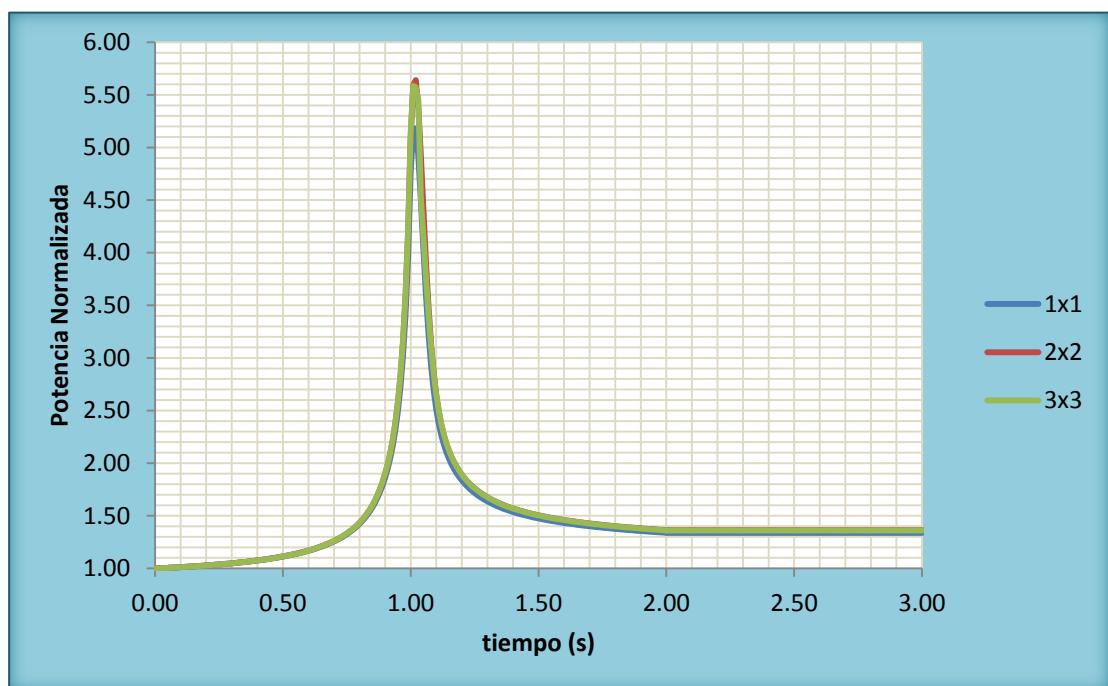


Figura 5.3 Paso de tiempo de 0.01 seg.

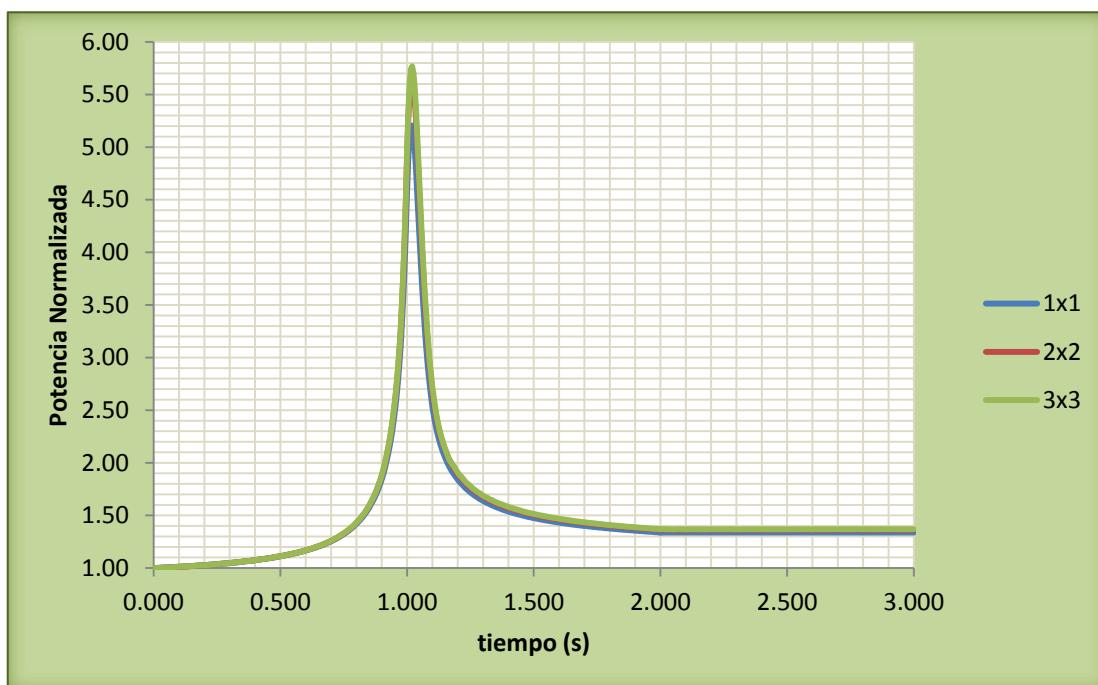


Figura 5.4 Paso de tiempo de 0.005 seg.

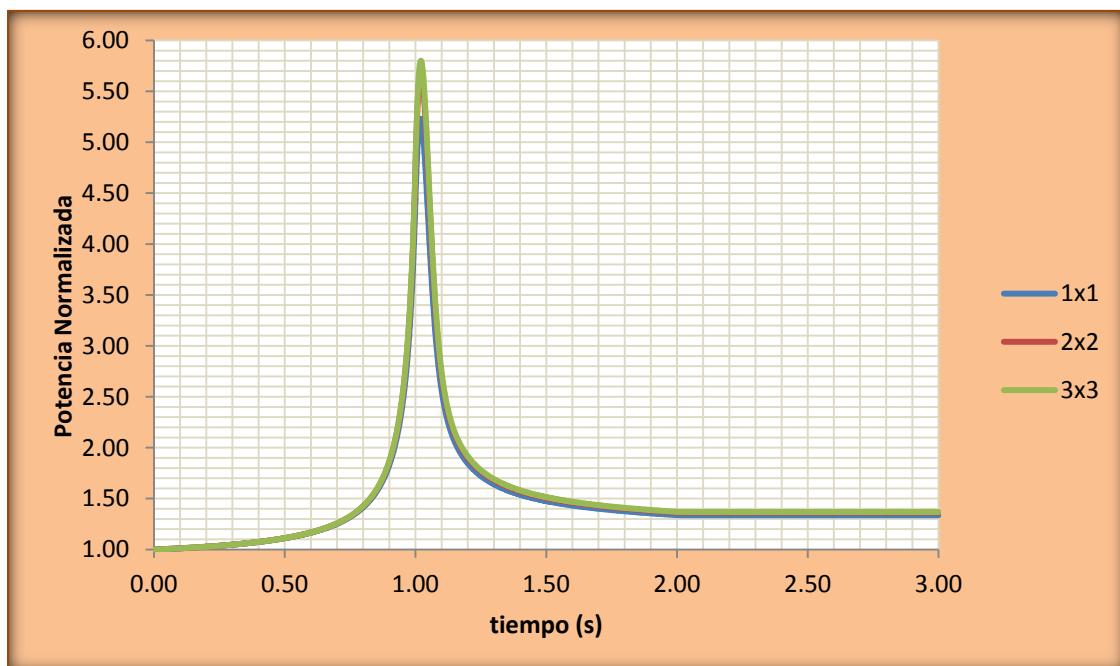


Figura 5.5 Pasos de tiempo de 0.001 seg.

La Tabla 5.4 muestra que la P_{\max} va convergiendo consistentemente para un paso de tiempo fijo refinando la malla espacial, así como para un mallado espacial fijo refinando el paso de tiempo. De igual forma, $P_{(3s)}$ se observa que converge con los refinamientos.

Tabla 5.4 Valores de la potencia máxima y la potencia al final del transitorio

Malla	Δt (s)	τ_m (s)	P_{\max}	$P_{(3s)}$
1x1	2E-02	1.020	5.186	1.341
2x2		1.020	5.653	1.365
3x3		1.020	5.719	1.374
1x1	1E-02	1.010	5.182	1.338
2x2		1.020	5.640	1.363
3x3		1.010	5.586	1.361
1x1	5E-03	1.015	5.206	1.337
2x2		1.020	5.676	1.362
3x3		1.020	5.768	1.368
1x1	1E-03	1.019	5.231	1.337
2x2		1.020	5.704	1.362
3x3		1.021	5.802	1.369

Una vez de que se verificó que el código funcionaba satisfactoriamente entonces se procedió a hacer los archivos de entrada para los cuatro núcleos diferentes, para la modelación 3D de los núcleos del tipo SFR, en donde se considera el núcleo completo ya que los núcleos no cuentan con simetría (ver Figura 5.6) a excepción del núcleo de óxido que si tiene simetría pero aun así se consideró el núcleo completo también.

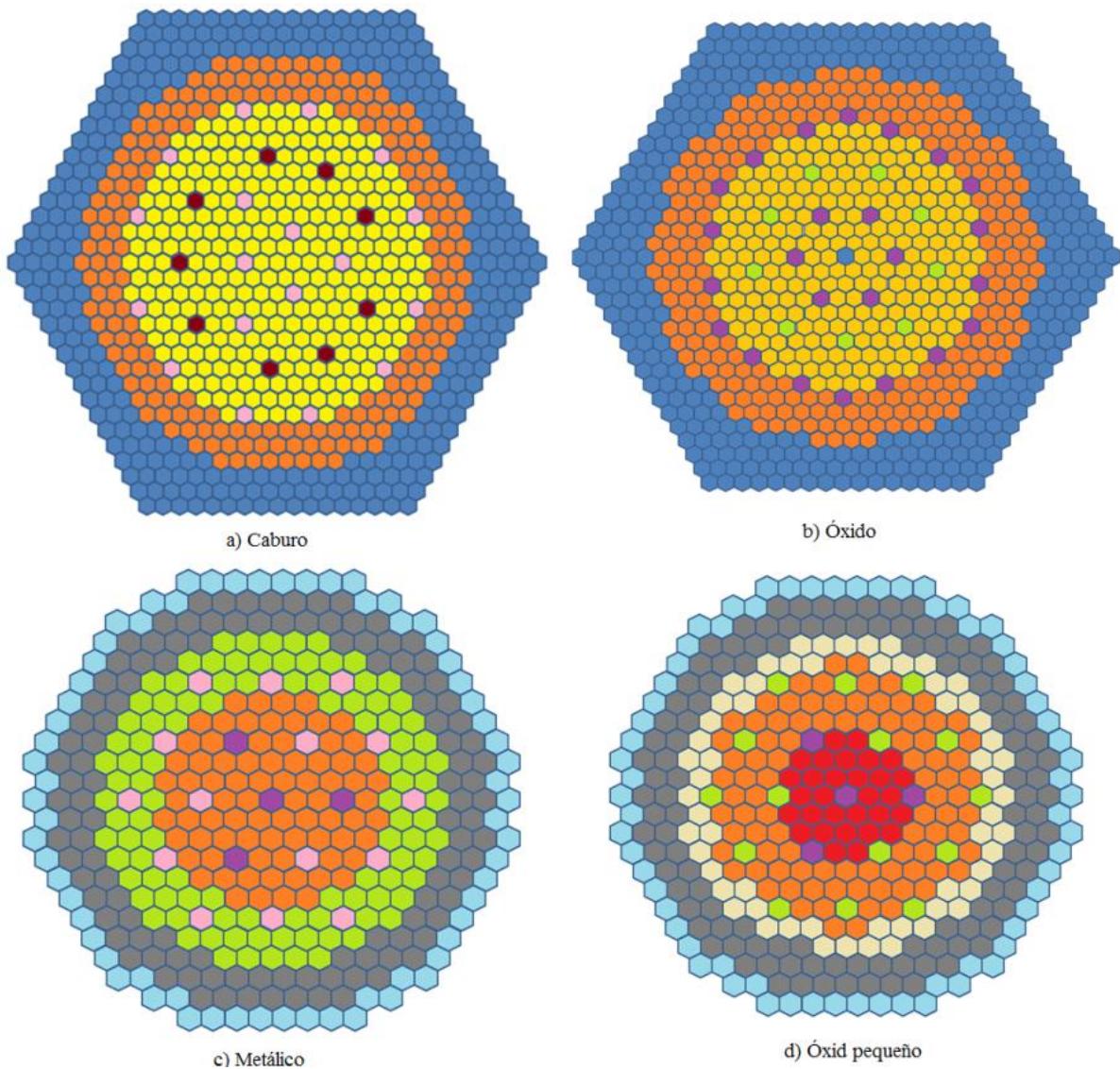


Figura 5.6 Núcleos completos del tipo SFR

Se elaboraron los archivos de entrada para los cuatro núcleos. Se explicara uno de ellos, en este caso como ejemplo se tomara el archivo de entrada para el núcleo Metálico del reactor SFR, como se mencionó anteriormente se considera el núcleo completo. Primero se define el título, después se define la distancia que hay entre el centro de un ensamble a otro, las dimensiones que hay en “X” y “Y”, también se consideran 3 mapas diferentes en donde cada mapa indica: la distribución de elementos trapezoidales diferentes que hay para este caso formando 6 ensambles diferentes (ver Figura 5.7), la distribución de ensambles que contiene el núcleo completo (ver Figura 5.8) el cual contiene 379 ensambles y el último mapa indica los cuadrantes por ensamble.

También se considera la altura que tiene cada segmento de los ensambles como se muestra en la Figura 5.9, esto es para indicar el segmento al que pertenece cada material y la posición en que está colocado el ensamble, para la definición de los materiales se consideran las XS calculadas con SERPENT en 2D y 3D respectivamente para cada archivo de entrada. La parte activa del núcleo tiene una altura de 85.82 cm, el cual está dividido en cinco segmentos.

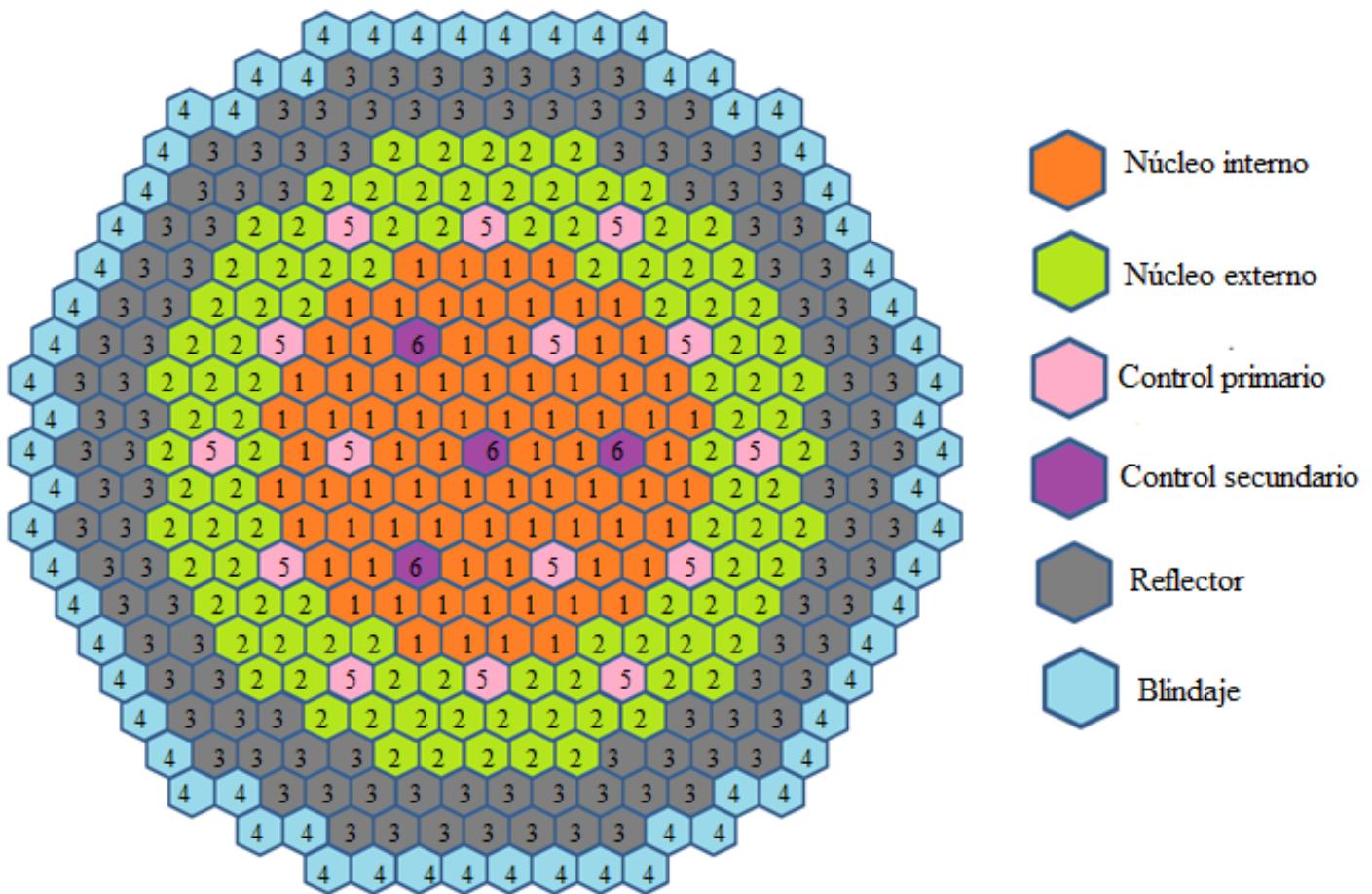


Figura 5.7 Vista de los diferentes ensambles del núcleo Metálico

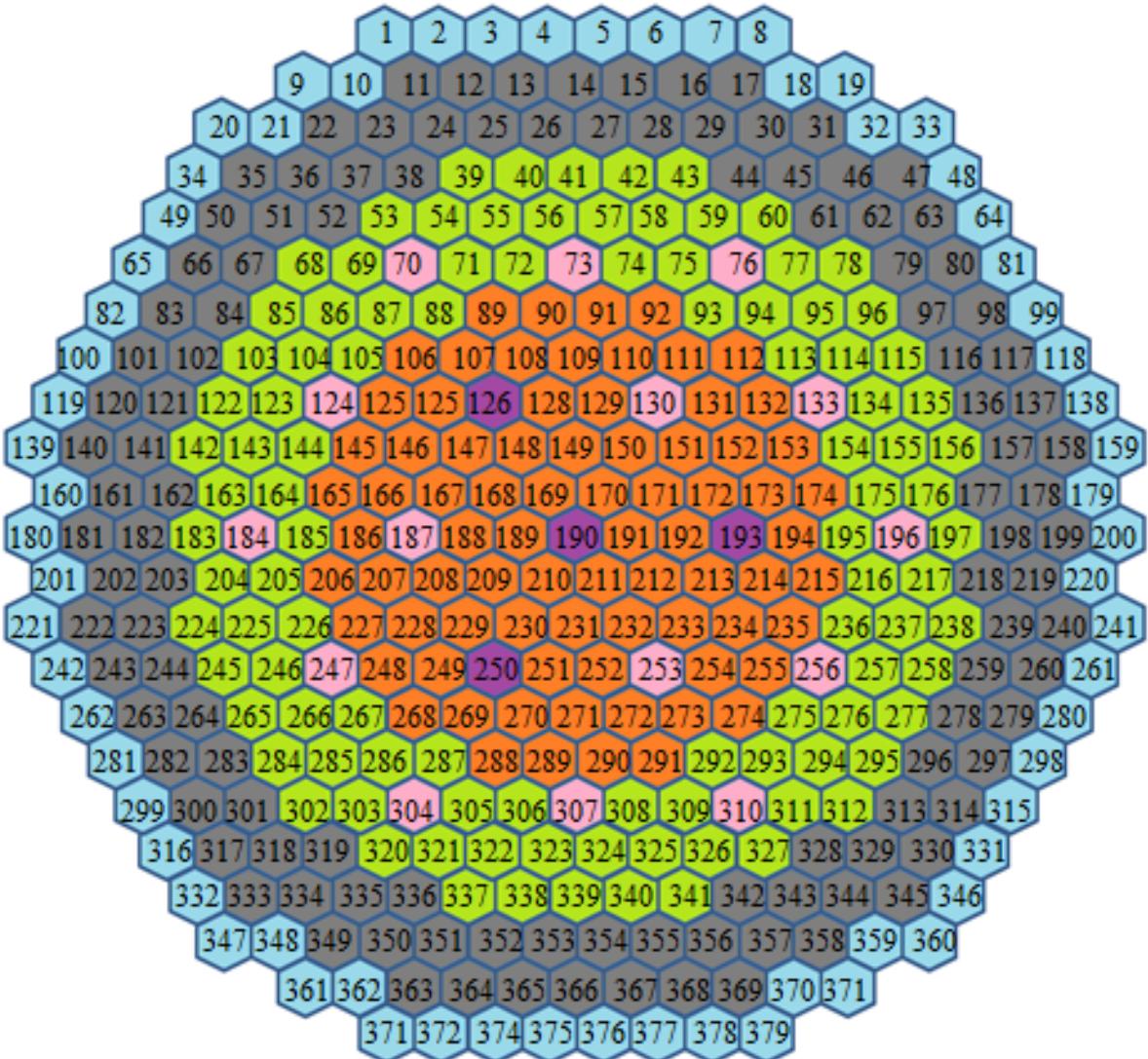


Figura 5.8 Vista radial del núcleo completo del Metálico

En la Figura 5.9 se pueden observar los siete ensambles diferentes con sus respectivos materiales, así como sus dimensiones. Para el caso de los ensambles de control, las XS se obtienen dependiendo de su posición (es decir si el elemento está colocado en el núcleo interno se considera como un ensamble), entonces para el archivo de entrada se considera que hay más ensambles de control.

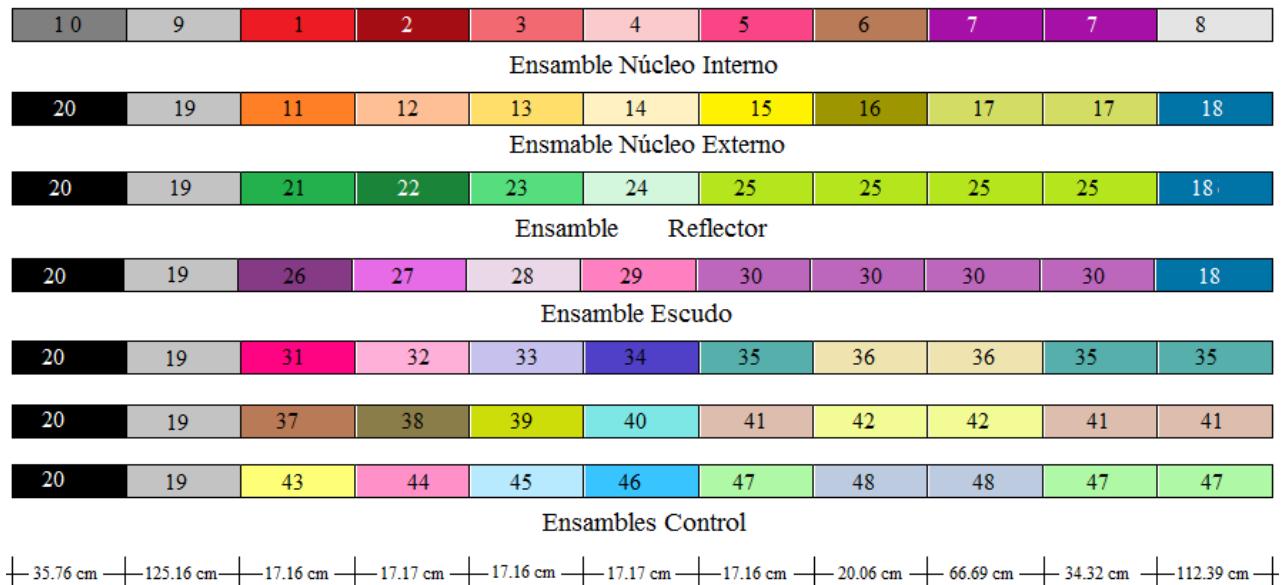


Figura 5.9 Vista de los ensambles del núcleo Metálico del SFR

Después de que ya se tiene lo necesario para la elaboración del archivo de entrada entonces el código se corre en una terminal primero para el caso estacionario y después para el caso dependiente del tiempo, se hizo el mismo procedimiento para los demás núcleos. El archivo de entrada para el núcleo Metálico se proporciona en el Apéndice C.

Se ejecutan los archivos de entrada para los cuatro núcleos del tipo SFR para el caso estacionario, el cual proporciona un archivo de salida donde se muestra la k_{eff} y el flujo para los cuatro grupos de energía, el cual se ocupa después para el caso dependiente del tiempo. En la Tabla 5.5 se observan los valores del factor de multiplicación para la modelación de AZNHEX en 3D pero con secciones eficaces obtenidas con SERPENT en 2D (AZNHEX/2D-XS) y para la modelación en 3D pero con secciones eficaces obtenidas con SERPENT en 3D (AZNHEX/3D-XS), para tres casos diferentes, para cuando los sistemas de control primarios y secundarios están en su totalidad extraídos (ARO), cuando los sistemas de control primario están totalmente insertados y los secundarios totalmente extraídos (ARI_p) y cuando los sistemas de control primario y secundario están totalmente insertados (ARI_{ps})

Tabla 5.5 Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos, obtenidas con AZNHEX/3D-XS y AZNHEX/2D-XS

Núcleo	k_{eff}					
	AZNHEX/3D-XS			AZNHEX/2D-XS		
	ARO	ARI _p	ARI _{ps}	ARO	ARI _p	ARI _{ps}
Carburo	1.01336	0.98562	0.96914	1.02579	0.99570	-
Óxido	1.034380	0.99578	0.97923	1.044867	1.00323	0.98497
Metálico	1.02254	0.87469	0.80639	1.03757	0.88437	0.82224
Pequeño Óxido	1.05896	0.90986	0.79088	1.07660	0.91872	0.84950

En la Tabla 5.5 se observa que el valor para la k_{eff} para el núcleo de carburo para el caso en dos dimensiones de ARI_{ps} no se proporciona debido a que los resultados del flujo son inestables.

En las Tablas 5.6 y 5.7 se comparan los valores de k_{eff} proporcionados por los códigos SERPENT y AZNHEX usando secciones eficaces producidas en 3D y 2D respectivamente y en la Tabla 5.8 se proporciona una comparación del valor k_{eff} respecto a AZNHEX/3D-XS y AZNHEX/2D-XS.

Tabla 5.6 Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos usando el modelo 3D en SERPENT y AZNHEX/3D-XS

Núcleo	Potencia [MWt]	k_{eff}		
		SERPENT 3D	AZNHEX/ 3D-XS	Diferencia (%)
Carburo	ARO	1.05763	1.01336	4.2
	ARI _p	1.03011	0.98562	4.3
	ARI _{ps}	1.01507	0.96914	4.5
Óxido	ARO	1.06795	1.03438	3.1
	ARI _p	1.02928	0.99578	3.3
	ARI _{ps}	1.01246	0.97923	3.3
Metálico	ARO	1.03755	1.02254	1.4
	ARI _p	0.90036	0.87469	2.9
	ARI _{ps}	0.83597	0.80639	3.5
Óxido Pequeño	ARO	1.08116	1.05896	2.1
	ARI _p	0.93887	0.90986	3.1
	ARI _{ps}	0.87720	0.79088	9.8

Tabla 5.7 Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos usando el modelo 3D en SERPENT y AZNHEX/2D-XS

Núcleo		Potencia [MWt]	k_{eff}		
			SERPENT 3D	AZNHEX/ 2D-XS	Diferencia (%)
Carburo	ARO	3,600	1.05763	1.02579	3.0
	ARI _p		1.03011	0.99570	3.3
	ARI _{ps}		1.01507	-	-
Óxido	ARO	1,000	1.06795	1.04487	2.2
	ARI _p		1.02928	1.00323	2.5
	ARI _{ps}		1.01246	0.98497	2.7
Metálico	ARO	1,000	1.03755	1.03757	0.0
	ARI _p		0.90036	0.88437	1.8
	ARI _{ps}		0.83597	0.82224	1.6
Óxido Pequeño	ARO		1.08116	1.07660	0.4
	ARI _p		0.93887	0.91871	2.1
	ARI _{ps}		0.87720	0.84951	3.2

Observando las diferencias en las Tablas 5.6 y 5.7 se nota que en general las diferencias son más pequeñas cuando se utilizan las secciones eficaces en 2D obtenidas con el código SERPENT. Esto es un resultado importante pues demuestra que la estrategia de generación de secciones eficaces juega un papel muy importante en los cálculos.

En todos los casos bajo estudio se mejoraron los resultados al general los bancos de XS's en 2D, esto se explica físicamente pues este cálculo toma en cuenta de mejor forma el efecto de las celdas vecinas.

Tabla 5.8 Valores de k_{eff} para los cuatro núcleos con AZNHEX/3D-XS y AZNHEX/2D-XS

Núcleo		Potencia [MWt]	k_{eff}		
			AZNHEX/ 3D-XS	AZNHEX/ 2D-XS	Diferencia (%)
Carburo	ARO	3,600	1.01336	1.02579	1.2
	ARI _p		0.98562	0.99570	1.0
	ARI _{ps}		0.96914	-	-
Óxido	ARO	1,000	1.03438	1.04487	1.0
	ARI _p		0.99578	1.00323	0.7
	ARI _{ps}		0.97923	0.98497	0.6
Metálico	ARO	1,000	1.02254	1.03757	1.5
	ARI _p		0.87469	0.88437	1.1
	ARI _{ps}		0.80639	0.82224	1.9
Óxido Pequeño	ARO	1,000	1.05896	1.07660	1.7
	ARI _p		0.90986	0.91871	1.0
	ARI _{ps}		0.79088	0.84951	7.4

De la Tabla 5.8 se puede observar en resumen el impacto de cada estrategia de generación de secciones eficaces con SERPENT en el cálculo en AZNHEX.

Para continuar con el análisis cinético, se planteó un transitorio semejante al usado en el VVER-440 pero preservando la tridimensionalidad. De los cuatro núcleos hasta ahora considerados se simularon todos transitorios considerándose dos casos: a) La disminución de las secciones de remoción de los grupos de energía 3 y 4 correspondientes a los materiales que ocupan las posiciones donde se ubican los elementos de control primarios (ARI_p) durante el tiempo inicial de 0.0 seg hasta 0.2 seg regresando estas secciones a los valores que tenían inicialmente por 0.2s más o sea hasta 0.4 seg y manteniendo este estado por 0.1 segundos más., b) agregando al caso anterior los ensambles de control secundarios (ARI_{ps}). Estos transitorios duran en total 0.5s. La expresión matemática para la perturbación introducida es la siguiente:

$$\Delta \Sigma_{ag}(t) = \Sigma_{ag}(0) \cdot \begin{cases} -0.25t/s & \text{si } 0 \leq t \leq 0.2s \\ 0.25t/s - 0.1 & \text{si } 0.2s \leq t \leq 0.4s \\ 0 & \text{si } 0.4s \leq t \leq 0.5s \end{cases} ; g = 3,4 \quad (4)$$

El mallado espacial para esta simulación es el mismo que se empleó para el caso estacionario correspondiente, es decir de 1x1 dentro de cada cuadrante de los prismas hexagonales usados en AZNHEX y de n divisiones en la dirección z, dependiendo del núcleo que se está simulando. El paso de tiempo fue de 0.01s y se usó el método Euler hacia atrás ($\Theta=1$) tanto para la obtención de los flujos de neutrones como las concentraciones de precursores.

En las Figuras 5.10 a 5.13 se muestra el transitorio mencionado anteriormente para AZNHEX/3D-XS: uno para cuando sólo se mueven las barras primarias y otro cuando se mueven las barras de control primarias y secundarias con un paso de tiempo de 0.01 seg, se observa que la potencia máxima está alrededor de 0.2 seg, notando que el transitorio cuando sólo se mueven barras primarias (ARI_p) la potencia máxima es más pequeña que cuando se mueven barras primarias y secundarias (ARI_{ps}), esto se debe a que las barras secundarias tienen mayor efecto ya que son consideradas barras de seguridad, haciendo que el transitorio sea más severo. Para las Figuras 5.14 a 5.17 se simula el mismo transitorio durante el mismo tiempo de 0.5 seg anteriormente mencionado pero ahora utilizando AZNHEX/2D-XS para los cuatro núcleos diferentes del tipo SFR.

En las Tablas 5.9 y 5.10 se observa la potencia normalizada máxima, P_{\max} , y la potencia normalizada al final del transitorio, $P_{1/2}$, notando que P_{\max} ocurre al tiempo de 0.2 seg para AZNHEX/3D-XS y AZNHEX/2D-XS respectivamente para cada núcleo diferente del tipo SFR, y para los dos casos que se están simulando del transitorio.

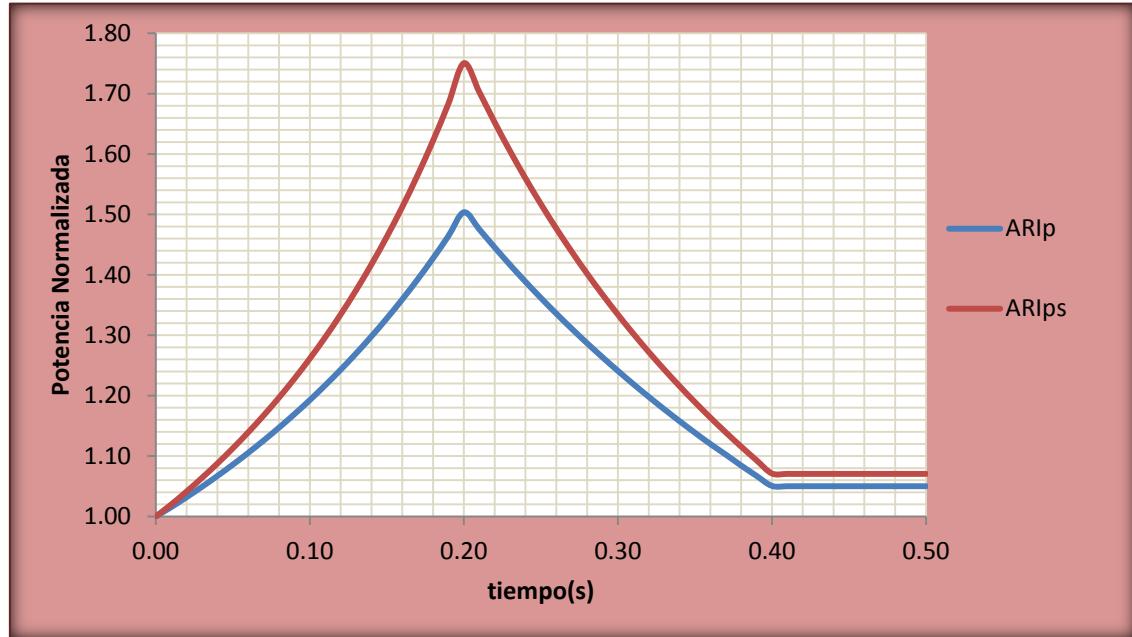


Figura 5.10 Transitorios del núcleo de carburo utilizando XS en 3D

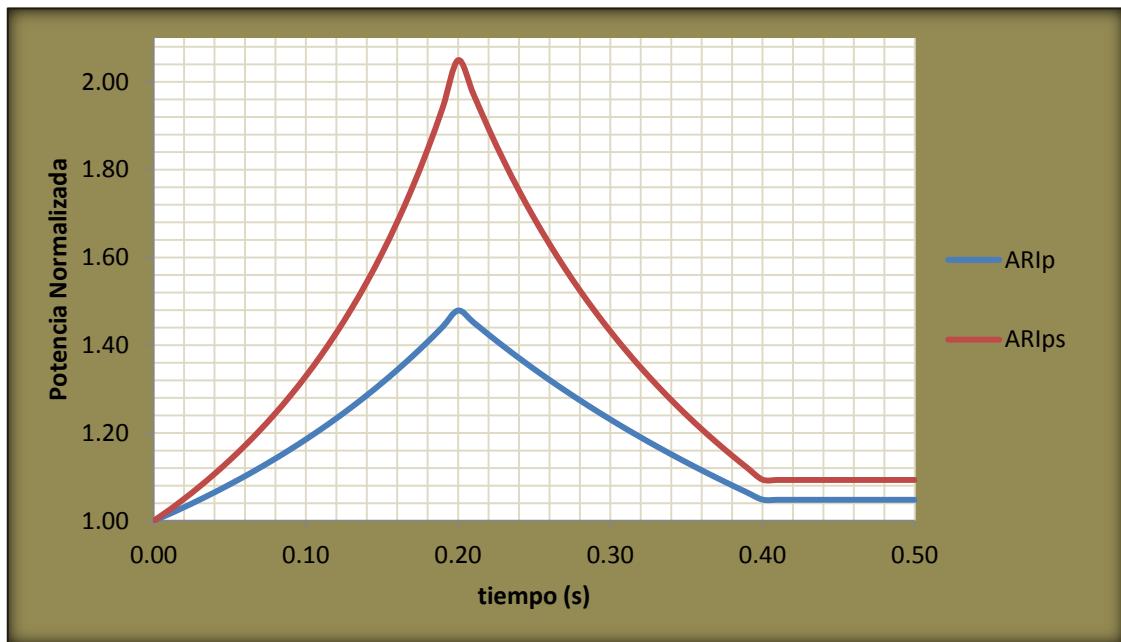


Figura 5.11 Transitorios del núcleo de óxido utilizando XS en 3D

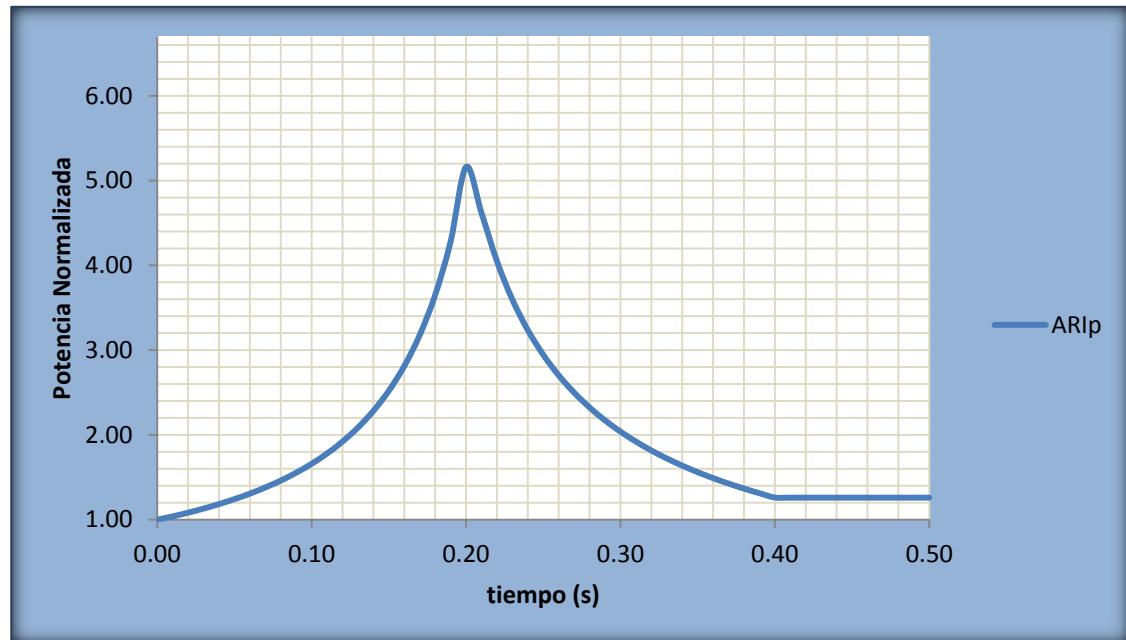


Figura 5.12 Transitorios del núcleo metálico utilizando XS en 3D

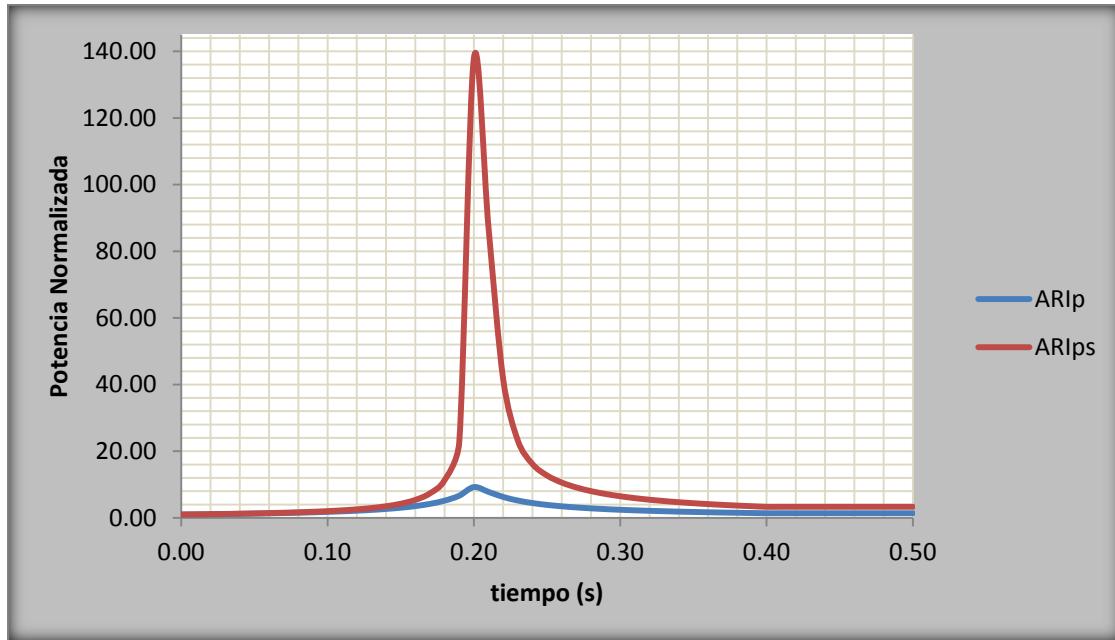


Figura 5.13 Transitorios del núcleo de óxido pequeño utilizando XS en 3D

Tabla 5.9 Valores de la potencia normalizada máxima y al final del transitorio

Núcleo	AZNHEX/3D-XS			
	P_{\max}		$P_{1/2}$	
	ARI_p	ARI_{ps}	ARI_p	ARI_{ps}
metálico	5.16086	-	1.25953	-
óxido pequeño	9.23582	137.96615	1.38782	3.32024
carburo	1.50365	1.75053	1.05005	1.07050
óxido	1.47907	2.04955	1.04775	1.09300

En la Tabla 5.9 se observa que la potencia máxima es mayor para el caso ARI_{ps} para los cuatro núcleos, al igual que la potencia al final del transitorio es mayor en el caso ARI_{ps} para los cuatro núcleos del tipo SFR.

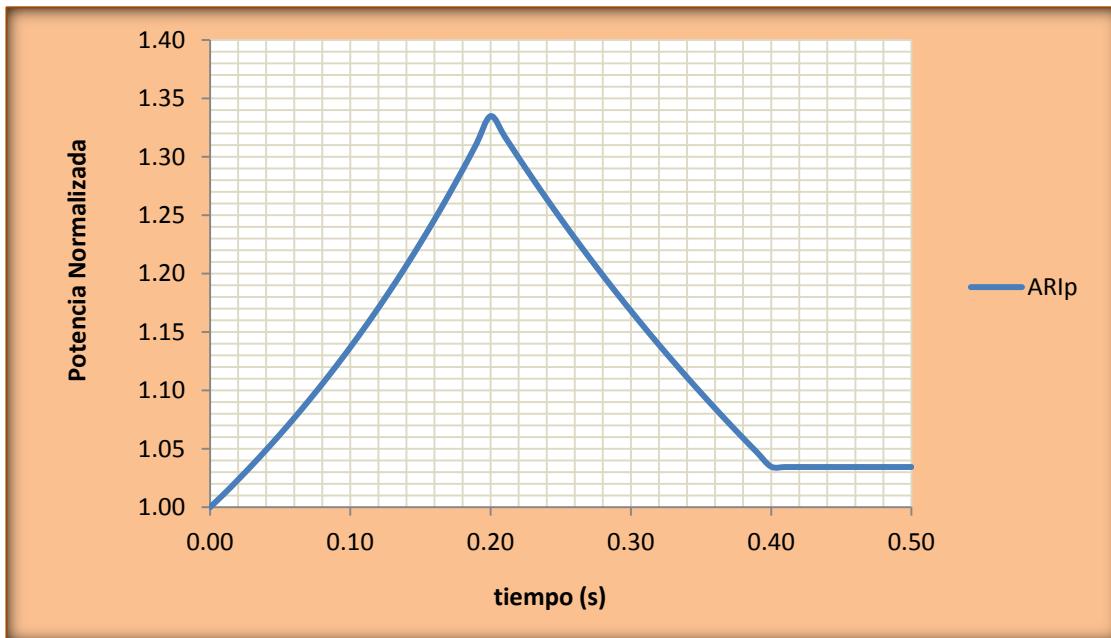


Figura 5.14 Transitorios del núcleo de carburo utilizando XS en 2D

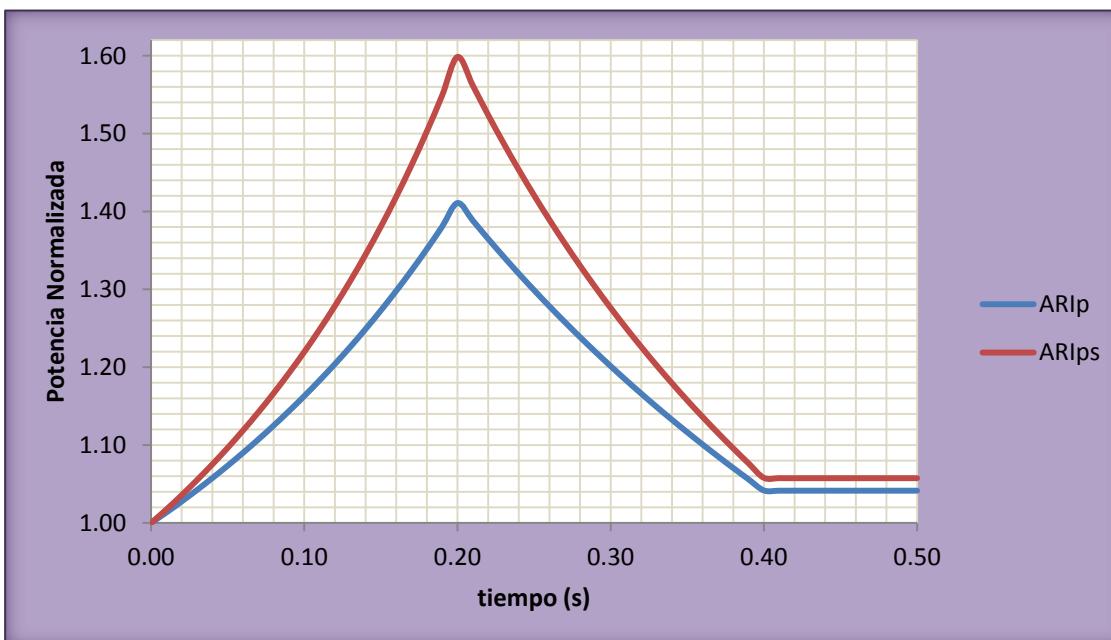


Figura 5.15 Transitorios del núcleo de óxido utilizando XS en 2D

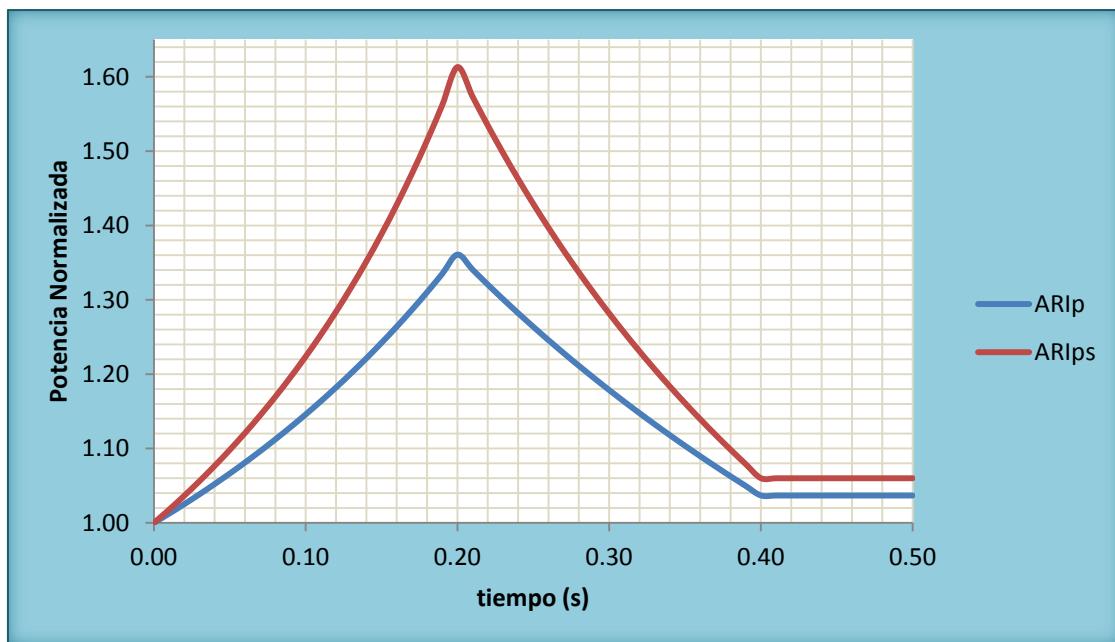


Figura 5.16 Transitorios del núcleo metálico utilizando XS en 2D

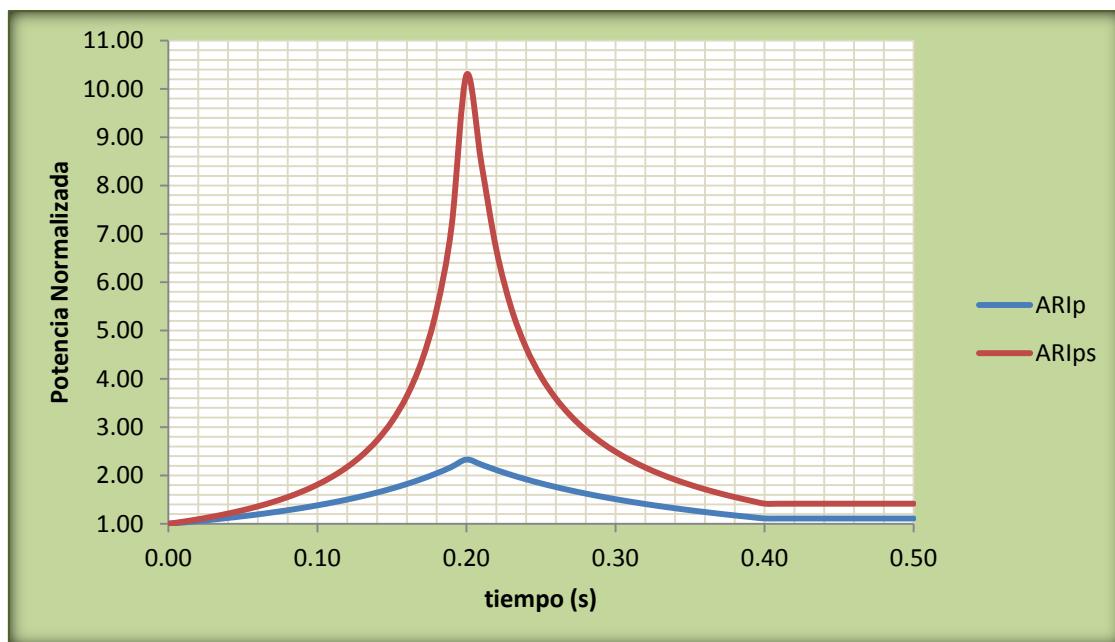


Figura 5.17 Transitorios del núcleo de óxido pequeño utilizando XS en 2D

Tabla: 5.10 Valores de la potencia normalizada máxima y al final del transitorio

Núcleo	AZNNHEX/2D-XS			
	P_{\max}		$P_{1/2}$	
	ARI _p	ARI _{ps}	ARI _p	ARI _{ps}
metálico	1.36081	1.61306	1.03673	1.05994
óxido pequeño	2.32880	10.28932	1.10957	1.41559
carburo	1.33490	-	1.03446	-
óxido	1.41084	1.59847	1.04142	1.05749

En la Tabla 5.10 se observa nuevamente el efecto de la generación de secciones eficaces pero en este caso en transitorio. Es importante resaltar que todos los casos que se corrieron con secciones eficaces generadas en 2D arrojan valores menores en cuanto al pico de potencia así como la potencia promedio.

El efecto de las barras de control en el núcleo de óxido pequeño es mucho más importante que en los núcleos más grandes, esto demuestra también como una perturbación causa efectos mayores cuando la geometría es pequeña por lo que en un reactor más grande, la perturbación local se propaga más despacio.

Finalmente, en los casos en que no se reportan valores se presentaron instabilidades numéricas que resultaron en oscilaciones del flujo y por consiguiente de la potencia. Un análisis más detallado se deberá realizar para poder implementar algoritmos, por ejemplo de rebalance, para evitar estos comportamientos. Sin embargo cabe señalar que la mayoría de los cálculos arrojaron resultados bastante prometedores.

CAPÍTULO 6

*DISCUSIÓN DE
RESULTADOS*

Con los datos obtenidos en SERPENT se puede notar que los núcleos de potencia de 3,600 MWt (Carburo y Óxido), cuando se hace la simulación tridimensional del núcleo con los sistemas de control primario y secundario extraídos condición ARO (All Rods Out), su valor de k_{eff} está por arriba de 1.057 y 1.067 respectivamente, es decir son supercríticos como era de esperarse, y en el caso de los núcleos de potencia de 1,000 MWt (Metálico y Óxido pequeño), su valor está en 1.037 y 1.08 respectivamente, es decir son supercríticos también. Cuando se hace la simulación con los sistemas de control primario y secundario en su totalidad insertados condición ARI (All Rods In) se nota que el valor de k_{eff} baja más en los núcleos pequeños, que en los núcleos grandes ya que su valor está alrededor de 0.83 y 1.01 respectivamente y cuando se hace la simulación de los sistemas primarios insertados en su totalidad y los sistemas de control secundarios extraídos en su totalidad el valor de k_{eff} se encuentra por debajo de la unidad para los núcleos pequeños (0.90) y para los núcleos grandes están por arriba de la unidad (1.02). En la Figura 6.1 Se observa un ejemplo de uno de los núcleos simulados con el código SERPENT que proporciona una vista axial y una vista radial para 3D del núcleo y en la Figura 6.2 para uno de los segmentos de ensamble (celda) en 2D.

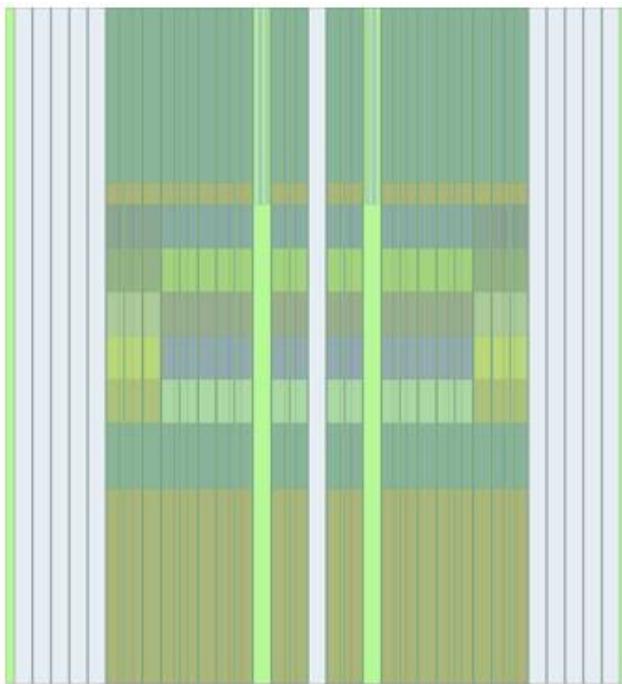
De los archivos de salida de SERPENT, los que tienen extensión “res” se extrajeron los parámetros que se ocupan en el código AZNHEX como son las XS, para el caso estacionario y los parámetros cinéticos para el caso dependiente del tiempo, para la simulación del transitorio.

Se utilizó el código AZNHEX para la simulación del núcleo simplificado de un VVER-440, originalmente tridimensional, con la finalidad de comprobar que el código funcionara adecuadamente. Para generar el archivo de entrada para este reactor se consideró el núcleo completo radialmente ya que el transitorio que se va a considerar no presenta simetría alguna.

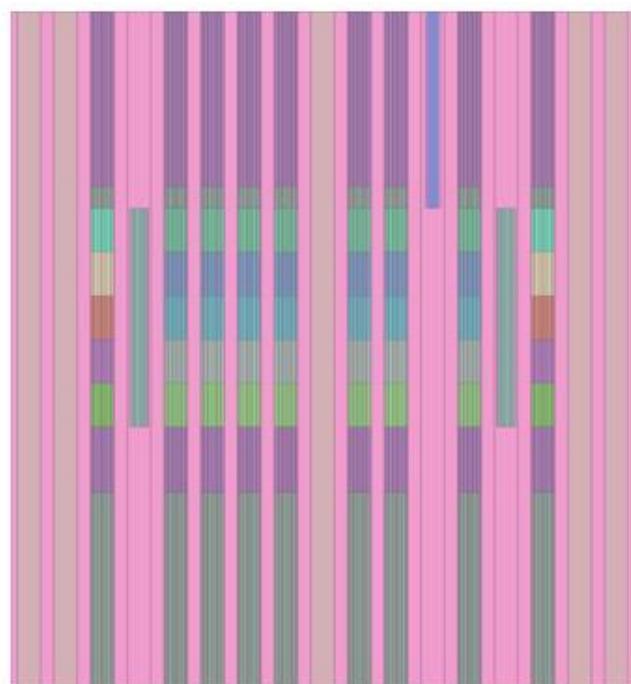
Se simula un transitorio para el movimiento de dos barras de control, el cual se define por medio de la evolución temporal de la sección transversal de absorción térmica Σ_{a2} para el material 8.

El transitorio que se simuló para el VVER-440 sólo considera un grupo de neutrones retardados efectivo. Es decir que el valor de beta usado fue de 0.0065 y el de lambda fue de 0.4352517 s-1.

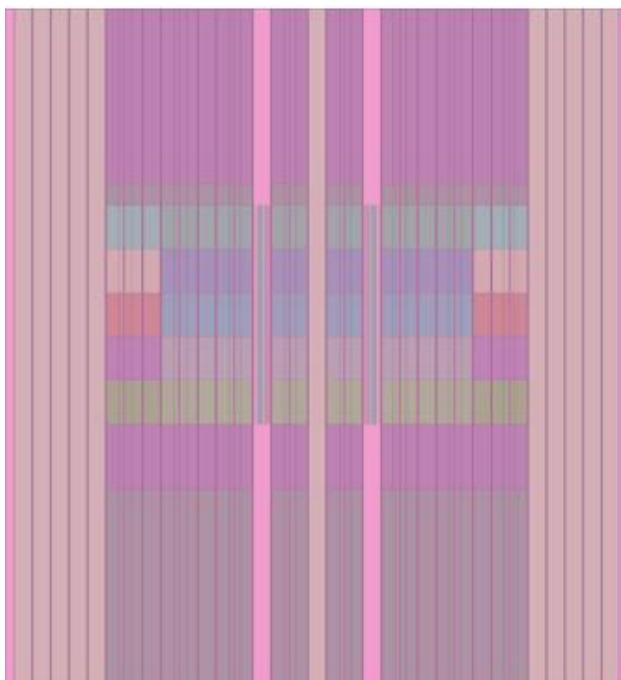
La k_{eff} para el transitorio simulado va convergiendo conforme se va refinando la malla. Una vez que se ha obtenido el estado estacionario respectivo se realizaron simulaciones del transitorio para cuatro pasos de tiempo diferentes, $\Delta t = 0.02$ s, 0.01 s, 0.005 s y 0.001 s. De la Tabla 5.4 se puede observar en forma resumida el valor máximo de la potencia alcanzada, el tiempo aproximado en que ésta se alcanza que es alrededor de 2s y finalmente el valor de ésta al final del transitorio, es decir a los tres segundos.



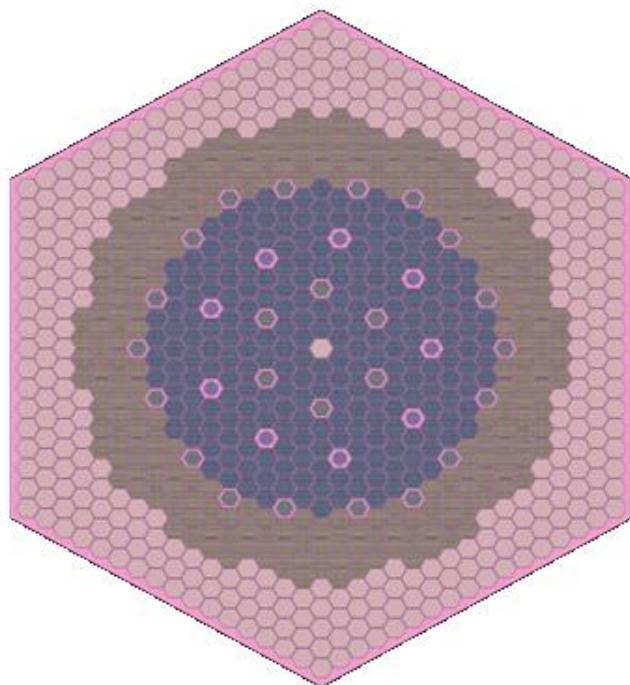
(a) ARO



(b) ARIp

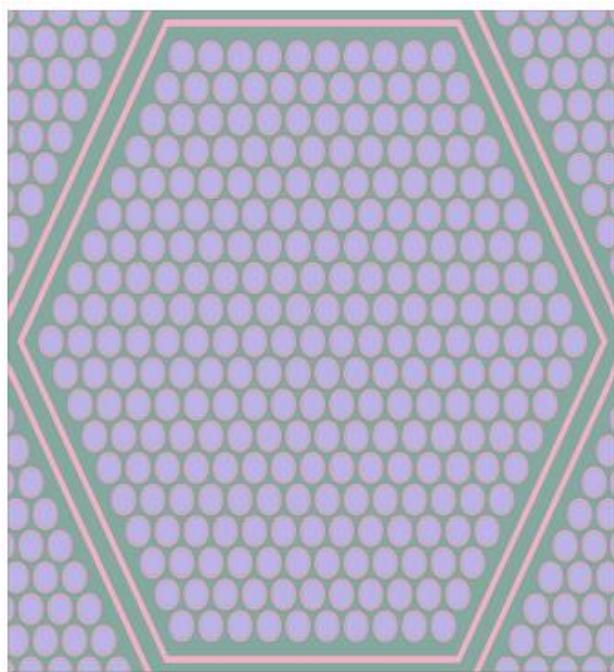


(c) ARIps

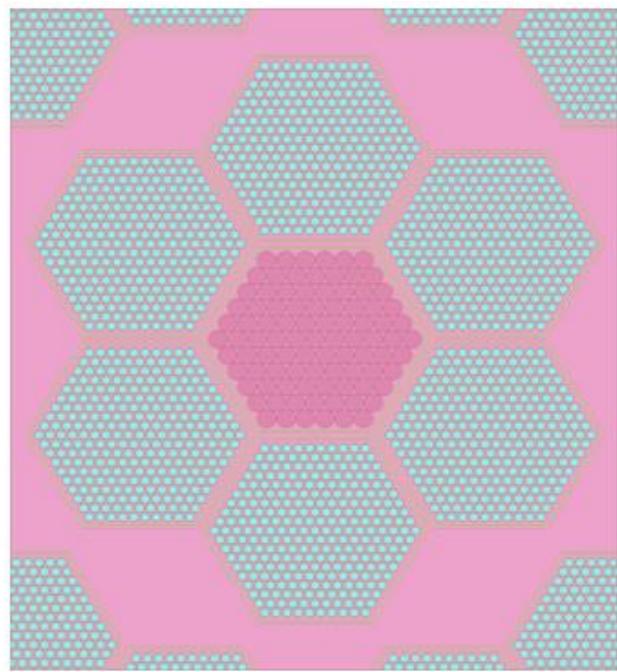


(d) Núcleo de Óxido

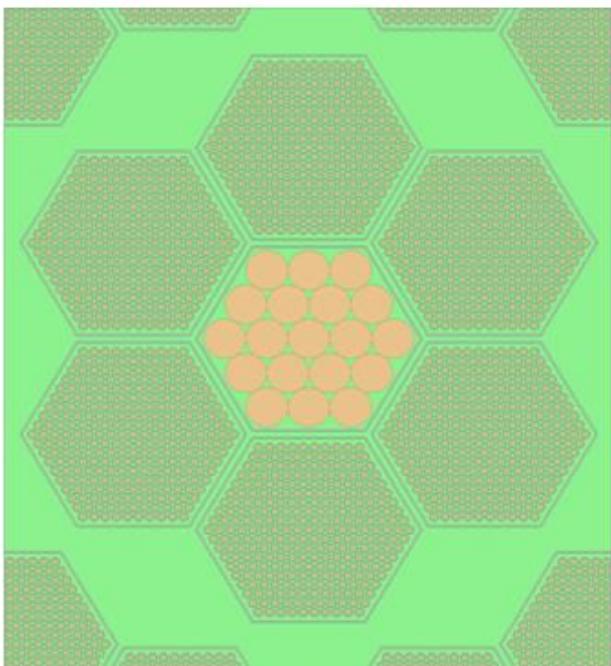
Figura 6.1 (a) Sistemas de control primario y secundario extraídos en su totalidad (ARO), (b) sistemas de control primario insertado en su totalidad y sistema secundario extraído en su totalidad (ARIp) y (c) sistemas de control primario y secundario en su totalidad insertados (ARIps) y en (d) vista axial del núcleo de Óxido



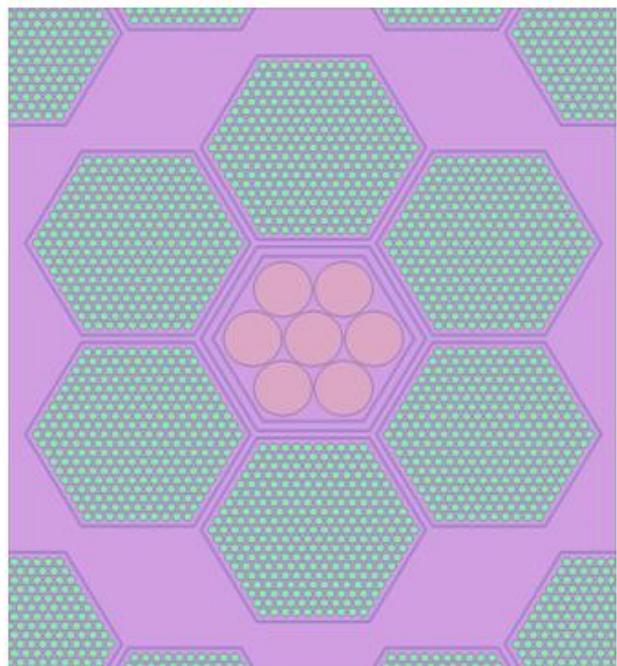
(a) combustible



(b) reflector



(c) blindaje



(d) control

Figura 6.2 Segmento de los ensambles (a) combustible, (b) reflector, (c) blindaje y (d) control del núcleo de Óxido pequeño

La P_{\max} converge consistentemente para un paso de tiempo fijo cuando se refina la malla espacial, así como para un mallado espacial fijo cuando se disminuye el paso de tiempo. De igual forma, la potencia al final del transitorio (P_{3s}) se observa que converge con los refinamientos.

Una vez de que se verificó que el código funcionaba satisfactoriamente entonces se procedió a trabajar con los archivos de entrada para la modelación 3D de los núcleos del tipo SFR con AZNHEX, en donde se considera el núcleo completo ya que los núcleos no cuentan con simetría de 90 o de 180 grados que son las únicas simetrías que se pueden trabajar en ANZHEX.

Se ejecutan los archivos de entrada para los cuatro núcleos del tipo SFR para el caso estacionario, el cual proporciona un archivo de salida donde se muestra la k_{eff} y el flujo estacionario para los cuatro grupos de energía, el cual se ocupa después para el caso dependiente del tiempo. Se calcularon los valores del factor de multiplicación usando AZNHEX en 3D pero con secciones eficaces obtenidas con SERPENT en 2D (AZNHEX/2D-XS) y para la modelación en 3D pero con secciones eficaces obtenidas con SERPENT en 3D (AZNHEX/3D-XS), para tres casos diferentes: para cuando los sistemas de control primarios y secundarios están en su totalidad extraídos (ARO), cuando los sistemas de control primario están totalmente insertados y los secundarios totalmente extraídos (ARI_p) y cuando los sistemas de control primario y secundario están totalmente insertados (ARI_{ps}).

Observando las diferencias entre AZNHEX/2D-XS, AZNHEX/3D-XS y SERPENT, se nota que en general las diferencias porcentuales son más pequeñas cuando se utilizan las secciones eficaces en 2D obtenidas con el código SERPENT. Esto es un resultado importante ya que demuestra que la estrategia de generación de secciones eficaces juega un papel muy importante en los cálculos. En todos los casos bajo estudio se observa que los resultados mejoraron al utilizar las secciones eficaces generadas en 2D, esto se explica físicamente pues este cálculo toma en cuenta de mejor forma el efecto de las celdas vecinas.

Para el análisis cinético, se planteó un transitorio semejante al usado en el VVER-440 pero preservando la tridimensionalidad. De los cuatro núcleos hasta ahora considerados se模拟aron todos los transitorios considerándose dos casos: a) La disminución de las secciones de remoción de los grupos de energía 3 y 4 correspondientes a los materiales que ocupan las posiciones donde se ubican los elementos de control primarios (ARI_p) durante el tiempo inicial de 0.0 seg hasta 0.2 seg regresando estas secciones a los valores que tenían inicialmente por 0.2s más o sea hasta 0.4 seg y manteniendo este estado por 0.1 segundos más, b) agregando al caso anterior los ensambles de control secundarios (ARI_{ps}). Estos transitorios duran en total 0.5s.

Este transitorio se simuló usando el código AZNHEX con las metodologías AZNHEX/3D-XS y AZNHEX/2D-XS para cuando es ARI_{ps} y cuando es ARI_p .

Como era de esperarse, se observa que la potencia máxima alcanzada es más pequeña cuando el transitorio implica solo el movimiento de las barras primarias comparando con el caso en que se mueven primarias más secundarias. La potencia normalizada máxima, P_{\max} ,

ocurre al tiempo de 0.2 seg para cada núcleo diferente del tipo SFR, y para los dos casos que se están simulando del transitorio.

El efecto de la generación de secciones eficaces pero en este caso analizando un transitorio es muy significativo. Es muy importante resaltar que todos los casos que se corrieron con secciones eficaces generadas en 2D arrojaron valores menores en cuanto al pico de potencia así como la potencia promedio, en algunos casos de hasta un orden de magnitud menor como es el caso del núcleo de óxido pequeño.

El efecto de las barras de control en el núcleo de óxido pequeño es mucho más importante que en los núcleos más grandes, esto demuestra también como una perturbación causa efectos mayores cuando la geometría es pequeña por lo que en un reactor más grande, la perturbación local se propaga más despacio.

Finalmente, en los casos en que no se reportan valores se presentaron inestabilidades, probablemente de origen numérico, que resultaron en oscilaciones del flujo y por consiguiente de la potencia. Un análisis más detallado se deberá realizar para poder implementar algoritmos, por ejemplo de rebalance, que ayuden a evitar estos comportamientos. Sin embargo cabe señalar que la mayoría de los cálculos arrojaron resultados muy prometedores.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se emplearon dos códigos: SERPENT y AZNHEX, el primero del tipo estocástico basado en el método de Monte Carlo y el segundo del tipo determinístico basado en la solución de las ecuaciones de difusión para varios grupos de energía usando el Método del Elemento Finito de Galerkin con el elemento nodal polinomial RTN-0. SERPENT se empleó para generar las secciones eficaces (XS) requeridas por AZNHEX. Éstas fueron generadas de dos formas: a) basadas en un modelo 3D de un núcleo y b) basadas en la determinación de éstas para cada celda, ya sea de combustible nuclear o de material no multiplicativo, de los diferentes ensambles del núcleo. Esta última opción es la más práctica y la que además arrojó los mejores resultados.

Con el fin de realizar un ejercicio inicial de verificación del código AZNHEX aplicado a una tecnología más estudiada se realizaron varios cálculos para el benchmark VVER-440 (Reactor nuclear de agua presurizada, Ruso), para diferentes pasos de tiempo y diferentes mallados, se puede observar en la Tabla 5.4 que la potencia normalizada máxima está alrededor de 5.0 y 5.5 para los diferentes pasos de tiempo, y que ésta se obtiene al tiempo de 1.02seg. También se puede observar que mientras el mallado es más fino la potencia normalizada máxima va acercándose a un valor fijo, al igual que la potencia normalizada al final del transitorio, entonces con esto se comprobó que el código AZNHEX funciona satisfactoriamente.

Luego, se realizaron diversos cálculos estacionarios con el código SERPENT con el cual se obtuvo el factor de multiplicación en 3D, para cuando los ensambles de control están colocados afuera (ARO) del núcleo, cuando las barras de control primario (ARI_p) están adentro del núcleo y cuando las barras de control primario y secundario (ARI_{ps}) se encuentran insertadas, se observa en la Tabla 4.9 que el valor de la k_{eff} es menor cuando no sólo los ensambles de control primario están completamente insertados si no también los ensambles de control secundario, lo que demuestra que las secundarias son de gran utilidad para apagar el reactor de ser necesario. Es interesante hacer notar que los diseños de núcleos grandes (Carburo y Óxido) son incapaces de llevar al reactor a subcriticidad al insertar las barras de control primarias y/o secundarias. Está fuera del alcance de este trabajo el sugerir modificaciones al diseño de dichos núcleos sin embargo se puede plantear como un trabajo futuro.

Los resultados obtenidos de k_{eff} con el código SERPENT en 3D y AZNHEX/3D-XS para cada uno de los cuatro núcleos tipo SFR considerados no son mayores a 4.5% para los núcleos grandes con una potencia de 3,000 MWt y para los núcleos pequeños no son mayores a 4.6% con una potencia de 1,000 MWt. Una mejora significativa se obtiene corriendo AZNHEX con secciones eficaces calculadas en 2D, en donde una comparación con SERPENT en 3D y AZNHEX/2D-XS no es mayor a 2.5% para los núcleos grandes y para los núcleos pequeños no es mayor al 4.0%. Esto se explica claramente por el grado de información contenido en las secciones eficaces. Mientras las secciones eficaces en 3D son promedios axiales de los ensambles, las secciones eficaces en 2D se calcularon tomando en cuenta el efecto de los vecinos en cada sección axial del núcleo considerado.

De la simulación del benchmark del reactor VVER-440 se verificó que el código AZNHEX funciona adecuadamente dentro de sus limitantes.

Partiendo de los estados estacionarios obtenidos, se simularon transitorios análogos al descrito para el reactor VVER-440. Estas simulaciones se realizaron para el caso ARI_p, y el caso ARI_{ps}. Los resultados obtenidos confirman que el uso adicional de los elementos secundarios conducen a transitorios más severos.

Es importante mencionar que para la simulación de los transitorios del reactor de tipo SFR, si se utiliza el método de Crank-Nicolson ($\theta=0.5$) en la integración numérica se deben de utilizar pasos de tiempo muy pequeños, alrededor de 1.0E-5seg. Sin embargo, cuando se utiliza el método de Euler hacia atrás ($\theta=1.0$), se pueden usar pasos de tiempo del orden de 0.01 seg.

CAPÍTULO 8

*RECOMENDACIONES
Y TRABAJOS
FUTUROS*

El presente trabajo de tesis muestra la forma en que se utilizan SERPENT y AZNHEX, el primero para determinar las secciones eficaces y el segundo, partiendo de dichas secciones eficaces, simula el comportamiento tanto en estado estacionario como dependiente del tiempo. En cuanto a SERPENT es recomendable continuar con su uso en reactores avanzados incluyendo los diferentes estados operacionales de cada una de las celdas de que está compuesto su núcleo, esto con la finalidad de preparar una biblioteca de secciones eficaces que cubra el ciclo o ciclos de operación en que trabajarán los ensambles combustibles. Por otro lado, AZNHEX es un código que está en continua mejora y actualmente carece de lo siguiente:

- Un precondicionador que acelere el método iterativo BICGSTAB que utiliza actualmente lo que reducirá considerablemente el tiempo de cómputo invertido en la solución de un transitorio e incluso en la determinación del estado estacionario ya que también en esta parte se emplea el método BICGSTAB sin precondicionamiento.
- Un modelo que permita simular el movimiento del o los ensambles de control en 3D ya que la simulación del VVER-440 se hace en 2D lo que simplifica en este caso dicha simulación. El modelo que se desarrolle deberá tener la capacidad de corregir satisfactoriamente el efecto llamado "rod cusping".
- Selección automática del paso de tiempo y la aplicación de un método quasi-estático para reducir el tiempo de cómputo en parte de la simulación del transitorio.
- Incorporación de factores de discontinuidad para cada celda.
- Una contraparte que realice los cálculos de balance térmico con la que se pudiera acoplar.
- Considerar simetrías propias de reactores como el VVER o el SFR, es decir de 30, 60, 120 o 180 grados ya que no siempre presentan simetría en un cuadrante.

REFERENCIAS

- [1] “*Generation IV technology*” GEN IV International Forum, <http://www.gen-4.org>, Abril, 2015.
- [2] D. Blanchet, L. Buiron, N. Stauff, K.T. Kyum y T. Taiwo, “*Sodium Fast Reactor Core Definitions*”, version 1.2-September 19th
- [3] T. K. Kim, W. S. Yang, C. Grandy and R. N. Hill, “Core Design Studies for a 1000 MWth Advanced Burner Reactor,” Annals of Nuclear Energy 36 (2009).
- [4] Y. Dai, J. Henry, Z. Tong, X. Avery, J. Malaplate y B. Long, “Neutron/proton irradiation and He effects on the microstructure and mechanical properties of ferritic/martensitic steels T91 and EM10”, Journal of Nuclear Materials, 415, 306-310, 2011.
- [5] Y de Carlan y J. Ribis, “*Nuclear ODS alloys: Fabrication Route, Microstructure and Mechanical Properties*”, ODS alloys for Nuclear Application, CEA SACLAY, FISA 2013
- [6] “*Les matériaux métalliques, une des clés de la 4e génération*”. CLEFS CEA, 55 (2007) 71-73.
- [7] D.S. Gelles, “Development of martensitic steel for high neutron damage applications”, Journal of Nuclear Materials, 239, 99-106, 1996.
- [8] J. Leppänen. Development of a New Monte Carlo Monte Carlo Reactor Physics Code. D.Sc. thesis, Helsinki University of Technology, 2007. VTT Publications 640.
- [9] J. Leppänen, “Serpent Progress Report 2010,” VTT Technical Research Centre of Finland (2011).
- [10] J. Leppänen. *Performance of Woodcock Delta-Tracking in Lattice Physics Applications Using the Serpent Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code*. Ann. Nucl. Energy, 37 (2010) 715–722.
- [11] J. Leppänen, “*SERPENT-a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code*”, User's Manual, June18,2015.
- [12] T. Takeda, H. Ikeda, “3-D Neutron transport benchmarks”, NEACRP-L-330 OECD/NEA Committee on Reactor Physics, (1991).
- [13] J. Esquivel Estrada, E. del Valle Gallegos y A.M. Gómez Torres, “*Solución de la Ecuación de Difusión de Neutrones en Geometría Hexagonal-Z, utilizando el código AZNHEX*”, Congreso Técnico Científico ININ-SUTIN , 2014.
- [14] J. Esquivel Estrada., “*Métodos Nodales Aplicados a la Ecuación de Difusión de Neutrones Dependiente del Tiempo en Geometría Hexagonal-Z*”, Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas, México, D.F., 2015
- [15] J. Esquivel Estrada, E. del Valle Gallegos y G. Alonso Vargas, “*Aplicación del Método Nodal RTN-O para la Solución de la Ecuación de Difusión de Neutrones Dependiente del Tiempo en Geometría Hexagonal-Z*”, XXVI Congreso Nacional de la Sociedad Nuclear Mexicana, XIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Seguridad Radiológica, Puerto Vallarta, Jalisco, México, del 5 al 8 de Julio de 2015.
- [16] S. González-Pintor, D. Ginestar, y G. Verdú, “*Time Integration of the Neutron*

Diffusion Equation on Hexagonal Geometries", Mathematical and Computer Modelling, 52, 1203-1210, (2010).

APÉNDICES

APÉNDICE A

Archivos de entrada de los núcleos en 3D con el código SERPENT

En este apéndice se proporcionan los listados correspondientes a los archivos de entrada que se utilizaron para modelar los cuatro núcleos diferentes del reactor SFR.

Archivo en 3D

```
% ---SFR Core -----
set title " medio núcleo de óxido "
% --- librerias:
set declib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.dec"
set nfylib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.nfy"
set acelib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311u.xsdata"

% --- -----------
set ures 1
set bc 1
set seed 1433877150

% --- Group constant generation
set gcu 0
72 73 74 75 76 77 78 79 80 113
81 82 83 84 85 86 87 88 89 114
90 91 92 93 94 95 96 97 98 115
100 101 102 103 116
104 105 106 107 117
108 109 110 111 112 130
118 119 220 221 222 140

set sym 12
set nfg 4 4.64159E-02 4.00000E-01 1.05000E+01

% --- población de neutrones y potencia:
set pop 200000 500 100
set power 1.00E+09

%%----pins-----%%
pin 99
Na

%% -----Driver interno -----
%%---Combustibles
pin 1
Fuel1 0.3322
HT9 0.3928
Na
```

pin 2
Fuel2 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 3
Fuel3 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 4
Fuel4 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 5
Fuel5 0.3322
HT9 0.3928
Na

% % ----Gas-----

pin 16
He 0.3322
HT9 0.3928
Na

% % ---- Reflector inferior

pin 17
HT9 0.3928
Na

% % -----Estructuras

pin 18
HT9 0.3928
Na

pin 19
SsNa 0.3928
Na

% % -----Driver medio -----

% % ----Combustibles

pin 6
Fuel6 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 7
Fuel7 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 8
Fuel8 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 9
Fuel9 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 10
Fuel10 0.3322
HT9 0.3928

Na

% %----Gas-----

pin 1190
He 0.3322
HT9 0.3928
Na

% %---- Reflector inferior

pin 120
HT9 0.3928
Na

% %----Estructuras

pin 121
HT9 0.3928
Na

pin 122
SsNa 0.3928
Na

% % -----Driver externo -----

% %----Combustibles

pin 11
Fuel11 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 12
Fuel12 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 13
Fuel13 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 14
Fuel14 0.3322
HT9 0.3928
Na

pin 15
Fuel15 0.3322
HT9 0.3928
Na

% %----Gas-----

pin 123
He 0.3322
HT9 0.3928
Na

% %---- Reflector inferior

pin 124
HT9 0.3928
Na

% %-----Estructuras

pin 125
HT9 0.3928
Na

pin 126
SsNa 0.3928
Na

% %-----Ensamble del reflector radial-----

% %---- Reflector radial

pin 20
HT9 0.7756
Na

% %----- reflector inferior

pin 21
HT9 0.7756
Na

% %-----Estructuras

pin 22
HT9 0.7756
Na

pin 23
SsNa 0.7756
Na

% %-----Ensamble Blindaje-----

% %-----Shield rod

pin 24

B4C 1.4277
HT9 1.6794
Na

% %---- Reflector inferior

pin 25
HT9 1.6794
Na

% %-----Estructuras

pin 26
SsNa 1.6794
Na

pin 27
HT9 1.6794
Na

% %-----Ensamble de control-----

% %----- Control absorber

pin 28
B4C1 2.2890
HT9 2.3606
Na

lat 33.20000212108966

lat 34 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 35 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 36 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %----Gas----

lat 47 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %---- Reflector inferior

lat 48 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %-----Estructuras

lat 49 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 50 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% % -----Driver medio -----

% % -----Driver-----

% %----Combustibles

lat 37 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 38 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 39 20.000212108966

99 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 99 99 99 99
99 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 99 99 99 99
99 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 99 99 99 99 99
99 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 99 99 99 99 99 99
99 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 99 99 99 99 99 99 99
99 8 8 8 8 8 8 8 8 8 99 99 99 99 99 99 99 99
99 8 8 8 8 8 8 8 8 8 99 99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99

lat 40 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 41 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %----Gas-----

lat 470 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %---- Reflector inferior

lat 480 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %-----Estructuras

lat 490 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 500 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 122 99

% % ----- Driver Externo -----

% %----Combustibles

lat 42 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 43 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 44 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 45 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

lat 46 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

99 15 15 15 15 15 15 15 15 15 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99
99 99

% %----Gas-----

lat 471 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %---- Reflector inferior

lat 481 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

%%%-----Estructuras

lat 49120000212108966

lat 501 2 0.0 0.0 21 21 0.8966

% %-----Ensamble del reflector radial-----

% %----- Reflector radial

lat 51 2 0.0 0.0 13 13 1.5528

99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 99 99 99 99 20 20 20 20 20 20 99
99 99 99 99 99 20 20 20 20 20 20 20 99
99 99 99 99 20 20 20 20 20 20 20 20 99
99 99 99 20 20 20 20 20 20 20 20 20 99
99 99 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 99
99 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 99
99 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 99 99 99
99 20 20 20 20 20 20 20 20 20 99 99 99 99
99 20 20 20 20 20 20 20 99 99 99 99 99 99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99

% % ----- reflector inferior

lat 52 2 0.0 0.0 13 13 1.5528

99 21 21 21 21 21 21 99 99 99 99 99 99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99

% %-----Estructuras

lat 53 2 0.0 0.0 13 13 1.5528

99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 99 99 99 22 22 22 22 22 22 99
99 99 99 99 99 22 22 22 22 22 22 22 99
99 99 99 99 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 99 99 22 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 99 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 22 99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99

lat 54 2 0.0 0.0 13 13 1.5528

99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 99 99 99 23 23 23 23 23 23 99
99 99 99 99 99 23 23 23 23 23 23 23 99
99 99 99 99 23 23 23 23 23 23 23 23 99
99 99 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 99
99 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 99
99 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 99
99 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 99
99 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 99
99 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 23 99
99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99 99

% %-----Ensamble Blindaje-----

% %-----Shield rod

lat 55 2 0.0 0.0 7 7 3.3603

99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 24 24 24 99
99 99 24 24 24 24 99
99 24 24 24 24 24 99
99 24 24 24 24 99 99
99 24 24 24 99 99 99
99 99 99 99 99 99

% %---- Reflector inferior

lat 56 2 0.0 0.0 7 7 3.3603

99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 25 25 25 99
99 99 25 25 25 25 99
99 25 25 25 25 25 99
99 25 25 25 25 99 99
99 99 99 99 99 99 99

% %-----Estructuras

lat 57 2 0.0 0.0 7 7 3.3603

99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 26 26 26 99

99 99 26 26 26 26 99
99 26 26 26 26 26 99
99 26 26 26 26 99 99
99 26 26 26 99 99 99
99 99 99 99 99 99 99

lat 58 2 0.0 0.0 7 7 3.3603

99 99 99 99 99 99 99
99 99 99 27 27 27 27 99
99 99 27 27 27 27 27 99
99 27 27 27 27 27 27 99
99 27 27 27 27 27 99 99
99 27 27 27 99 99 99
99 99 99 99 99 99 99

% % -----Ensamble de control-----

% % ----- Control absorber

lat 59 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 28 28 99
99 28 28 28 99
99 28 28 99 99
99 99 99 99 99

% % ----- Empty duct

lat 60 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 29 29 99
99 29 29 29 99
99 29 29 99 99
99 99 99 99 99

% % -----Reflector inferior

lat 61 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 30 30 99
99 30 30 30 99
99 30 30 99 99
99 99 99 99 99

% % -----Estructura

lat 62 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 31 31 99
99 31 31 31 99
99 31 31 99 99
99 99 99 99 99

% % -----Ensamble de Control Secundario-----

% % -----Ensamble de control-----

% % ----- Control absorber

lat 590 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 280 280 99
99 280 280 280 99
99 280 280 99 99

99 99 99 99 99

%%----- Empty duct

lat 600 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 290 290 99
99 290 290 290 99
99 290 290 99 99
99 99 99 99 99

%%-----Reflector inferior

lat 610 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 300 300 99
99 300 300 300 99
99 300 300 99 99
99 99 99 99 99

%%-----Estructura

lat 620 2 0.0 0.0 5 5 4.8578

99 99 99 99 99
99 99 310 310 99
99 310 310 310 99
99 310 310 99 99
99 99 99 99 99

%%-----Universos-----

%% -----Driver interno -----

%%-----Universo 72-----

surf A0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf A1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf A2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf A3 pz -11.49
surf A4 pz 11.49

cell A5 72 outside A4

cell A6 72 fill 34 -A0 A3 -A4
cell A7 72 HT9 A0 -A1 A3 -A4
cell A8 72 Na A1 -A2 A3 -A4
cell A9 72 Na A2 A3 -A4

cell A10 72 outside -A3

%%-----Universo 73-----

surf B0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf B1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf B2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf B3 pz -34.48
surf B4 pz -11.49

cell B5 73 outside B4

cell B6 73 fill 33 -B0 B3 -B4
cell B7 73 HT9 B0 -B1 B3 -B4
cell B8 73 Na B1 -B2 B3 -B4
cell B9 73 Na B2 B3 -B4

cell B10 73 outside -B3

% %-----Universo 74-----

surf C0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf C1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf C2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf C3 pz -57.47
surf C4 pz -34.48

cell C5 74 outside C4

cell C6 74 fill 32 -C0 C3 -C4
cell C7 74 HT9 C0 -C1 C3 -C4
cell C8 74 Na C1 -C2 C3 -C4
cell C9 74 Na C2 C3 -C4

cell C10 74 outside -C3

% %-----Universo 75-----

surf D0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf D1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf D2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf D3 pz -169.86
surf D4 pz -57.47

cell D5 75 outside D4

cell D6 75 fill 48 -D0 D3 -D4
cell D7 75 HT9 D0 -D1 D3 -D4
cell D8 75 Na D1 -D2 D3 -D4
cell D9 75 Na D2 D3 -D4

cell D10 75 outside -D3

% %-----Universo 76-----

surf E0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf E1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf E2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf E3 pz -205.62
surf E4 pz -169.86

cell E5 76 outside E4

cell E6 76 fill 50 -E0 E3 -E4
cell E7 76 HT9 E0 -E1 E3 -E4
cell E8 76 Na E1 -E2 E3 -E4
cell E9 76 Na E2 E3 -E4

cell E10 76 outside -E3

% %-----Universo 77-----

surf F0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf F1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf F2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf F3 pz 11.49
surf F4 pz 34.48

cell F5 77 outside F4

cell F6 77 fill 35 -F0 F3 -F4
cell F7 77 HT9 F0 -F1 F3 -F4
cell F8 77 Na F1 -F2 F3 -F4
cell F9 77 Na F2 F3 -F4

cell F10 77 outside -F3

% %-----Universo 78-----

surf G0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf G1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf G2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf G3 pz 34.48
surf G4 pz 57.47

cell G5 78 outside G4

cell G6 78 fill 36 -G0 G3 -G4
cell G7 78 HT9 G0 -G1 G3 -G4
cell G8 78 Na G1 -G2 G3 -G4
cell G9 78 Na G2 G3 -G4

cell G10 78 outside -G3

% %-----Universo 79-----

surf H0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf H1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf H2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf H3 pz 57.47
surf H4 pz 229.88

cell H5 79 outside H4

cell H6 79 fill 47 -H0 H3 -H4
cell H7 79 HT9 H0 -H1 H3 -H4
cell H8 79 Na H1 -H2 H3 -H4
cell H9 79 Na H2 H3 -H4

cell H10 79 outside -H3

% %-----Universo 80-----

surf I0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf I1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf I2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf I3 pz 229.88
surf I4 pz 274.58

cell I5 80 outside I4

cell I6 80 fill 49 -I0 I3 -I4
cell I7 80 HT9 I0 -I1 I3 -I4
cell I8 80 Na I1 -I2 I3 -I4
cell I9 80 Na I2 I3 -I4

cell I10 80 outside -I3

% % -----Driver medio -----

% %-----Universo 81-----

surf J0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf J1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf J2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf J3 pz -11.49
surf J4 pz 11.49

cell J5 81 outside J4

cell J6 81 fill 39 -J0 J3 -J4
cell J7 81 HT9 J0 -J1 J3 -J4
cell J8 81 Na J1 -J2 J3 -J4
cell J9 81 Na J2 J3 -J4

cell J10 81 outside -J3

% %-----Universo 82-----

surf V0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf V1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf V2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf V3 pz -34.48
surf V4 pz -11.49

cell V5 82 outside V4

cell V6 82 fill 38 -V0 V3 -V4
cell V7 82 HT9 V0 -V1 V3 -V4
cell V8 82 Na V1 -V2 V3 -V4
cell V9 82 Na V2 V3 -V4

cell V10 82 outside -V3

% %-----Universo 83-----

surf W0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf W1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf W2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf W3 pz -57.47
surf W4 pz -34.48

cell W5 83 outside W4

cell W6 83 fill 37 -W0 W3 -W4
cell W7 83 HT9 W0 -W1 W3 -W4
cell W8 83 Na W1 -W2 W3 -W4
cell W9 83 Na W2 W3 -W4

cell W10 83 outside -W3

% %-----Universo 84-----

surf X0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf X1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf X2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf X3 pz -169.86
surf X4 pz -57.47

cell X5 84 outside X4

cell X6 84 fill 480 -X0 X3 -X4
cell X7 84 HT9 X0 -X1 X3 -X4
cell X8 84 Na X1 -X2 X3 -X4
cell X9 84 Na X2 X3 -X4

cell X10 84 outside -X3

% %-----Universo 85-----

surf N0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf N1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf N2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf N3 pz -205.62
surf N4 pz -169.86

cell N5 85 outside N4

cell N6 85 fill 500 -N0 N3 -N4
cell N7 85 HT9 N0 -N1 N3 -N4
cell N8 85 Na N1 -N2 N3 -N4
cell N9 85 Na N2 N3 -N4

cell N10 85 outside -N3

% %-----Universo 86-----

surf O0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf O1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf O2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf O3 pz 11.49
surf O4 pz 34.48

cell O5 86 outside O4

cell O6 86 fill 40 -O0 O3 -O4
cell O7 86 HT9 O0 -O1 O3 -O4
cell O8 86 Na O1 -O2 O3 -O4
cell O9 86 Na O2 O3 -O4

cell O10 86 outside -O3

% %-----Universo 87-----

surf P0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf P1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf P2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf P3 pz 34.48
surf P4 pz 57.47

cell P5 87 outside P4

cell P6 87 fill 41 -P0 P3 -P4
cell P7 87 HT9 P0 -P1 P3 -P4
cell P8 87 Na P1 -P2 P3 -P4
cell P9 87 Na P2 P3 -P4

cell P10 87 outside -P3

% %-----Universo 88-----

surf Q0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf Q1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf Q2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf Q3 pz 57.47
surf Q4 pz 229.88

cell Q5 88 outside Q4

cell Q6 88 fill 470 -Q0 Q3 -Q4
cell Q7 88 HT9 Q0 -Q1 Q3 -Q4
cell Q8 88 Na Q1 -Q2 Q3 -Q4
cell Q9 88 Na Q2 Q3 -Q4

cell Q10 88 outside -Q3

% %-----Universo 89-----

surf R0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf R1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf R2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf R3 pz 229.88
surf R4 pz 274.58

cell R5 89 outside R4

cell R6 89 fill 490 -R0 R3 -R4
cell R7 89 HT9 R0 -R1 R3 -R4
cell R8 89 Na R1 -R2 R3 -R4
cell R9 89 Na R2 R3 -R4

cell R10 89 outside -R3

% % -----Driver externo -----

% %-----Universo 90 -----

```
surf S0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf S1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf S2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf S3 pz -11.49
surf S4 pz 11.49
```

```
cell S5 90 outside S4
```

```
cell S6 90 fill 44 -S0 S3 -S4
cell S7 90 HT9 S0 -S1 S3 -S4
cell S8 90 Na S1 -S2 S3 -S4
cell S9 90 Na S2 S3 -S4
```

```
cell S10 90 outside -S3
```

```
% %-----Universo 91-----
```

```
surf T0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf T1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf T2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf T3 pz -34.48
surf T4 pz -11.49
```

```
cell T5 91 outside T4
```

```
cell T6 91 fill 43 -T0 T3 -T4
cell T7 91 HT9 T0 -T1 T3 -T4
cell T8 91 Na T1 -T2 T3 -T4
cell T9 91 Na T2 T3 -T4
```

```
cell T10 91 outside -T3
```

```
% %-----Universo 92-----
```

```
surf U0 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf U1 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf U2 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf U3 pz -57.47
surf U4 pz -34.48
```

```
cell U5 92 outside U4
```

```
cell U6 92 fill 42 -U0 U3 -U4
cell U7 92 HT9 U0 -U1 U3 -U4
cell U8 92 Na U1 -U2 U3 -U4
cell U9 92 Na U2 U3 -U4
```

```
cell U10 92 outside -U3
```

```
% %-----Universo 93-----
```

```
surf V10 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf V11 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf V12 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf V13 pz -169.86
surf V14 pz -57.47
```

```
cell V15 93 outside V14
```

```
cell V16 93 fill 481 -V10 V13 -V14
cell V17 93 HT9 V10 -V11 V13 -V14
cell V18 93 Na V11 -V12 V13 -V14
cell V19 93 Na V12 V13 -V14
```

```
cell V110 93 outside -V13
```

```
% %-----Universo 94-----
```

```
surf W10 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf W11 hexyc 0.0 0.0 7.90615
```

```

surf W12 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf W13 pz -205.62
surf W14 pz -169.86

cell W15 94 outside W14

cell W16 94 fill 501 -W10 W13 -W14
cell W17 94 HT9 W10 -W11 W13 -W14
cell W18 94 Na W11 -W12 W13 -W14
cell W19 94 Na W12 W13 -W14

cell W110 94 outside -W13

%%-----Universo 95-----

surf X10 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf X11 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf X12 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf X13 pz 11.49
surf X14 pz 34.48

cell X15 95 outside X14

cell X16 95 fill 45 -X10 X13 -X14
cell X17 95 HT9 X10 -X11 X13 -X14
cell X18 95 Na X11 -X12 X13 -X14
cell X19 95 Na X12 X13 -X14

cell X110 95 outside -X13

%%-----Universo 96-----

surf Y10 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf Y11 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf Y12 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf Y13 pz 34.48
surf Y14 pz 57.47

cell Y15 96 outside Y14

cell Y16 96 fill 46 -Y10 Y13 -Y14
cell Y17 96 HT9 Y10 -Y11 Y13 -Y14
cell Y18 96 Na Y11 -Y12 Y13 -Y14
cell Y19 96 Na Y12 Y13 -Y14

cell Y110 96 outside -Y13

%%-----Universo 97-----

surf Z10 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf Z11 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf Z12 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf Z13 pz 57.47
surf Z14 pz 229.88

cell Z15 97 outside Z14

cell Z16 97 fill 471 -Z10 Z13 -Z14
cell Z17 97 HT9 Z10 -Z11 Z13 -Z14
cell Z18 97 Na Z11 -Z12 Z13 -Z14
cell Z19 97 Na Z12 Z13 -Z14

cell Z110 97 outside -Z13

%%-----Universo 98-----

surf A00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf A01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf A02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf A03 pz 229.88

```

surf A04 pz 274.58
cell A05 98 outside A04
cell A06 98 fill 491 -A00 A03 -A04
cell A07 98 HT9 A00 -A01 A03 -A04
cell A08 98 Na A01 -A02 A03 -A04
cell A09 98 Na A02 A03 -A04

cell A010 98 outside -A03

% %-----Ensamble del reflector radial-----

% %-----Universo 100 -----

surf B00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf B01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf B02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf B03 pz -57.47
surf B04 pz 229.88

cell B05 100 outside B04

cell B06 100 fill 51 -B00 B03 -B04
cell B07 100 HT9 B00 -B01 B03 -B04
cell B08 100 Na B01 -B02 B03 -B04
cell B09 100 Na B02 B03 -B04

cell B010 100 outside -B03

% %-----Universo 101-----

surf C00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf C01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf C02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf C03 pz -169.86
surf C04 pz -57.47

cell C05 101 outside C04

cell C06 101 fill 52 -C00 C03 -C04
cell C07 101 HT9 C00 -C01 C03 -C04
cell C08 101 Na C01 -C02 C03 -C04
cell C09 101 Na C02 C03 -C04

cell C010 101 outside -C03

% %-----Universo 102-----

surf D00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf D01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf D02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf D03 pz -205.62
surf D04 pz -169.86

cell D05 102 outside D04

cell D06 102 fill 54 -D00 D03 -D04
cell D07 102 HT9 D00 -D01 D03 -D04
cell D08 102 Na D01 -D02 D03 -D04
cell D09 102 Na D02 D03 -D04

cell D010 102 outside -D03

% %-----Universo 103-----

surf E00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf E01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf E02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf E03 pz 229.88

surf E04 pz 274.58
 cell E05 103 outside E04
 cell E06 103 fill 53 -E00 E03 -E04
 cell E07 103 HT9 E00 -E01 E03 -E04
 cell E08 103 Na E01 -E02 E03 -E04
 cell E09 103 Na E02 E03 -E04
 cell E010 103 outside -E03
 %%-----Ensamble Blindaje-----
 %%-----Universo 104 -----
 surf F00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
 surf F01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
 surf F02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
 surf F03 pz -57.47
 surf F04 pz 229.88
 cell F05 104 outside F04
 cell F06 104 fill 55 -F00 F03 -F04
 cell F07 104 HT9 F00 -F01 F03 -F04
 cell F08 104 Na F01 -F02 F03 -F04
 cell F09 104 Na F02 F03 -F04
 cell F010 104 outside -F03
 %%-----Universo 105-----
 surf G00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
 surf G01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
 surf G02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
 surf G03 pz -169.86
 surf G04 pz -57.47
 cell G05 105 outside G04
 cell G06 105 fill 56 -G00 G03 -G04
 cell G07 105 HT9 G00 -G01 G03 -G04
 cell G08 105 Na G01 -G02 G03 -G04
 cell G09 105 Na G02 G03 -G04
 cell G010 105 outside -G03
 %%-----Universo 106-----
 surf H00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
 surf H01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
 surf H02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
 surf H03 pz -205.62
 surf H04 pz -169.86
 cell H05 106 outside H04
 cell H06 106 fill 57 -H00 H03 -H04
 cell H07 106 HT9 H00 -H01 H03 -H04
 cell H08 106 Na H01 -H02 H03 -H04
 cell H09 106 Na H02 H03 -H04
 cell H010 106 outside -H03
 %%-----Universo 107-----
 surf I00 hexyc 0.0 0.0 7.70785
 surf I01 hexyc 0.0 0.0 7.90615
 surf I02 hexyc 0.0 0.0 8.12355
 surf I03 pz 229.88

surf I04 pz 274.58
 cell I05 107 outside I04
 cell I06 107 fill 58 -I00 I03 -I04
 cell I07 107 HT9 I00 -I01 I03 -I04
 cell I08 107 Na I01 -I02 I03 -I04
 cell I09 107 Na I02 I03 -I04
 cell I010 107 outside -I03
 %%-----Ensamble de control-----
 %%-----Universo 108 -----
 surf J00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
 surf J01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
 surf J02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
 surf J03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
 surf J04 hexyc 0.0 0.0 8.12355
 surf J05 pz -57.47
 surf J06 pz 57.47
 cell J07 108 outside J06
 cell J08 108 fill 59 -J00 J05 -J06
 cell J09 108 HT9 J00 -J01 J05 -J06
 cell J010 108 Na J01 -J02 J05 -J06
 cell J011 108 HT9 J02 -J03 J05 -J06
 cell J012 108 Na J03 -J04 J05 -J06
 cell J013 108 Na J04 J05 -J06
 cell J014 108 outside -J05
 %%-----Universo 109-----
 surf K00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
 surf K01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
 surf K02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
 surf K03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
 surf K04 hexyc 0.0 0.0 8.12355
 surf K05 pz -169.86
 surf K06 pz -57.47
 cell K07 109 outside K06
 cell K08 109 fill 61 -K00 K05 -K06
 cell K09 109 HT9 K00 -K01 K05 -K06
 cell K010 109 Na K01 -K02 K05 -K06
 cell K011 109 HT9 K02 -K03 K05 -K06
 cell K012 109 Na K03 -K04 K05 -K06
 cell K013 109 Na K04 K05 -K06
 cell K014 109 outside -K05
 %%-----Universo 110-----
 surf L00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
 surf L01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
 surf L02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
 surf L03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
 surf L04 hexyc 0.0 0.0 8.12355
 surf L05 pz -205.62
 surf L06 pz -169.86
 cell L07 110 outside L06
 cell L08 110 fill 62 -L00 L05 -L06
 cell L09 110 HT9 L00 -L01 L05 -L06
 cell L010 110 Na L01 -L02 L05 -L06
 cell L011 110 HT9 L02 -L03 L05 -L06

cell L012 110 Na L03 -L04 L05 -L06
cell L013 110 Na L04 L05 -L06

cell L014 110 outside -L05

% %-----Universo 111-----

surf M00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
surf M01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
surf M02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf M03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf M04 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf M05 pz 57.47
surf M06 pz 177.44

cell M07 111 outside M06

cell M08 111 fill 60 -M00 M05 -M06
cell M09 111 HT9 M00 -M01 M05 -M06
cell M010 111 Na M01 -M02 M05 -M06
cell M011 111 HT9 M02 -M03 M05 -M06
cell M012 111 Na M03 -M04 M05 -M06
cell M013 111 Na M04 M05 -M06

cell M014 111 outside -M05

% %-----Universo 112-----

surf N00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
surf N01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
surf N02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf N03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf N04 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf N05 pz 177.44
surf N06 pz 274.58

cell N07 112 outside N06

cell N08 112 fill 60 -N00 N05 -N06
cell N09 112 HT9 N00 -N01 N05 -N06
cell N010 112 Na N01 -N02 N05 -N06
cell N011 112 HT9 N02 -N03 N05 -N06
cell N012 112 Na N03 -N04 N05 -N06
cell N013 112 Na N04 N05 -N06

cell N014 112 outside -N05

% %-----Ensamble de control Secundario -----

% %-----Universo 118 -----

surf U00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
surf U01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
surf U02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf U03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf U04 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf U05 pz -57.47
surf U06 pz 57.47

cell U07 118 outside U06

cell U08 118 fill 600 -U00 U05 -U06
cell U09 118 HT9 U00 -U01 U05 -U06
cell U010 118 Na U01 -U02 U05 -U06
cell U011 118 HT9 U02 -U03 U05 -U06
cell U012 118 Na U03 -U04 U05 -U06
cell U013 118 Na U04 U05 -U06

cell U014 118 outside -U05

% %-----Universo 119-----

surf K100 hexyc 0.0 0.0 6.9087
surf K101 hexyc 0.0 0.0 7.1070
surf K102 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf K103 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf K104 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf K105 pz -169.86
surf K106 pz -57.47

cell K107 119 outside K106

cell K108 119 fill 610 -K100 K105 -K106
cell K109 119 HT9 K100 -K101 K105 -K106
cell K1010 119 Na K101 -K102 K105 -K106
cell K1011 119 HT9 K102 -K103 K105 -K106
cell K1012 119 Na K103 -K104 K105 -K106
cell K1013 119 Na K104 K105 -K106

cell K1014 119 outside -K105

% %-----Universo 220-----

surf L100 hexyc 0.0 0.0 6.9087
surf L101 hexyc 0.0 0.0 7.1070
surf L102 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf L103 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf L104 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf L105 pz -205.62
surf L106 pz -169.86

cell L107 220 outside L106

cell L108 220 fill 620 -L100 L105 -L106
cell L109 220 HT9 L100 -L101 L105 -L106
cell L1010 220 Na L101 -L102 L105 -L106
cell L1011 220 HT9 L102 -L103 L105 -L106
cell L1012 220 Na L103 -L104 L105 -L106
cell L1013 220 Na L104 L105 -L106

cell L1014 220 outside -L105

% %-----Universo 221-----

surf X00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
surf X01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
surf X02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf X03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf X04 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf X05 pz 57.47
surf X06 pz 177.44

cell X07 221 outside X06

cell X08 221 fill 590 -X00 X05 -X06
cell X09 221 HT9 X00 -X01 X05 -X06
cell X010 221 Na X01 -X02 X05 -X06
cell X011 221 HT9 X02 -X03 X05 -X06
cell X012 221 Na X03 -X04 X05 -X06
cell X013 221 Na X04 X05 -X06

cell X014 221 outside -X05

% %-----Universo 222-----

surf Y00 hexyc 0.0 0.0 6.9087
surf Y01 hexyc 0.0 0.0 7.1070
surf Y02 hexyc 0.0 0.0 7.70785
surf Y03 hexyc 0.0 0.0 7.90615
surf Y04 hexyc 0.0 0.0 8.12355

```

surf Y05 pz 177.44
surf Y06 pz 274.58

cell Y07 222 outside Y06

cell Y08 222 fill 600 -Y00 Y05 -Y06
cell Y09 222 HT9 Y00 -Y01 Y05 -Y06
cell Y010 222 Na Y01 -Y02 Y05 -Y06
cell Y011 222 HT9 Y02 -Y03 Y05 -Y06
cell Y012 222 Na Y03 -Y04 Y05 -Y06
cell Y013 222 Na Y04 Y05 -Y06

cell Y014 222 outside -Y05

%%%-----Universo 113-----Driver interno -------

surf O00 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf O01 pz -205.62
surf O02 pz -169.86
surf O03 pz -57.47
surf O04 pz -34.48
surf O05 pz -11.49
surf O06 pz 11.49
surf O07 pz 34.48
surf O08 pz 57.47
surf O09 pz 229.88
surf O010 pz 274.58

cell O011 113 outside O010

cell O012 113 fill 80 -O00 O09 -O010
cell O013 113 Na O00 O09 -O010
cell O014 113 fill 79 -O00 O08 -O09
cell O015 113 Na O00 O08 -O09
cell O016 113 fill 78 -O00 O07 -O08
cell O017 113 Na O00 O07 -O08
cell O018 113 fill 77 -O00 O06 -O07
cell O019 113 Na O00 O06 -O07
cell O020 113 fill 72 -O00 O05 -O06
cell O021 113 Na O00 O05 -O06
cell O022 113 fill 73 -O00 O04 -O05
cell O023 113 Na O00 O04 -O05
cell O024 113 fill 74 -O00 O03 -O04
cell O025 113 Na O00 O03 -O04
cell O026 113 fill 75 -O00 O02 -O03
cell O027 113 Na O00 O02 -O03
cell O028 113 fill 76 -O00 O01 -O02
cell O029 113 Na O00 O01 -O02

cell O030 113 outside -O01

%%%-----Universo 114-----Driver medio -------

surf P00 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf P01 pz -205.62
surf P02 pz -169.86
surf P03 pz -57.47
surf P04 pz -34.48
surf P05 pz -11.49
surf P06 pz 11.49
surf P07 pz 34.48
surf P08 pz 57.47
surf P09 pz 229.88
surf P010 pz 274.58

cell P011 114 outside P010

cell P012 114 fill 89 -P00 P09 -P010
cell P013 114 Na P00 P09 -P010
cell P014 114 fill 88 -P00 P08 -P09

```

cell P015 114 Na P00 P08 -P09
cell P016 114 fill 87 -P00 P07 -P08
cell P017 114 Na P00 P07 -P08
cell P018 114 fill 86 -P00 P06 -P07
cell P019 114 Na P00 P06 -P07
cell P020 114 fill 81 -P00 P05 -P06
cell P021 114 Na P00 P05 -P06
cell P022 114 fill 82 -P00 P04 -P05
cell P023 114 Na P00 P04 -P05
cell P024 114 fill 83 -P00 P03 -P04
cell P025 114 Na P00 P03 -P04
cell P026 114 fill 84 -P00 P02 -P03
cell P027 114 Na P00 P02 -P03
cell P028 114 fill 85 -P00 P01 -P02
cell P029 114 Na P00 P01 -P02

cell P030 114 outside -P01

% %-----Universo 115-----Driver externo -----

surf Q00 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf Q01 pz -205.62
surf Q02 pz -169.86
surf Q03 pz -57.47
surf Q04 pz -34.48
surf Q05 pz -11.49
surf Q06 pz 11.49
surf Q07 pz 34.48
surf Q08 pz 57.47
surf Q09 pz 229.88
surf Q010 pz 274.58

cell Q011 115 outside Q010

cell Q012 115 fill 98 -Q00 Q09 -Q010
cell Q013 115 Na Q00 Q09 -Q010
cell Q014 115 fill 97 -Q00 Q08 -Q09
cell Q015 115 Na Q00 Q08 -Q09
cell Q016 115 fill 96 -Q00 Q07 -Q08
cell Q017 115 Na Q00 Q07 -Q08
cell Q018 115 fill 95 -Q00 Q06 -Q07
cell Q019 115 Na Q00 Q06 -Q07
cell Q020 115 fill 90 -Q00 Q05 -Q06
cell Q021 115 Na Q00 Q05 -Q06
cell Q022 115 fill 91 -Q00 Q04 -Q05
cell Q023 115 Na Q00 Q04 -Q05
cell Q024 115 fill 92 -Q00 Q03 -Q04
cell Q025 115 Na Q00 Q03 -Q04
cell Q026 115 fill 93 -Q00 Q02 -Q03
cell Q027 115 Na Q00 Q02 -Q03
cell Q028 115 fill 94 -Q00 Q01 -Q02
cell Q029 115 Na Q00 Q01 -Q02

cell Q030 115 outside -Q01

% %-----Universo 116-----Ensamble Reflector radial -----

surf R00 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf R01 pz -205.62
surf R02 pz -169.86
surf R03 pz -57.47
surf R04 pz 229.88
surf R05 pz 274.58

cell R06 116 outside R05

cell R07 116 fill 103 -R00 R04 -R05
cell R08 116 Na R00 R04 -R05
cell R09 116 fill 100 -R00 R03 -R04
cell R010 116 Na R00 R03 -R04

cell R011 116 fill 101 -R00 R02 -R03
cell R012 116 Na R00 R02 -R03
cell R013 116 fill 102 -R00 R01 -R02
cell R014 116 Na R00 R01 -R02

cell R015 116 outside -R01

%%-----Universo 117-----Ensamblaje -----

surf S00 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf S01 pz -205.62
surf S02 pz -169.86
surf S03 pz -57.47
surf S04 pz 229.88
surf S05 pz 274.58

cell S06 117 outside S05

cell S07 117 fill 107 -S00 S04 -S05
cell S08 117 Na S00 S04 -S05
cell S09 117 fill 104 -S00 S03 -S04
cell S10 117 Na S00 S03 -S04
cell S11 117 fill 105 -S00 S02 -S03
cell S12 117 Na S00 S02 -S03
cell S13 117 fill 106 -S00 S01 -S02
cell S14 117 Na S00 S01 -S02

cell S15 117 outside -S01

%%-----Universo 130-----Ensamble -Control -----

surf T00 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf T01 pz -205.62
surf T02 pz -169.86
surf T03 pz -57.47
surf T04 pz 57.47
surf T05 pz 177.44
surf T06 pz 274.58

cell T07 130 outside T06

cell T08 130 fill 112 -T00 T05 -T06
cell T09 130 Na T00 T05 -T06
cell T10 130 fill 111 -T00 T04 -T05
cell T11 130 Na T00 T04 -T05
cell T12 130 fill 108 -T00 T03 -T04
cell T13 130 Na T00 T03 -T04
cell T14 130 fill 109 -T00 T02 -T03
cell T15 130 Na T00 T02 -T03
cell T16 130 fill 110 -T00 T01 -T02
cell T17 130 Na T00 T01 -T02

cell T18 130 outside -T01

%%-----Universo 140-----Control Secundario -----

surf Z00 hexyc 0.0 0.0 8.12355
surf Z01 pz -205.62
surf Z02 pz -169.86
surf Z03 pz -57.47
surf Z04 pz 57.47
surf Z05 pz 177.44
surf Z06 pz 274.58

cell Z07 140 outside Z06

cell Z08 140 fill 222 -Z00 Z05 -Z06
cell Z09 140 Na Z00 Z05 -Z06
cell Z10 140 fill 221 -Z00 Z04 -Z05

surf B0002 pz -205.62 % bottom
surf B0003 pz 274.58 % top
cell B0004 0 outside B0003

cell B0005 0 fill 1000 -B0000 B0002 -B0003
cell B0008 0 Na B0000 -B0001 B0002 -B0003
cell B0006 0 outside B0001 B0002 -B0003

cell B0007 0 outside -B0002

%% ---Materiales--- %%

mat Fuel1 sum

92234.03c 1.6447E-06
92235.03c 2.2148E-05
92236.03c 2.7420E-06
92238.03c 1.5602E-02
93237.03c 2.8455E-05
94236.03c 2.6787E-10
94238.03c 1.0478E-04
94239.03c 1.7966E-03
94240.03c 1.2659E-03
94241.03c 2.0302E-04
94243.03c 2.7492E-04
95241.03c 1.0157E-04
95242.03c 8.5597E-06
95243.03c 9.0780E-05
96242.03c 5.2317E-06
96243.03c 6.2354E-07
96244.03c 6.8704E-05
96245.03c 2.0198E-05
96246.03c 1.2227E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 9.9952E-04

mat Fuel2 sum

92234.03c 1.5173E-06
92235.03c 1.9773E-05
92236.03c 3.0518E-06
92238.03c 1.5263E-02
93237.03c 2.7231E-05
94236.03c 3.0567E-10
94238.03c 9.9425E-05
94239.03c 1.7969E-03
94240.03c 1.2398E-03
94241.03c 2.0015E-04
94243.03c 2.6951E-04
95241.03c 9.2311E-05
95242.03c 8.0757E-06
95243.03c 8.8952E-05
96242.03c 6.0295E-06
96243.03c 6.5464E-07
96244.03c 6.9053E-05
96245.03c 1.9681E-05
96246.03c 1.2189E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 1.3906E-03

mat Fuel3 sum

92234.03c 1.4786E-06
92235.03c 1.9063E-05
92236.03c 3.1560E-06
92238.03c 1.5155E-02
93237.03c 2.6699E-05
94236.03c 3.1027E-10
94238.03c 9.7979E-05

94239.03c 1.7950E-03
94240.03c 1.2352E-03
94241.03c 2.0069E-04
94243.03c 2.6801E-04
95241.03c 8.9477E-05
95242.03c 7.9066E-06
95243.03c 8.8520E-05
96242.03c 6.2924E-06
96243.03c 6.7759E-07
96244.03c 6.9488E-05
96245.03c 1.9724E-05
96246.03c 1.2198E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 1.5100E-03

mat Fuel4 sum

92234.03c 1.5459E-06
92235.03c 2.0326E-05
92236.03c 2.9636E-06
92238.03c 1.5342E-02
93237.03c 2.7645E-05
94236.03c 3.0165E-10
94238.03c 1.0044E-04
94239.03c 1.7977E-03
94240.03c 1.2427E-03
94241.03c 1.9942E-04
94243.03c 2.7060E-04
95241.03c 9.4499E-05
95242.03c 8.1989E-06
95243.03c 8.9254E-05
96242.03c 5.8156E-06
96243.03c 6.3601E-07
96244.03c 6.8673E-05
96245.03c 1.9628E-05
96246.03c 1.2182E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 1.3041E-03

mat Fuel5 sum

92234.03c 1.7187E-06
92235.03c 2.4028E-05
92236.03c 2.3408E-06
92238.03c 1.5804E-02
93237.03c 3.0062E-05
94236.03c 2.6100E-10
94238.03c 1.0650E-04
94239.03c 1.7949E-03
94240.03c 1.2665E-03
94241.03c 1.9665E-04
94243.03c 2.7751E-04
95241.03c 1.0862E-04
95242.03c 8.8286E-06
95243.03c 9.1126E-05
96242.03c 4.3648E-06
96243.03c 5.5773E-07
96244.03c 6.6685E-05
96245.03c 1.9641E-05
96246.03c 1.2175E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 7.9560E-04

mat Fuel6 sum

92234.03c 2.0465E-06
92235.03c 2.2682E-05
92236.03c 2.3109E-06
92238.03c 1.4972E-02
93237.03c 4.0907E-05

94236.03c 3.4311E-10
94238.03c 1.2787E-04
94239.03c 2.0192E-03
94240.03c 1.4917E-03
94241.03c 2.3846E-04
94243.03c 3.3130E-04
95241.03c 1.3318E-04
95242.03c 1.0409E-05
95243.03c 1.0795E-04
96242.03c 5.4312E-06
96243.03c 6.7016E-07
96244.03c 7.8031E-05
96245.03c 2.2913E-05
96246.03c 1.4005E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 9.4050E-04

mat Fuel7 sum

92234.03c 1.9126E-06
92235.03c 2.0487E-05
92236.03c 2.6280E-06
92238.03c 1.4695E-02
93237.03c 3.8847E-05
94236.03c 3.9750E-10
94238.03c 1.2257E-04
94239.03c 1.9884E-03
94240.03c 1.4584E-03
94241.03c 2.3537E-04
94243.03c 3.2522E-04
95241.03c 1.2228E-04
95242.03c 9.9923E-06
95243.03c 1.0617E-04
96242.03c 6.4340E-06
96243.03c 6.9834E-07
96244.03c 7.8523E-05
96245.03c 2.2393E-05
96246.03c 1.3948E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 1.3135E-03

mat Fuel8 sum

92234.03c 1.8732E-06
92235.03c 1.9835E-05
92236.03c 2.7334E-06
92238.03c 1.4608E-02
93237.03c 3.8073E-05
94236.03c 4.0506E-10
94238.03c 1.2120E-04
94239.03c 1.9789E-03
94240.03c 1.4514E-03
94241.03c 2.3568E-04
94243.03c 3.2358E-04
95241.03c 1.1897E-04
95242.03c 9.8445E-06
95243.03c 1.0574E-04
96242.03c 6.7599E-06
96243.03c 7.1920E-07
96244.03c 7.8991E-05
96245.03c 2.2414E-05
96246.03c 1.3949E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 1.4238E-03

mat Fuel9 sum

92234.03c 1.9406E-06
92235.03c 2.0978E-05
92236.03c 2.5427E-06

92238.03c 1.4757E-02
93237.03c 3.9439E-05
94236.03c 3.9131E-10
94238.03c 1.2349E-04
94239.03c 1.9948E-03
94240.03c 1.4629E-03
94241.03c 2.3481E-04
94243.03c 3.2638E-04
95241.03c 1.2476E-04
95242.03c 1.0094E-05
95243.03c 1.0646E-04
96242.03c 6.1780E-06
96243.03c 6.8204E-07
96244.03c 7.8125E-05
96245.03c 2.2359E-05
96246.03c 1.3946E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 1.2352E-03

mat Fuel10 sum

92234.03c 2.1162E-06
92235.03c 2.4330E-05
92236.03c 1.9463E-06
92238.03c 1.5136E-02
93237.03c 4.3081E-05
94236.03c 3.3031E-10
94238.03c 1.2912E-04
94239.03c 2.0350E-03
94240.03c 1.4962E-03
94241.03c 2.3280E-04
94243.03c 3.3390E-04
95241.03c 1.4113E-04
95242.03c 1.0571E-05
95243.03c 1.0836E-04
96242.03c 4.4316E-06
96243.03c 6.1805E-07
96244.03c 7.6004E-05
96245.03c 2.2485E-05
96246.03c 1.3968E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 7.4992E-04

mat Fuel11 sum

92234.03c 2.6988E-06
92235.03c 2.3608E-05
92236.03c 1.6709E-06
92238.03c 1.3148E-02
93237.03c 9.2076E-05
94236.03c 4.5834E-10
94238.03c 1.6474E-04
94239.03c 2.4843E-03
94240.03c 1.7818E-03
94241.03c 3.1516E-04
94243.03c 4.1709E-04
95241.03c 2.1009E-04
95242.03c 1.2218E-05
95243.03c 1.2806E-04
96242.03c 5.2929E-06
96243.03c 6.9679E-07
96244.03c 8.1967E-05
96245.03c 2.3635E-05
96246.03c 1.3986E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 7.0138E-04

mat Fuel12 sum

92234.03c 2.6165E-06

92235.03c 2.2094E-05
92236.03c 1.9238E-06
92238.03c 1.3003E-02
93237.03c 8.8023E-05
94236.03c 5.6008E-10
94238.03c 1.6257E-04
94239.03c 2.4268E-03
94240.03c 1.7561E-03
94241.03c 3.1113E-04
94243.03c 4.1260E-04
95241.03c 1.9871E-04
95242.03c 1.2292E-05
95243.03c 1.2703E-04
96242.03c 6.4415E-06
96243.03c 7.1777E-07
96244.03c 8.2744E-05
96245.03c 2.3305E-05
96246.03c 1.3948E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 9.6980E-04

mat Fuel13 sum

92234.03c 2.5937E-06
92235.03c 2.1619E-05
92236.03c 2.0136E-06
92238.03c 1.2957E-02
93237.03c 8.6593E-05
94236.03c 5.7870E-10
94238.03c 1.6222E-04
94239.03c 2.4096E-03
94240.03c 1.7505E-03
94241.03c 3.1085E-04
94243.03c 4.1141E-04
95241.03c 1.9509E-04
95242.03c 1.2303E-05
95243.03c 1.2682E-04
96242.03c 6.8371E-06
96243.03c 7.3352E-07
96244.03c 8.3252E-05
96245.03c 2.3329E-05
96246.03c 1.3948E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 1.0490E-03

mat Fuel14 sum

92234.03c 2.6318E-06
92235.03c 2.2437E-05
92236.03c 1.8557E-06
92238.03c 1.3036E-02
93237.03c 8.9074E-05
94236.03c 5.4614E-10
94238.03c 1.6271E-04
94239.03c 2.4387E-03
94240.03c 1.7595E-03
94241.03c 3.1111E-04
94243.03c 4.1341E-04
95241.03c 2.0133E-04
95242.03c 1.2272E-05
95243.03c 1.2717E-04
96242.03c 6.1466E-06
96243.03c 7.0640E-07
96244.03c 8.2346E-05
96245.03c 2.3275E-05
96246.03c 1.3947E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 9.1486E-04

mat Fuel15 sum

92234.03c 2.7258E-06
92235.03c 2.4556E-05
92236.03c 1.4522E-06
92238.03c 1.3226E-02
93237.03c 9.5114E-05
94236.03c 4.2758E-10
94238.03c 1.6393E-04
94239.03c 2.5140E-03
94240.03c 1.7854E-03
94241.03c 3.1325E-04
94243.03c 4.1866E-04
95241.03c 2.1720E-04
95242.03c 1.2020E-05
95243.03c 1.2818E-04
96242.03c 4.3903E-06
96243.03c 6.7018E-07
96244.03c 8.0531E-05
96245.03c 2.3406E-05
96246.03c 1.3970E-05
8016.03c 4.1265E-02
42000.03c 5.7735E-04

mat SsNa -7.25

11023.03c 1.5591E-02
26000.03c 1.5878E-02
28000.03c 3.2604E-03
24000.03c 3.2355E-03
25055.03c 5.0846E-04
42000.03c 4.3524E-04

mat HT9 -7.76

26000.03c 6.9715E-02
28000.03c 4.2984E-04
24000.03c 1.0366E-02
25055.03c 4.5924E-04
42000.03c 4.9007E-04

mat B4C -2.418

6000.03c 1.9657E-02
5010.03c 1.5018E-02
5011.03c 6.3609E-02

mat B4C1 -2.296

6000.03c 2.0632E-02
5010.03c 5.3642E-02
5011.03c 2.8884E-02

mat Na -0.681

11023.03c 2.2272E-02

mat He sum

2004.03c 1.50455E-11
% ----- Plot y Mesh-----

plot 1 5000 5000
plot 2 5000 5000
plot 3 5000 5000 100
plot 3 5000 5000 30
mesh 1 5000 5000
mesh 2 5000 5000
mesh 3 5000 5000

APÉNDICE B

Archivos de entrada de los núcleos en 2D con el código SERPENT

En este apéndice se proporcionan los listados correspondientes a los archivos de entrada que se utilizaron para modelar los cuatro núcleos diferentes tipos del SFR.

Archivos en 2D

```
% ---Núcleo SFR -----
set title " medio núcleo de óxido "
% --- Librerías
set declib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.dec"
set nfylib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311.nfy"
set acelib "/home/Serpent/xsdata/jeff311/sss_jeff311u.xsdata"
% -----
set ures 1
set bc 1
set seed 1433876770

% --- Generación de grupos constantes
set gcu 0
set sym 12
set nfg 4 4.64159E-02 4.00000E-01 1.05000E+01

% --- Población de neutrones y ciclos:
set pop 200000 500 100
set power 1.00E+09

%%----pins-----%%
pin 99
Na

%% -----Driver interno -----
%%----Combustibles
pin 1
Fuel1 0.3322
HT9 0.3928
Na
```



```
mat SsNa -7.25
11023.03c 1.5591E-02
26000.03c 1.5878E-02
28000.03c 3.2604E-03
24000.03c 3.2355E-03
25055.03c 5.0846E-04
42000.03c 4.3524E-04

mat HT9 -7.76
26000.03c 6.9715E-02
28000.03c 4.2984E-04
24000.03c 1.0366E-02
25055.03c 4.5924E-04
42000.03c 4.9007E-04

mat B4C -2.418
6000.03c 1.9657E-02
5010.03c 1.5018E-02
5011.03c 6.3609E-02

mat B4C1 -2.296
6000.03c 2.0632E-02
5010.03c 5.3642E-02
5011.03c 2.8884E-02

mat Na -0.681
11023.03c 2.2272E-02

mat He sum
2004.03c 1.50455E-11

% ----- Plot-----
plot 1 5000 5000
plot 2 5000 5000
plot 3 5000 5000 100
plot 3 5000 5000 30
mesh 1 5000 5000
mesh 2 5000 5000
mesh 3 5000 5000
```

APÉNDICE C

Archivos de entrada del código AZNHEX

En este apéndice se proporciona el listado correspondiente a los archivos de entrada que se utilizaron para modelar ¼ del núcleo del reactor SFR y el benchmark VVER-440.

Benchmark VVER-440

0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0
 2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1
 3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4
 0,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,0
 0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0
 0,0,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,0,0
 0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0,0
 0,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,0
 0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0
 0,0,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,0,0
 0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0
 0,0,0,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,0,0,0
 0,0,0,0,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,0,0,0
 0,0,0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0,0,0
 0,0,0,0,0,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,2,1,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,3,4,0,0,0
 0,0
 0,0
 1
 2
 3
 4
 5
 6
 7
 8

! Material: 1

1.346557 0.370075
 0.025288 0.064282
 0.004413 0.072784
 0.004413 0.072784
 1.000000 0.000000
 0.000000 0.016976
 0.000000 0.000000

! Material: 2

1.337728 0.367411
 0.024745 0.079145
 0.005491 0.104256
 0.005491 0.104256
 1.000000 0.000000
 0.000000 0.016000
 0.000000 0.000000

! Material: 3

1.332264 0.363171
 0.024385 0.099536
 0.006990 0.147261
 0.006990 0.147261
 1.000000 0.000000
 0.000000 0.014974
 0.000000 0.000000

! Material: 4

1.447520 0.251741
 0.033148 0.033037
 0.000000 0.000000
 0.000000 0.000000
 1.000000 0.000000
 0.000000 0.032215
 0.000000 0.000000

! Material: 5

1.231711 0.240027
 0.032902 0.118846
 0.001345 0.027352
 0.001345 0.027352

Núcleo Metáñico tipo SFR con XS en 3D

2,2,2,

prüfung xyz fin

prueba xyz nm
5,4,5,43,47,12,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,0

Núcleo metálico tipo SFR con XS en 2D

Prueba SFR xyz

Trace: S[K]xyz

16.2471.379.1

0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5

-170.59455,-162.471,-154.34745,-146.2239,-138.10035,-129.9768,-121.85325,-113.7297,

-105.60615,-97.4829,-89.35905,-81.2355,-73.11195,-64.9884,-56.86485,-48.7413,-40.61775,

-32.4942,-24.37065,-16.2471,-8.12355,0.00,8.12355,16.2471,24.37065,32.4942,40.61775

48.7413,56.86485,64.9884,73.11195,81.2355,89.35905,97.4829,105.60615,113.7297,

121.85325, 129.9768, 138.10035, 146.2239, 154.34745, 162.471, 170.59455

-186.84225,-178.7181,-170.59455,-162.471,-154.34745,-146.2239,-138.10035,-129.9768

-105.60615,-97.4829,-89.35905,-81.2355,-73.11195,-64.9884,-56.86485,-48.7413,-40.611

-32.4942,-24.37065,-16.2471,-8.12355,0.00, 8.12355, 16.2471, 24.37065, 32.4942, 40.61

48.7413, 56.86485, 64.9884, 73.11195, 81.2355, 89.35905, 97.4829, 105.60615, 113.7297,

121.85325, 129.9768, 138.10035, 146.2239, 154.34745, 162.471, 170.59455, 178.7181, 186.84225

4,14,2,2,2,2,2,2,8,4,14
8,66,25,76,21,178,98,185,25,212,41,229,59,246,74,255,89,223,49,267,21,489,29

0.00, 35.76, 160.92, 17

0.00000E+00 1.14907E-02 2.22486E-04 1.73012E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.66334E-03 8.12018E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.06083E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 2
 2.57633E+00 1.70028E+00 1.18290E+00 9.38456E-01
 1.61574E-02 6.23045E-03 8.62916E-03 2.02356E-02
 1.00275E-02 4.75975E-03 5.57827E-03 1.60025E-02
 1.00275E-02 4.75975E-03 5.57827E-03 1.60025E-02
 9.11353E-01 8.48380E-02 3.77093E-03 3.82618E-05
 0.00000E+00 1.14760E-02 2.21644E-04 1.69864E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.67040E-03 8.19495E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.07142E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 3
 2.57656E+00 1.70061E+00 1.18334E+00 9.38969E-01
 1.61399E-02 6.22683E-03 8.62082E-03 2.01961E-02
 9.99615E-03 4.74425E-03 5.56041E-03 1.59600E-02
 9.99615E-03 4.74425E-03 5.56041E-03 1.59600E-02
 9.11361E-01 8.48283E-02 3.77251E-03 3.85104E-05
 0.00000E+00 1.14722E-02 2.21603E-04 1.69626E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.67147E-03 8.05897E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.07310E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 4
 2.57503E+00 1.70014E+00 1.17991E+00 9.37738E-01
 1.60796E-02 6.18256E-03 8.59459E-03 1.98640E-02
 1.00350E-02 4.60731E-03 5.29168E-03 1.47350E-02
 1.00350E-02 4.60731E-03 5.29168E-03 1.47350E-02
 9.11606E-01 8.46113E-02 3.74593E-03 3.72415E-05
 0.00000E+00 1.13851E-02 2.16843E-04 1.72502E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.66717E-03 8.27580E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.08538E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 5
 2.57355E+00 1.69876E+00 1.17777E+00 9.36492E-01
 1.61651E-02 6.21601E-03 8.64649E-03 1.99618E-02
 1.01785E-02 4.66199E-03 5.35354E-03 1.48892E-02
 1.01785E-02 4.66199E-03 5.35354E-03 1.48892E-02
 9.11571E-01 8.46435E-02 3.74792E-03 3.78827E-05
 0.00000E+00 1.14131E-02 2.17910E-04 1.70631E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.66300E-03 8.06016E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.07515E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 6
 4.04053E+00 3.24179E+00 2.19902E+00 1.45874E+00
 8.34469E-03 2.84262E-03 2.76915E-03 1.26134E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 8.13611E-03 8.66624E-05 8.43564E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.72882E-03 1.26180E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.53777E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 7
 5.37757E+00 4.34090E+00 2.95724E+00 1.74815E+00
 5.90556E-03 1.90494E-03 1.71796E-03 1.10836E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 5.70728E-03 7.97350E-05 8.54214E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.80093E-03 1.41828E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.50364E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 8
 2.50361E+00 2.05601E+00 1.40562E+00 6.90258E-01
 1.20328E-02 3.64548E-03 3.58006E-03 2.96004E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

0.00000E+00 1.15328E-02 2.01191E-04 2.09107E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 3.37291E-03 4.06506E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 3.02621E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 9
 2.50437E+00 2.05537E+00 1.40556E+00 6.90754E-01
 1.20191E-02 3.65744E-03 3.56425E-03 2.93977E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.15098E-02 2.01488E-04 2.20548E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 3.37887E-03 3.70752E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 3.01017E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 10
 1.86535E+00 1.35598E+00 7.40814E-01 6.27126E-01
 1.80922E-02 6.77728E-03 8.20562E-03 3.80219E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.75699E-02 1.60397E-04 1.59629E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 6.45896E-03 1.42649E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 7.35932E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 11
 2.58511E+00 1.70373E+00 1.16963E+00 9.10610E-01
 1.66920E-02 6.63388E-03 9.36245E-03 2.33403E-02
 1.25038E-02 6.07523E-03 6.95758E-03 1.86359E-02
 1.25038E-02 6.07523E-03 6.95758E-03 1.86359E-02
 9.11472E-01 8.47225E-02 3.76650E-03 3.85987E-05
 0.00000E+00 1.11923E-02 2.17816E-04 1.73606E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.50391E-03 7.51303E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 9.24117E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 12
 2.62166E+00 1.73064E+00 1.18454E+00 9.21918E-01
 1.64754E-02 6.54054E-03 9.22245E-03 2.28761E-02
 1.23132E-02 5.96223E-03 6.83039E-03 1.83424E-02
 1.23132E-02 5.96223E-03 6.83039E-03 1.83424E-02
 9.11519E-01 8.46819E-02 3.76168E-03 3.71054E-05
 0.00000E+00 1.10638E-02 2.14565E-04 1.71532E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.48672E-03 7.50718E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 9.38600E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 13
 2.62365E+00 1.73222E+00 1.18571E+00 9.22476E-01
 1.64503E-02 6.52633E-03 9.20094E-03 2.28152E-02
 1.22692E-02 5.93526E-03 6.80044E-03 1.82861E-02
 1.22692E-02 5.93526E-03 6.80044E-03 1.82861E-02
 9.11473E-01 8.47288E-02 3.75935E-03 3.91629E-05
 0.00000E+00 1.10712E-02 2.14995E-04 1.67949E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.48875E-03 7.41444E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 9.40867E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 14
 2.58539E+00 1.70403E+00 1.17056E+00 9.11435E-01
 1.66334E-02 6.60162E-03 9.31276E-03 2.32173E-02
 1.23505E-02 5.98430E-03 6.85215E-03 1.83674E-02
 1.23505E-02 5.98430E-03 6.85215E-03 1.83674E-02
 9.11532E-01 8.46666E-02 3.76274E-03 3.84237E-05
 0.00000E+00 1.11913E-02 2.17226E-04 1.71299E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.51162E-03 7.40089E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 9.31835E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 15
 2.58461E+00 1.70316E+00 1.16847E+00 9.09954E-01
 1.67370E-02 6.65483E-03 9.39371E-03 2.34478E-02
 1.25864E-02 6.11598E-03 6.99728E-03 1.87123E-02
 1.25864E-02 6.11598E-03 6.99728E-03 1.87123E-02
 9.11534E-01 8.46636E-02 3.76397E-03 3.80253E-05

0.00000E+00 1.12050E-02 2.18201E-04 1.73829E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.49977E-03 7.66429E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 9.19524E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 16
 4.05087E+00 3.24897E+00 2.20925E+00 1.45293E+00
 8.21520E-03 2.71370E-03 2.55461E-03 1.23644E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 7.99844E-03 8.74469E-05 8.53526E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.60388E-03 1.57328E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.32772E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 17
 5.38874E+00 4.35288E+00 2.97242E+00 1.74887E+00
 5.81524E-03 1.81990E-03 1.57560E-03 1.10793E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 5.61522E-03 7.95314E-05 9.00220E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.71434E-03 1.49010E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.36424E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 18
 2.50751E+00 2.06150E+00 1.41378E+00 6.93642E-01
 1.18937E-02 3.49896E-03 3.36684E-03 2.93335E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.13796E-02 2.02729E-04 2.17533E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 3.22476E-03 4.55501E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.82372E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 19
 2.50792E+00 2.06141E+00 1.41322E+00 6.93886E-01
 1.18999E-02 3.49983E-03 3.37095E-03 2.92073E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.13822E-02 2.02063E-04 2.17275E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 3.22908E-03 3.54127E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.83253E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 20
 1.86856E+00 1.35861E+00 7.43840E-01 6.24896E-01
 1.78876E-02 6.54999E-03 7.91341E-03 3.79937E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.73599E-02 1.61562E-04 1.61516E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 6.22789E-03 1.40947E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 7.05568E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 21
 2.17061E+00 1.81072E+00 1.24851E+00 5.02925E-01
 1.38070E-02 4.39304E-03 5.04367E-03 5.89983E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.31828E-02 2.37767E-04 2.55596E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 4.04266E-03 5.46733E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 4.33064E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 22
 2.17105E+00 1.81103E+00 1.24837E+00 5.02935E-01
 1.38029E-02 4.39561E-03 5.04950E-03 5.90109E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

0.00000E+00 1.31766E-02 2.38147E-04 2.53204E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 4.04298E-03 5.65629E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 4.33622E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 23
 2.17082E+00 1.81102E+00 1.24821E+00 5.02931E-01
 1.38023E-02 4.39546E-03 5.04874E-03 5.90236E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.31765E-02 2.38034E-04 2.53168E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 4.04254E-03 5.34499E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 4.33626E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 24
 2.17082E+00 1.81059E+00 1.24844E+00 5.02935E-01
 1.38122E-02 4.39711E-03 5.04935E-03 5.89753E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.31833E-02 2.38083E-04 2.53617E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 4.04548E-03 5.18919E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 4.33423E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 25
 2.17062E+00 1.81082E+00 1.24857E+00 5.02967E-01
 1.38100E-02 4.38976E-03 5.04375E-03 5.89782E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.31827E-02 2.37970E-04 2.46843E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 4.04131E-03 5.07005E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 4.32970E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 26
 1.61024E+00 9.57173E-01 6.77988E-01 5.65051E-01
 3.89695E-02 3.65239E-02 5.19340E-02 1.40292E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 3.39456E-02 1.21586E-04 1.45080E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.92337E-02 2.79511E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.88785E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 27
 1.60978E+00 9.57271E-01 6.78057E-01 5.65144E-01
 3.89471E-02 3.65114E-02 5.19536E-02 1.40443E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 3.39402E-02 1.18887E-04 1.37815E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.92210E-02 1.31754E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.89674E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 28
 1.61039E+00 9.57314E-01 6.78070E-01 5.65512E-01
 3.89412E-02 3.65135E-02 5.19427E-02 1.40263E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 3.39233E-02 1.20155E-04 1.39761E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.92274E-02 2.10596E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.90309E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 29
 1.60954E+00 9.57209E-01 6.78092E-01 5.64554E-01
 3.89585E-02 3.65432E-02 5.19363E-02 1.40600E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

0.00000E+00 3.39465E-02 1.20621E-04 1.48796E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.92455E-02 1.98684E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.89370E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 30
 1.60999E+00 9.57197E-01 6.77836E-01 5.64505E-01
 3.89683E-02 3.65090E-02 5.19213E-02 1.40514E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 3.39511E-02 1.19210E-04 1.35873E-06
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.92203E-02 1.73658E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.87574E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 31
 5.22762E+00 4.13449E+00 2.91132E+00 2.26393E+00
 7.00346E-03 2.52384E-03 2.38987E-03 6.55846E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.89079E-03 4.70238E-05 4.09088E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.47429E-03 5.37520E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.27591E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 32
 5.22533E+00 4.13445E+00 2.90958E+00 2.26548E+00
 7.00375E-03 2.53059E-03 2.41304E-03 6.41940E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.89016E-03 4.73694E-05 3.92805E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.48210E-03 8.29532E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.29431E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 33
 5.22742E+00 4.13422E+00 2.90893E+00 2.26519E+00
 7.00718E-03 2.52941E-03 2.41705E-03 6.84447E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.88885E-03 4.72087E-05 4.15664E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.48417E-03 3.55769E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.29529E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 34
 5.22473E+00 4.13481E+00 2.90838E+00 2.26863E+00
 7.01685E-03 2.53679E-03 2.42645E-03 6.74585E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.91463E-03 4.72003E-05 4.39105E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.47539E-03 7.68042E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.30718E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 35
 5.22555E+00 4.13514E+00 2.90964E+00 2.26724E+00
 7.02248E-03 2.51990E-03 2.40895E-03 6.43486E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.91050E-03 4.75344E-05 4.01421E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.47097E-03 5.94117E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.29639E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 36
 1.85023E+00 1.17595E+00 1.00755E+00 8.42797E-01
 4.63223E-02 6.10833E-02 1.03553E-01 1.31022E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

0.00000E+00 2.83827E-02 6.32166E-05 6.31575E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 6.61861E-03 9.27414E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 8.57509E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 37
 5.23908E+00 4.14067E+00 2.92085E+00 2.24515E+00
 6.92295E-03 2.45115E-03 2.28783E-03 6.95961E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.81340E-03 4.70026E-05 4.14922E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.40016E-03 5.06281E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.16099E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 38
 5.23929E+00 4.14130E+00 2.91967E+00 2.24690E+00
 6.91243E-03 2.44530E-03 2.29580E-03 6.53346E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.81538E-03 4.76984E-05 4.55612E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.40300E-03 5.62060E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.17795E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 39
 5.23812E+00 4.14123E+00 2.91912E+00 2.24798E+00
 6.92626E-03 2.45647E-03 2.29245E-03 6.41945E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.81544E-03 4.72141E-05 3.83327E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.40185E-03 1.86542E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.17793E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 40
 5.23560E+00 4.13986E+00 2.91882E+00 2.24691E+00
 6.93248E-03 2.45048E-03 2.27356E-03 6.20078E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.82901E-03 4.73359E-05 3.91970E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.40389E-03 4.40417E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.17452E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 41
 5.23765E+00 4.14130E+00 2.92010E+00 2.24547E+00
 6.93715E-03 2.45350E-03 2.28169E-03 6.80438E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.81870E-03 4.72439E-05 4.21116E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.39476E-03 5.69085E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.16292E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 42
 1.85482E+00 1.17413E+00 1.00515E+00 8.41443E-01
 4.59339E-02 6.09297E-02 1.03804E-01 1.30429E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 2.80113E-02 6.33301E-05 6.86823E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 6.47464E-03 1.16994E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 7.88041E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 43
 5.24395E+00 4.14379E+00 2.92529E+00 2.23386E+00
 6.88699E-03 2.41644E-03 2.20797E-03 6.49015E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00

0.00000E+00 6.78345E-03 4.68336E-05 4.30304E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.36066E-03 5.82848E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.09824E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 44
 5.24476E+00 4.14515E+00 2.92454E+00 2.23782E+00
 6.89070E-03 2.41155E-03 2.22813E-03 6.37557E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.77991E-03 4.75380E-05 4.39614E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.36497E-03 8.96812E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.12034E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 45
 5.24382E+00 4.14524E+00 2.92332E+00 2.23889E+00
 6.88812E-03 2.41779E-03 2.23596E-03 6.69653E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.77339E-03 4.70155E-05 4.20908E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.36592E-03 4.47542E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.12233E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 46
 5.24212E+00 4.14340E+00 2.92407E+00 2.23673E+00
 6.90331E-03 2.41701E-03 2.22539E-03 6.07889E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 6.78554E-03 4.73576E-05 4.60154E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 2.36733E-03 7.08012E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.11553E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 ! Material: 47
 5.24296E+00 4.14442E+00 2.92540E+00 2.23349E+00
 6.89563E-03 2.40818E-03 2.18813E-03 6.49061E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 7.56148E-02 6.78067E-03 4.72921E-05 4.11612E-07
 0.00000E+00 8.34921E-02 2.35806E-03 4.55279E-09
 0.00000E+00 0.00000E+00 1.36598E-01 2.09234E-03
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.60931E-01
 ! Material: 48
 1.85657E+00 1.17328E+00 1.00371E+00 8.40325E-01
 4.57550E-02 6.08567E-02 1.03875E-01 1.30084E-01
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 2.78431E-02 6.28632E-05 6.35505E-07
 0.00000E+00 0.00000E+00 6.39979E-03 1.59694E-08
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 7.56045E-04
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 250,1.0e-06
 1,7
 0,0,1,1
 0,5,0,01
 0,0,0,0,0,0,0,0,1,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,0
 0,0,0,0,0,0,0,0,0
 4.70375E+09 1.23389E+09 5.11752E+08 1.67682E+07
 4.13701E-03
 5.89186E-01
 1.0
 1.0

42 23

42,23
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1,-1, 2,-1, 3,-1, 4,-1, 5,-1, 6,-1, 7,-1, 8,-1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0

, 0, 0, 0, 82,-1, 83,-1, 84,-1, 85,-1, 86,-1, 87,-1, 88,-1, 89,-1, 90,-1, 91,-1, 92,-1, 93,-1, 94,-1, 95,-1, 96,-1, 97,-1, 98,-1, 99,-1, 0, 0, 0

0, 0, -1, 100, -1, 101, -1, 102, -1, 103, -1, 104, -1, 105, -1, 106, -1, 107, -1, 108, -1, 109, -1, 110, -1, 111, -1, 112, -1, 113, -1, 114, -1, 115, -1, 116, -1, 117, -1, 118, 0, 0
 0, 119, -1, 120, -1, 121, -1, 122, -1, 123, -1, 124, -1, 125, -1, 126, -1, 127, -1, 128, -1, 129, -1, 130, -1, 131, -1, 132, -1, 133, -1, 134, -1, 135, -1, 136, -1, 137, -1, 138, -1, 0

-0.119,-1.120,-1.121,-1.122,-1.123,-1.124,-1.125,-1.126,-1.127,-1.128,-1.129,-1.130,-1.131,-1.132,-1.133,-1.134,-1.135,-1.136,-1.137,-1.138,-1.0

-1,159,-1,140,-1,141,-1,142,-1,145,-1,144,-1,143,-1,146,-1,145,-1,152,-1,155,-1,124,-1,153,-1,150,-1,157,-1,158,-1,159

-1,180,-1,181,-1,182,-1,183,-1,184,-1,185,-1,186,-1,187,-1,188,-1,189,-1,190,-1,191,-1,192,-1,193,-1,194,-1,195,-1,196,-1,197,-1,198,-1,199,-1,200

0,201,-1,202,-1,203,-1,204,-1,205,-1,206,-1,207,-1,208,-1,209,-1,210,-1,211,-1,212,-1,213,-1,214,-1,215,-1,216,-1,217,-1,218,-1,219,-1,220,-1,0
-1,221,-1,222,-1,223,-1,224,-1,225,-1,226,-1,227,-1,228,-1,229,-1,230,-1,231,-1,232,-1,233,-1,234,-1,235,-1,236,-1,237,-1,238,-1,239,-1,240,-1,241

$$-1,221,-1,222,-1,223,-1,224,-1,225,-1,226,1,227,-1,228,-1,229,-1,230,1,231,-1,232,-1,233,-1,234,-1,235,-1,236,-1,237,-1,238,-1,239,-1,240,-1,241$$

$$0, -0.242, -1.243, -1.244, -1.245, -1.246, -1.247, -1.248, -1.249, -1.250, -1.251, -1.252, -1.253, -1.254, -1.255, -1.256, -1.257, -1.258, -1.259, -1.260, -1.261, -1.262, -1.263, -1.264, -1.265, -1.266, -1.267, -1.268, -1.269, -1.270, -1.271, -1.272, -1.273, -1.274, -1.275, -1.276, -1.277, -1.278, -1.279, -1.280, 0, 0$$

prueba xyz fin

48,4,7,43,47,12,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,0