

**PROYECTO INTEGRADOR
CARRERA DE INGENIERÍA NUCLEAR**

**EVALUACIÓN DE ESTADOS CRÍTICOS Y ANÁLISIS
DE EXPERIMENTOS DE LA PUESTA EN MARCHA
DEL REACTOR RA-6**

Santiago Bazzana
Autor

Ing. Herman Blaumann
Director

Ing. Ignacio Márquez
Co-Director

Junio 2009
Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

A mi familia

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis de un experimento de criticidad realizado durante la puesta en marcha del reactor RA-6 con el nuevo núcleo de siliciuro de uranio. El análisis realizado permite utilizar estos resultados como “benchmark” para la validación de secciones eficaces y códigos de cálculo en sistemas similares. Para esto, se evaluó la influencia de las distintas incertezas inherentes al reactor y la realización del experimento en el factor de multiplicación efectivo, se analizó el efecto de las simplificaciones introducidas en la generación del modelo, y se compararon resultados de cálculo y experimentales utilizando como herramienta de cálculo el código Monte Carlo MCNP.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Palabras clave: *BENCHMARK, CÁLCULO DE INCERTEZAS, CRITICIDAD, MCNP, RA-6.*

CRITICAL STATES EVALUATION AND ANALISYS OF EXPERIMENTS IN THE RA-6 REACTOR STARTUP

Abstract

In this work we present the analysis and evaluation of a critical experiment performed at the RA-6 reactor during the commissioning of the new uranium silicide core. This analysis allows the use of these results as a benchmark for the validation of cross sections and calculation codes in similar systems. To do this we evaluated the influence of the uncertainties intrinsic to the reactor and the experimental method, the effect of the simplifications introduced to the model, and we compared experimental and computed results using as computational tool the Monte Carlo Code MCNP.

The results were satisfactory.

Keywords: BENCHMARK, UNCERTAINTIES CALCULATION, CRITICALITY, MCNP, RA-6.

Índice de contenidos

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo, metodología y alcance	2
1.3. Descripción del código de cálculo	4
1.4. Estructura del trabajo	5
Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR Y DEL EXPERIMENTO	7
2.1. Descripción del reactor	7
2.1.1. “Pileta”	8
2.1.2. Elementos combustibles (EC)	9
2.1.2.1. Elemento Combustible Normal (ECN)	10
2.1.2.2. Elemento Combustible de Control (ECC).....	13
2.1.3. Barras de control.....	18
2.1.4. Grilla.....	21
2.1.5. Filtro de BNCT.....	21
2.1.6. Estructura soporte	21
2.1.7. Cámaras de fisión	22
2.1.8. Fuente de neutrones	22
2.2. Descripción de materiales	22
2.2.1. Meat	22
2.2.2.	22
2.2.3. Aluminio 6061	23
2.2.4. Plata-Indio-Cadmio	23
2.2.5. Acero inoxidable AISI 304L	24
2.2.6. Agua	24
2.2.7. Cadmio	25
2.2.8. Alúmina	25
2.3. Configuración experimental	25
2.4. Temperatura	26
2.5. Resultados experimentales.....	26
Capítulo 3. Análisis	27
3.1. Evaluación de datos experimentales	27
3.1.1. Placas combustibles	27
3.1.2. Composición del material absorbente de las placas de control	28

3.1.3.	Otras fuentes de incertezas	28
3.1.4.	Composición de materiales.....	29
3.2.	Análisis de incertezas.....	30
3.2.1.	Masa de uranio en <i>meat</i>	31
3.2.2.	Longitud de la región activa de las placas combustibles.....	31
3.2.3.	Espesor de las placas combustibles	31
3.2.4.	Composición del material absorbente de las barras de control	31
3.2.4.1.	Cantidad de indio en Ag-In-Cd	32
3.2.4.2.	Cantidad de cadmio en Ag-In-Cd.....	32
3.2.5.	Posición de las barras de control	32
3.2.6.	Longitud de los alambres de cadmio	32
3.2.7.	Radio de los alambres de cadmio	32
3.2.8.	Composición del aluminio 6061	32
3.2.9.	Composición del acero inoxidable AISI 304L	33
3.2.10.	Impurezas en Cadmio	33
3.2.11.	Cantidad de boro en aluminio 6061	33
3.2.12.	Cantidad de boro en <i>meat</i>	33
3.2.13.	Temperatura del refrigerante	33
3.2.14.	Posición de las cámaras de fisión	34
3.3.	Combinación de incertezas	34
Capítulo 4.	MODELO DEL REACTOR.....	35
4.1.	Simplificaciones utilizadas y consideraciones sobre el modelo	35
4.2.	Modelo.....	36
4.2.1.	Pileta.....	36
4.2.2.	Elemento combustible normal	36
4.2.3.	Elemento combustible de control y barra de control.....	38
4.2.4.	Grilla.....	42
4.2.5.	Filtro de BNCT	42
4.3.	Materiales.....	43
4.4.	Temperatura	45
4.5.	Resultado experimental con incertezas calculadas	45
Capítulo 5.	RESULTADOS	46
Capítulo 6.	CONCLUSIÓN	48
Referencias	50
Anexo 1.	Código base de MCNP-5.....	52
Agradecimientos	59

Índice de figuras

Figura 1.1. Potencial historia de un neutrón en MCNP.....	5
Figura 2.1. Vista 3D seccionada del bloque, piletas e internos del Reactor RA-6.	8
Figura 2.2. Travesaño de los elementos combustibles	10
Figura 2.3. Boquilla de los elementos combustibles	10
Figura 2.4. Elemento combustible normal.	12
Figura 2.5. Arreglo de las placas combustibles en el ECN.	13
Figura 2.6. Elemento combustible de control.....	15
Figura 2.7. Arreglo de placas combustibles y guías en los ECC.....	16
Figura 2.8. Placa guía interna.	17
Figura 2.9. Placa guía externa	17
Figura 2.10. Corte de placas las guías.	18
Figura 2.11. Corte de placa de material absorbente de barra de control	19
Figura 2.12. Placa absorbente de barra de control.....	20
Figura 2.13. Ensamble de ECC con barra de control.	20
Figura 2.14. Configuración de núcleo utilizada en el núcleo.	25
Figura 4.1. Corte en plano XZ del ECN, en el plano medio de una placa combustible interna.	36
Figura 4.2. Corte en plano XZ del ECN, en el plano medio de una placa combustible externa.	36
Figura 4.3. Modelo de ECN.	37
Figura 4.4. Sección de ECN.	37
Figura 4.5. Detalle de sección de ECN.....	38
Figura 4.6. Elemento Combustible de Control con barra de control insertada.	39
Figura 4.7. Barra de control.....	39
Figura 4.8. Corte de ECC con barra de control extraída.	40
Figura 4.9. Detalle de corte de ECC con barra de control extraída.....	40
Figura 4.10. Corte de ECC con barra de control insertada.....	41
Figura 4.11. Detalle de corte de ECC con barra de control insertada.	41
Figura 4.12. Corte de la grilla.....	42
Figura 4.13. Filtro de BNCT.	43
Figura 5.1. K_{eff} calculado y del benchmark con sus respectivas incertezas	47

Índice de tablas

Tabla 2.1. Datos nominales característicos de los ECN.....	11
Tabla 2.2. Promedio y desviación estándar de espesor de placa y longitud activa de las placas combustibles utilizadas.....	11
Tabla 2.3. Datos nominales característicos de los ECC.....	14
Tabla 2.4. Datos nominales característicos de los ECC.....	19
Tabla 2.5. Promedio y desviación estándar de las masas de uranio y U-235 contenidos en las placas combustibles.....	22
Tabla 2.6. Composición de Aluminio 6061.....	23
Tabla 2.7. Análisis químico de muestras de aleación de Ag-In-Cd.....	24
Tabla 2.8. Composición del acero inoxidable AISI 304L.....	24
Tabla 2.9. Configuración de las barras de control durante experimento.....	26
Tabla 3.1. Parámetros analizados, incertezas e influencia en la incerteza del benchmark..	34
Tabla 4.1. Composición y densidad de los materiales.....	43

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1.Motivación

El RA-6 es un reactor nuclear experimental multipropósito de tipo pileta abierta. Inaugurado en 1982, fue el primer reactor construido enteramente por INVAP. Está ubicado en las afueras de la ciudad de San Carlos de Bariloche, Río Negro, en las instalaciones del Centro Atómico Bariloche (CAB), perteneciente a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

EL RA-6 fue diseñado para operar con uranio de bajo enriquecimiento, pero el contexto internacional de la época impidió obtener el uranio enriquecido al 20% para construir su núcleo, debiéndose utilizar elementos combustibles enriquecidos al 90%, previamente utilizados en el reactor RA-3.

De acuerdo al “Programa Internacional de Reducción de Enriquecimiento para Reactores de Investigación” (1), del que la República Argentina es parte desde 1978, y de las recomendaciones de la “Conferencia de Asociados Internacionales en la Iniciativa de la Amenaza Global” (Viena, 2004), la Argentina, como participante y suscriptor de esas recomendaciones, decidió reconvertir el RA-6 a bajo enriquecimiento.

En el contexto de esta modificación se decidió además aumentar la potencia del reactor -con el objetivo de llegar a 3 MW térmicos-, utilizando siliciuro de uranio (U_3Si_2) como material combustible, que permite obtener mayor densidad de uranio en el núcleo. El único reactor que se encontraba en operación con este tipo de combustible en el mundo, es el OPAL (Australia), también construido por INVAP.

En orden de gestionar adecuadamente los riesgos de un accidente de criticidad nuclear, es importante establecer las condiciones para las que un accidente resulta posible, para cualquier actividad en la que se manipulan materiales físi les. Sólo cuando esta información es conocida, es posible establecer la probabilidad de alcanzar esa condición. Resulta importante entonces conocer la precisión de los cálculos utilizados en los análisis de seguridad. Esta precisión sólo puede obtenerse a partir de la comparación de estos resultados con datos experimentales. Este proceso de validación generalmente es requerido por los organismos de seguridad para el otorgamiento de la licencia de operación.

La puesta en marcha del RA-6, etapa final de su proyecto de conversión y modernización, permitió contar con resultados experimentales obtenidos con combustibles frescos, susceptibles de ser modelados. Esto permite evaluar la performance de los datos y modelos utilizados en la representación de un núcleo compuesto por elementos combustibles en base a U_3Si_2 , con alambres de cadmio como venenos quemables, para los cuales no existían datos experimentales accesibles. El análisis de estos datos puede utilizarse para validar modelos de análisis de nuevas configuraciones críticas similares, necesario para la obtención de la licencia de operación.

Además, este tipo de análisis se utiliza para la validación de códigos de cálculo neutrónico y secciones eficaces nucleares.

1.2. Objetivo, metodología y alcance

El objetivo de este trabajo es obtener un modelo validado con incertezas cuantificadas para el nuevo núcleo del reactor RA-6. Ello supone:

- Establecer las incertezas asociadas a los datos (incertezas experimentales) y modelos de cálculo para configuraciones críticas.
- Establecer la congruencia entre resultados experimentales y calculados considerando las correspondientes incertezas.

También se pretende analizar la utilidad de este trabajo como un *benchmark*, un modelo que permita comparar resultados experimentales con los obtenidos por distintos métodos de cálculo y secciones eficaces. En un *benchmark* sobre criticidad, como sería el caso estudiado, suelen diferenciarse 2 tipos de factores de multiplicación efectivos (relación entre la cantidad de neutrones producidos por fisiones y la cantidad de absorbidos y/o perdidos): k_{eff} del *benchmark*, que es el k_{eff} del experimento corregido por alguna simplificación que se haya realizado en la modelización del sistema; y el k_{eff} calculado, que es el valor obtenido con una combinación específica de código de cálculo y biblioteca de secciones eficaces. Las condiciones que se piden a un modelo para ser utilizados como *benchmark* son:

- Que la información disponible sobre el experimento sea lo suficientemente extensiva como para poder reproducir el modelo.
- Que la información disponible sobre el experimento sea lo suficientemente precisa para que la incerteza del *benchmark* (incerteza asociada al k_{eff} del *benchmark*) resulte de un valor lógico. Un criterio puede ser 1% de

incerteza sobre el k_{eff} del *benchmark*, con la incerteza calculada a partir de la desviación estándar de los incertezas experimentales.

- Que el método de cálculo permita obtener un resultado coherente. Por ejemplo, k_{eff} del modelo con una desviación respecto del k_{eff} del *benchmark* menor al 1% y menor a 3 veces la incerteza del mismo.

Las incertezas experimentales se obtienen mediante mediciones directas y a partir del análisis de la información disponible:

- Informe final de seguridad
- Informes técnicos
- Planos
- Especificaciones técnicas
- Análisis químicos de muestras
- Detalles de fabricación de placas combustibles

Para la modelización del reactor se utiliza el código MCNP, cuyo principio de funcionamiento se explica en la siguiente sección.

Se analiza la incidencia de las incertezas en la criticidad del primer núcleo crítico del proceso de puesta en marcha, perturbando el parámetro correspondiente en el modelo del reactor y calculando el factor de multiplicación efectivo. Combinando las incidencias individuales de las incertezas, es posible obtener una incerteza total del sistema, que permita analizar la congruencia (o no) de los resultados experimentales y calculados.

El análisis de incertezas se realizó sobre los siguientes parámetros:

- Masa de uranio, espesor y longitud activa de las placas combustibles.
- Posición de las barras de control.
- Composición del material absorbente de neutrones de las barras de control.
- Impurezas en aluminio 6061, material físil y agua.
- Temperatura del agua.
- Longitud, radio y deformación de venenos quemables.

- Composición del aluminio 6061 y del acero inoxidable AISI 304L.
- Influencia de las cámaras de fisión.

Existen distintas metodologías para evaluar información experimental y utilizarla como *benchmark* para la validación de herramientas de cálculo y datos nucleares. En particular, en este trabajo se siguen los estándares utilizados por el ICSBEP para analizar este tipo de experimentos. El ICSBEP (*International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project*) es un proyecto internacional que tiene los siguientes propósitos (2):

- Identificar y evaluar un conjunto completo de datos de referencias relacionados con sistemas críticos.
- Verificar profundamente los datos, revisando exhaustivamente la documentación, hojas de datos si es posible, y hablando con los experimentadores o personas cercanas a la facilidad crítica.
- Compilar la información en un formato estándar.
- Realizar cálculos del experimento con códigos neutrónicos.
- Documentar todos los experimentos en una única fuente: International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments.

1.3. Descripción del código de cálculo

MCNP (Monte Carlo N-Particle) (3) es un código de transporte de neutrones, fotones y electrones, continuo en energía y dependiente del tiempo, con la capacidad de analizar geometrías tridimensionales complicadas. Puede utilizarse en diferentes modos de transporte: sólo neutrones (utilizado en este proyecto), fotones o electrones, combinaciones neutrón/fotón, neutrón/electrón, fotón/electrón o neutrón/fotón/electrón. El régimen de energía de los neutrones es de 10^{-11} MeV hasta 20 MeV.

El usuario crea un archivo de entradas que el programa lee secuencialmente, que contiene:

- Especificación de la geometría.
- Descripción de materiales y selección de las librerías de secciones eficaces.
- Localización y características de las fuentes de neutrones, fotones y electrones, dependiendo del modo de transporte elegido.

- Tipo de información del archivo de salida.
- Técnicas de reducción de varianza para aumentar la eficiencia.

MCNP utiliza el principio del método Monte Carlo: genera aleatoriamente historias de partículas o fotones (neutrones en el caso particular de este trabajo) desde una fuente, las sigue a lo largo de su vida hasta su muerte (por absorción, escape, etc.) y recuerda algunos aspectos (los que el usuario quiera) del comportamiento promedio. Las distribuciones probabilísticas son muestreadas aleatoriamente usando datos de transporte, con el fin de determinar los resultados en cada etapa de su vida.

El comportamiento promedio de partículas del sistema físico es entonces inferido (debido al teorema del límite central) del comportamiento promedio de las partículas simuladas.

La figura 1.1 muestra la potencial historia generada por un neutrón que puede generar fotones (modos de transporte neutrón/fotón o neutrón/fotón/electrón).

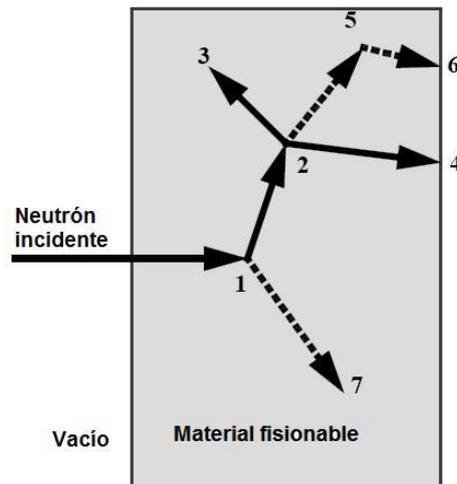


Figura 1.1. Potencial historia de un neutrón en MCNP. 1: Scattering del neutrón y producción de fotón; 2: Fisión, producción de fotón; 3: Captura neutrónica; 4: Fuga de neutrón; 5: Scattering de fotón; 6 Fuga de fotón; 7: Captura de fotón.

1.4. Estructura del trabajo

El trabajo está organizado de acuerdo al formato establecido por el ICSBEP (4), que se explica a continuación:

En el capítulo 2 se describe detalladamente el reactor, y se presentan todos los datos experimentales relevantes para realizar un modelo completo del reactor a los fines de calcular su criticidad. Datos experimentales relevantes son todos aquellos valores de parámetros que son necesarios para describir completamente todos los sistemas

involucrados en la neutrnica del reactor. Los datos son obtenidos directamente de su fuente, y se presentan con la misma precisi3n y en las mismas unidades de medidas. Si durante el proceso de obtenci3n de informaci3n se encuentran datos inconsistentes, ambos son notificados, con sus respectivas fuentes.

En el capitulo 3 se analiza la informaci3n del capitulo 2. Si hay informaci3n inconsistente, se explican las razones por las cuales se utiliz3 un valor y no otros. Las incertezas se unifican a una desviaci3n estandar (1σ) y, de haber incertezas no reportadas, las mismas se estiman en este capitulo. Se presenta tambi3n la influencia de dichas incertezas en el factor de multiplicaci3n del sistema. El capitulo termina con una estimaci3n de la incerteza total.

En el capitulo 4 se describe el modelo dise1ado, que se utiliz3 como dato de entrada para el c3digo de c1culo. Se presentan tanto la geometr1a del reactor, como los materiales utilizados. Toda la informaci3n de este capitulo est1 presente en alguno de los 2 anteriores, de modo que el trabajo queda auto-contenido. En la descripci3n del modelo se incluyen las simplificaciones realizadas y su influencia en la criticidad del sistema. La composici3n de los materiales se presenta en densidades num3ricas de cada elemento. El capitulo termina con la presentaci3n del k_{eff} del *benchmark*. El mismo consiste en el k_{eff} del experimento, corregido por las simplificaciones que se realizaron en el an1lisis, con la incerteza calculada.

En el capitulo 5 se presenta el k_{eff} calculado utilizando un c3digo de transporte neutr3nico y secciones eficaces est1ndares, y una comparaci3n entre este valor y el valor del k_{eff} del *benchmark*.

En el capitulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DEL REACTOR Y DEL EXPERIMENTO

Los datos de esta sección, salvo que se indique lo contrario, han sido obtenidos de (5), y los valores y medidas son nominales.

A lo largo de todo el capítulo, los ejes de coordenadas son los mismos. Las dimensiones se presentan utilizando coordenadas cartesianas, primero el “eje x”, luego el “eje y”, y por último el “eje z”. Las alturas se referirán en este último eje.

Las medidas de todas las figuras de esta sección están en milímetros (mm).

2.1.Descripción del reactor

El Reactor Nuclear Argentino RA-6 es un reactor de tipo pileta abierta, destinado fundamentalmente a las actividades de enseñanza, entrenamiento e investigación. Se halla ubicado en el Centro Atómico de la ciudad de San Carlos de Bariloche, provincia de Río Negro.

El núcleo del reactor está formado por un arreglo de elementos combustibles tipo placa que descansan sobre una grilla dentro de un tanque de acero inoxidable lleno de agua desmineralizada, que se utiliza como refrigerante, moderador y reflector en la dirección axial. Los elementos combustibles son de 2 tipos: Elemento Combustible Normal (ECN) y Elemento Combustible de Control (ECC).

La potencia de diseño del reactor es de 3 MW térmicos. Esta potencia es transmitida al circuito primario que hace circular el agua refrigerante por el núcleo en dirección descendente. A través de un intercambiador de calor, el circuito primario transmite esta potencia al circuito secundario, el cual, finalmente, disipa la potencia a la atmósfera a través de 3 torres de enfriamiento. El experimento de puesta a crítico analizado se realizó con el reactor sin potencia.

Para el control de reactividad, el reactor cuenta con 5 barras de control; cada una está formada por 2 placas absorbentes y un mecanismo soporte. Estas barras son movidas verticalmente dentro de los ECC por los mecanismos de barras que se encuentran montados en el puente de mecanismos ubicado encima de la boca de la pileta del reactor. Por lo tanto, los cinco pares de placas de control se insertan en el

núcleo desde arriba. Cuatro de las barras de control se denominan barras de seguridad; son las que participan de la regulación gruesa de reactividad, y caen por gravedad dentro del núcleo cuando el sistema de protección del reactor genera una señal de SCRAM. La quinta barra de control se denomina barra de regulación y participa de la regulación de pequeñas variaciones de reactividad pero no participa del SCRAM.

En la figura 2.1 se muestra una vista 3D del bloque, pileta e internos del RA-6.

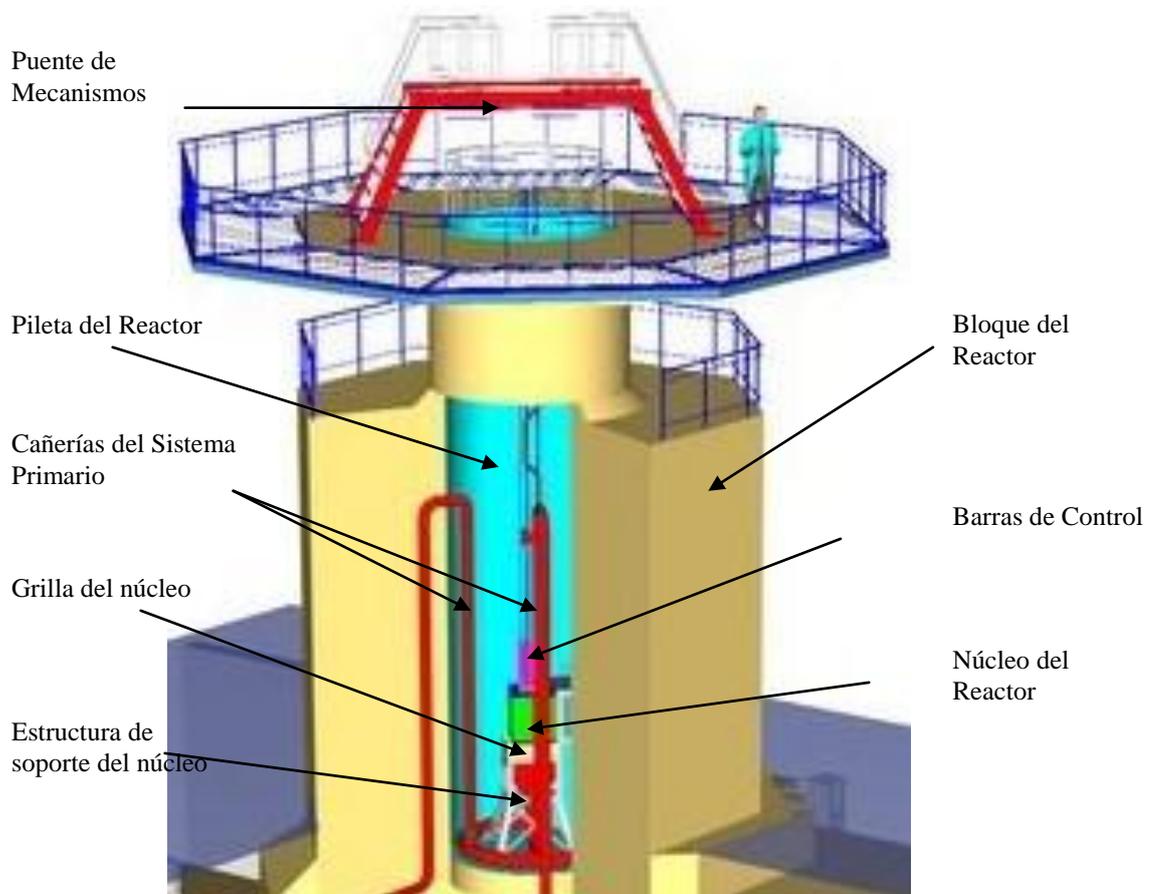


Figura 2.1. Vista 3D seccionada del bloque, pileta e internos del Reactor RA-6.

2.1.1. “Pileta”

El núcleo se halla inmerso en un tanque de acero inoxidable de 2.40 metros de diámetro interno, 10.40 metros de altura y 8 mm de espesor. Descansa a 6.6 metros de profundidad sobre una grilla de 8x10 posiciones, que a su vez se halla apoyada sobre una estructura soporte. La empresa constructora del reactor (INVAP) presenta un valor distinto para la altura del tanque (6): 9.5 metros.

Rodeando a la pileta, se dispone el bloque de reactor, que consiste principalmente en una estructura octogonal de 3.3 metros de apotema de hormigón pesado. Mayores detalles sobre la misma pueden encontrarse en el capítulo 4 de (5).

2.1.2. Elementos combustibles (EC)

Los EC del reactor son de tipo placa, de sección rectangular (7.6 cm x 8 cm). Las placas combustibles están compuestas por una aleación de Al-U₃Si₂ (portadora del material fisible, llamado *meat*), recubiertas por una vaina de aluminio 6061. El enriquecimiento del uranio es de 19.70%, con una densidad de uranio en el *meat* de 4.8 g/cm³.

Existen 2 tipos de placas: las placas internas, de dimensiones 7.05 cm x 0.15 cm x 67.1 cm; y las placas externas, de 7.05 cm x 0.15 cm x 73.5 cm. En el caso del *meat*, las dimensiones son 0.051 cm x 6 cm x 61.9 cm. En las placas combustibles, el *meat* se halla centrado dentro de la vaina.

La forma geométrica se mantiene por medio de 2 paredes laterales ranuradas. Las placas combustibles están retenidas a éstas por el proceso de repujado.

Para el control de la reactividad inicial, los EC contienen alambres cilíndricos de cadmio de 50 cm de longitud y 0.05 cm de diámetro. Éstos están ubicados dentro de ranuras mecanizadas en las paredes laterales; dichas ranuras están situadas en el fondo de las ranuras que posicionan las placas combustibles. La fijación de los alambres se realiza por deformación de los mismos, debido a la interferencia dimensional con la ranura correspondiente, asegurando la inamovilidad del veneno.

Para su manipulación, los elementos combustibles cuentan con un travesaño cilíndrico de 1.3 cm de diámetro, que cuenta con 2 caras planas antideslizantes (figura 2.2), y que se une a las paredes laterales en su parte superior por medio de 2 tornillos. En el extremo inferior, cuentan con una boquilla que ajusta perfectamente en los agujeros de la grilla y que permite la libre circulación del refrigerante (figura 2.3).

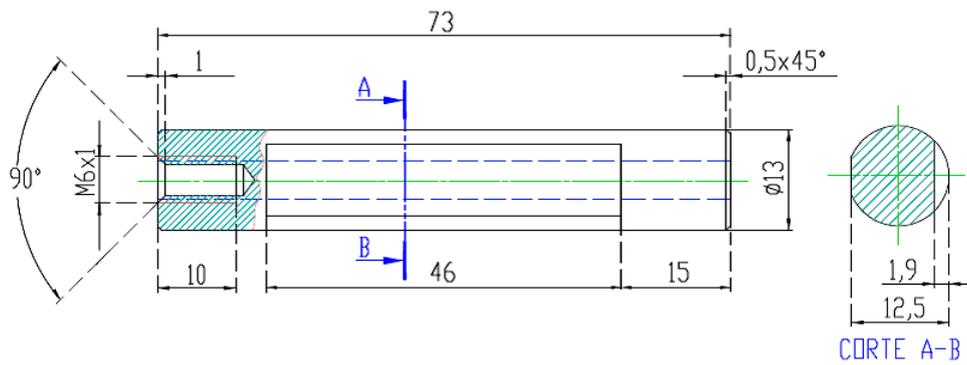


Figura 2.2. Travesaño de los elementos combustibles (7).

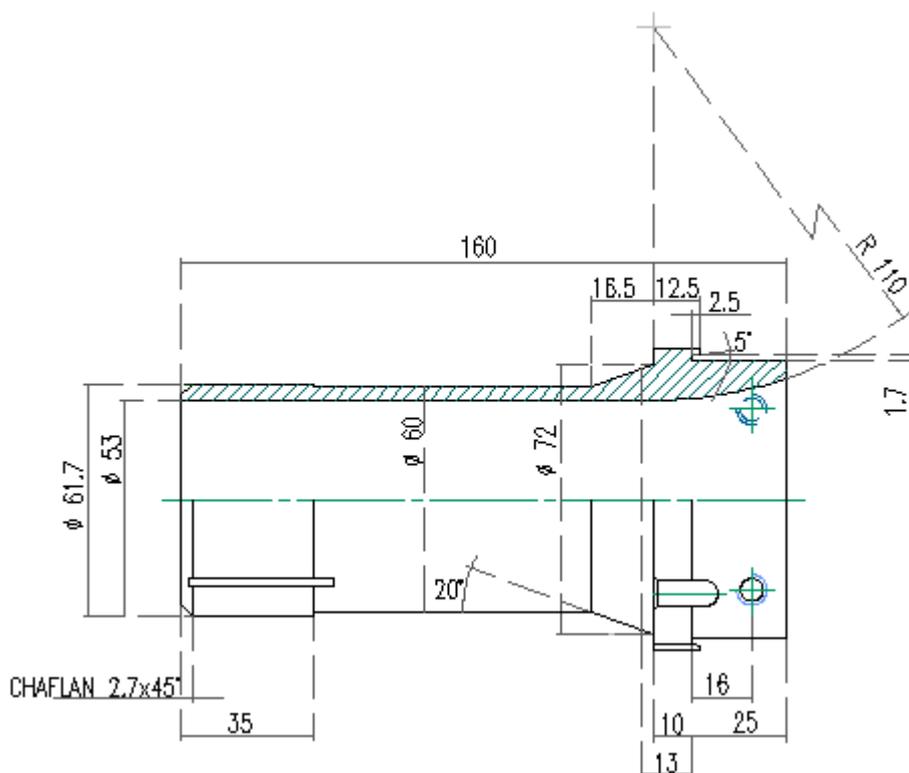


Figura 2.3. Boquilla de los elementos combustibles (8).

Se utilizan 2 tipos de EC:

2.1.2.1. Elemento Combustible Normal (ECN)

Está formado por 19 placas combustibles: 17 internas y 2 externas. Las placas externas se ubican en los extremos del arreglo de las mismas. La separación entre

placas es de 0.27 cm, y las dimensiones de las paredes laterales son 0.5 cm x 8 cm x 67.1 cm.

Este tipo de EC cuenta con 20 alambres de cadmio repartidos, placa combustible de por medio, a ambos lados de las mismas.

En la tabla 2.1 se presentan los datos nominales característicos de este tipo de EC. De (9) y (10) se obtienen la longitud real de la zona activa y los espesores de las vainas de todas las placas de cada uno de los EC utilizados respectivamente. Los valores promedio obtenidos se listan en la tabla 2.2.

La figura 2.4 muestra el elemento combustible completo, mientras que en la figura 2.5 se presenta el arreglo de las placas (11).

Tabla 2.1. Datos nominales característicos de los ECN.

Longitud total [cm]	91.5	
Placas combustibles		
	Placas internas	Placas externas
Cantidad	17	2
Dimensiones [cm]	7.05 x 0.15 x 73.5	7.05 x 0.15 x 67.1
Material de vaina	Al 6061	
Meat		
Material	Al – U ₃ Si ₂	
Dimensiones [cm]	0.051 x 6 x 61.9	
Alambres de cadmio		
Material	Cadmio	
Cantidad	20	
Dimensiones [cm] (12)	longitud: 50±2	diámetro: 0.0500±0.0025
Paredes laterales		
Material	Al 6061	
Dimensiones [cm]	0.5 x 8 x 78	
Boquilla y travesaño		
Material	Al 6061	

Tabla 2.2. Promedio y desviación estándar de espesor de placa y longitud activa de las placas combustibles utilizadas.

	Valor promedio [mm]	Desviación estándar [mm]
Espesor de placa	1.487	0.007
Longitud de región activa	623.1	4.4

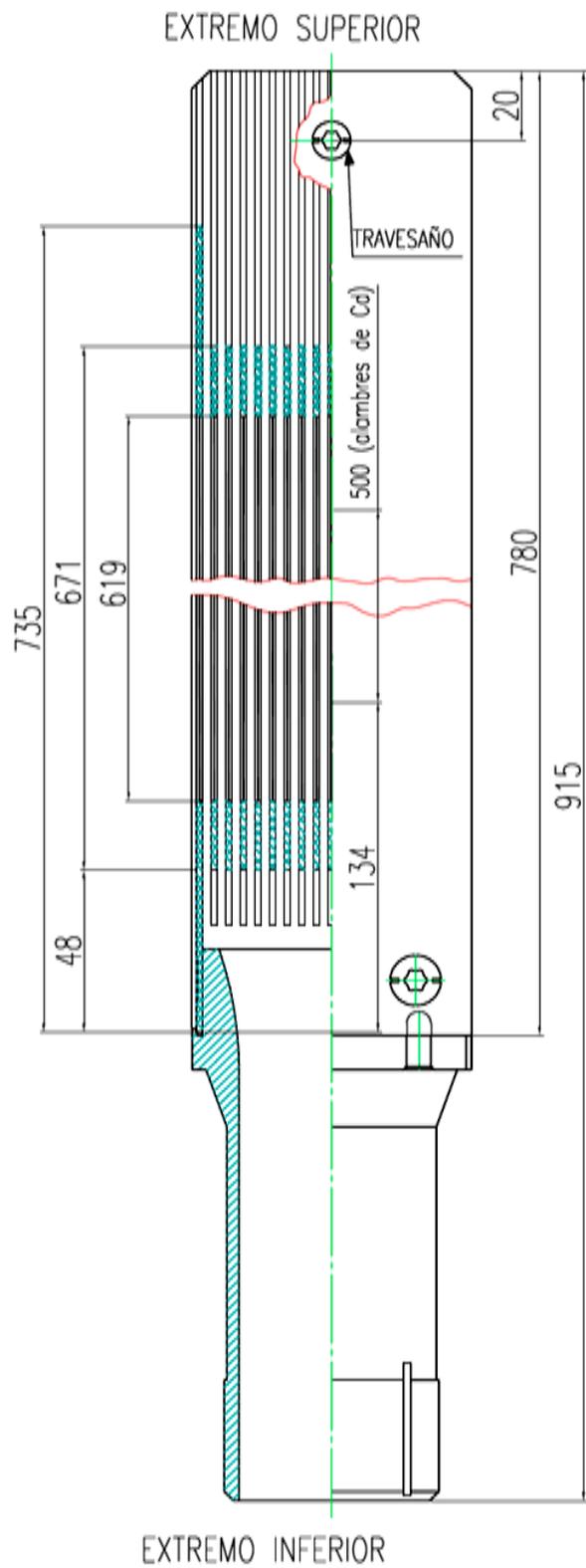


Figura 2.4. Elemento combustible normal.

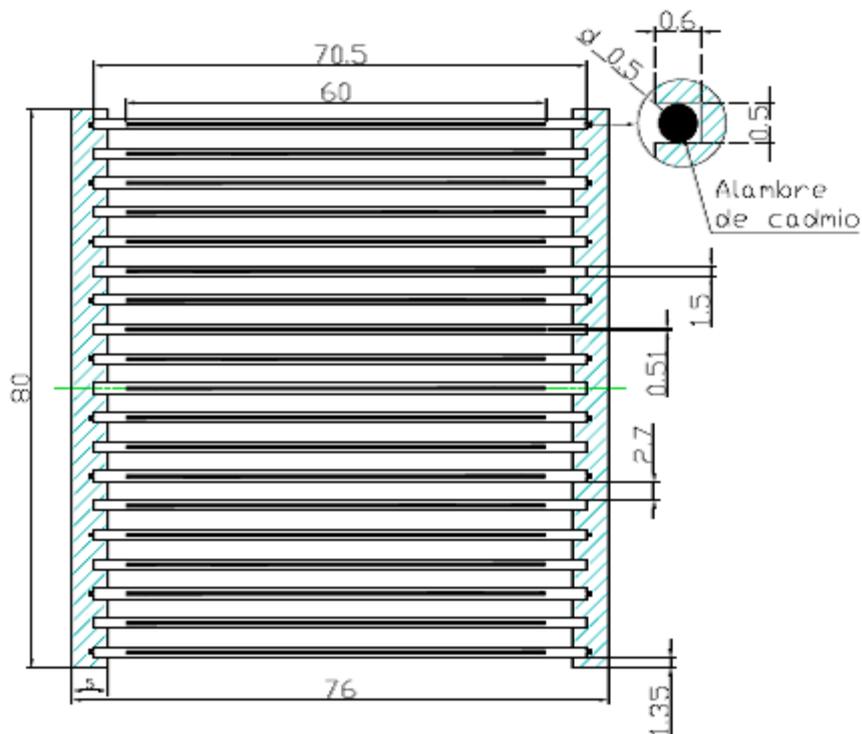


Figura 2.5. Arreglo de las placas combustibles en el ECN.

2.1.2.2. Elemento Combustible de Control (ECC)

Está formado por 14 placas combustibles internas y 4 placas guías de barra de control: 2 internas y 2 externas; las mismas son de aluminio 6061, y cumplen la función de evitar que las barras de control, que se insertan en estos combustibles, choquen con las placas combustibles. En la figura 2.6 se presenta el ECC completo (13).

La separación entre placas combustibles, y entre placa combustible y placa guía interna, es de 0.26 cm, mientras que entre placas guías interna y externa, 0.53 cm. Las paredes laterales son más largas que en los ECN (147.6 cm), ya que en la parte superior cuenta con una placa guía para las barras de control.

Para fijar la posición mínima de la barra de control, cuenta con 2 prismas rectangulares de aluminio 6061 unidas a la placa guía superior. Las dimensiones de los mismos son 5 cm x 0.9 cm x 1.2 cm.

Estos EC cuentan con 16 alambres de cadmio, ubicados como se indica en la figura 2.7 (14). Ésta muestra un perfil del arreglo de elementos combustibles - placas guías.

En la tabla 2.3 se presentan los datos característicos de estos EC. De (9) y (10) se obtienen la longitud real de la zona activa y los espesores de las vainas de todas las

placas de cada uno de los EC utilizados respectivamente. Los valores promedio de dichos parámetros son iguales a los de los EC, que se observan en la tabla 2.2.

Las placas guías se muestran en la figura 2.8, 2.9 y 2.10 (referencias (15) y (16))

Tabla 2.3. Datos nominales característicos de los ECC.

Longitud total [cm]	161.1
Placas combustibles	
Placas internas	
Cantidad	14
Dimensiones [cm]	7.05 x 0.15 x 73.5
Material de vaina	Al 6061
Meat	
Material	Al – U ₃ Si ₂
Dimensiones [cm]	6 x 0.051 x 61.9
Alambres de cadmio	
Material	Cadmio
Cantidad	16
Dimensiones [cm] (12)	longitud: 50±2 diámetro: 0.0500±0.0025
Paredes laterales	
Material	Al 6061
Dimensiones [cm]	0.5 x 8 x 147.6
Boquilla, travesaño y placas guías	
Material	Al 6061
Tope de barra de control	
Cantidad	2
Material	Al 6061
Dimensiones [cm]	5 x 0.9 x 1.2

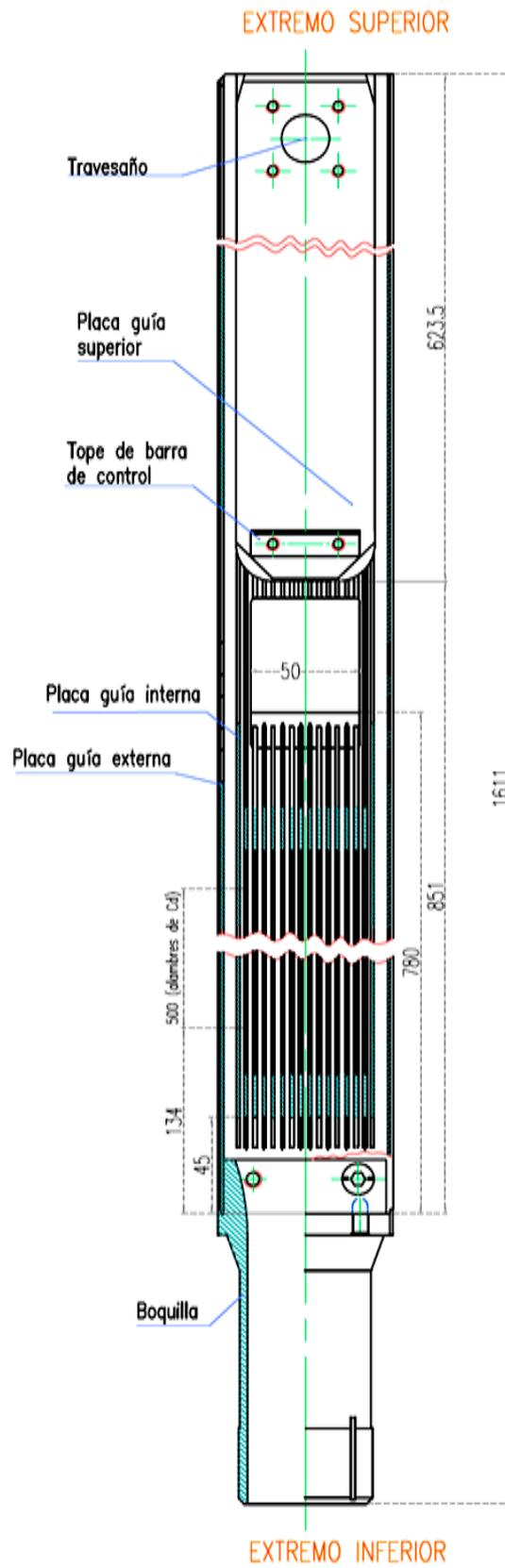


Figura 2.6. Elemento combustible de control.

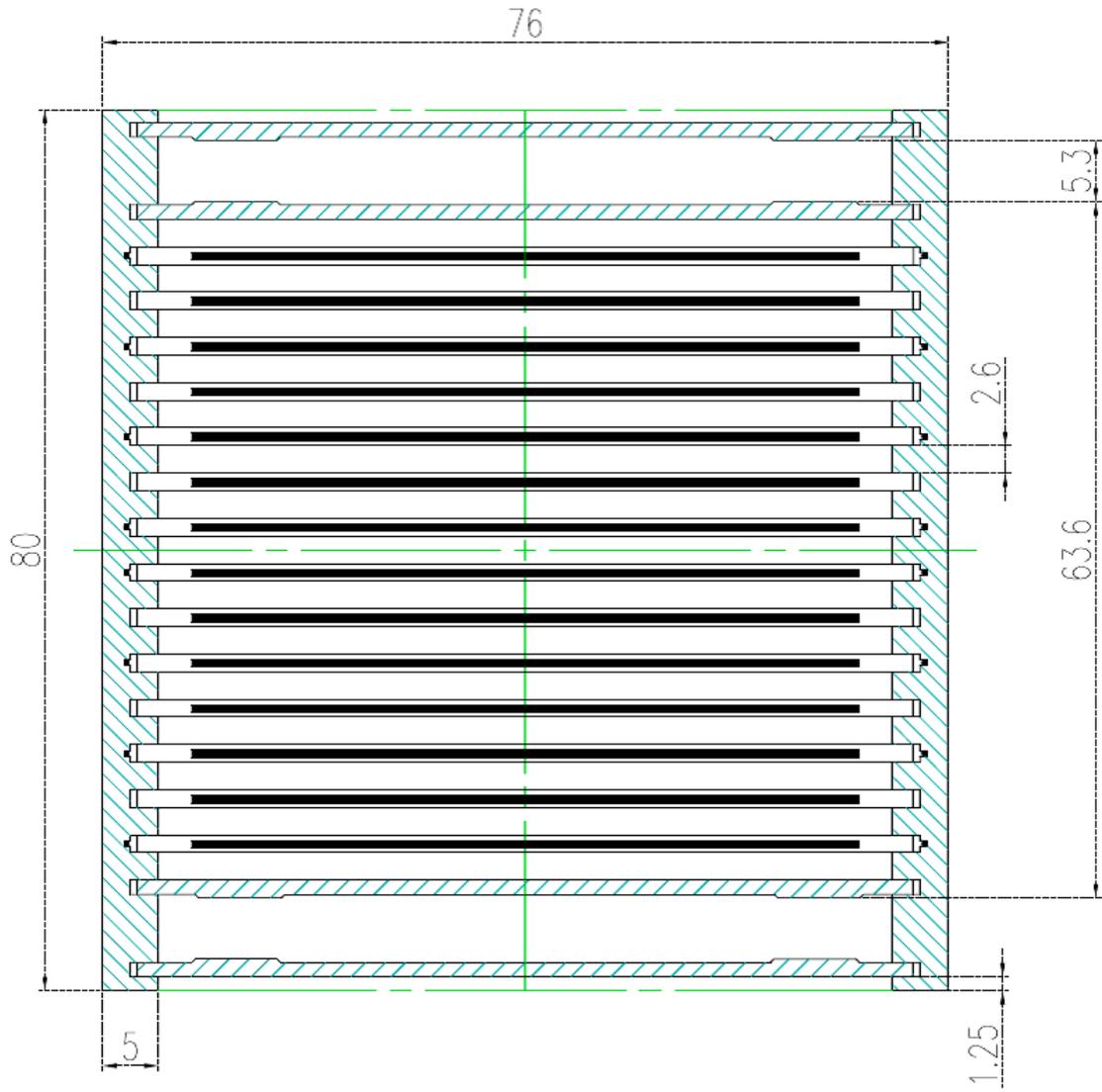


Figura 2.7. Arreglo de placas combustibles y guías en los ECC.

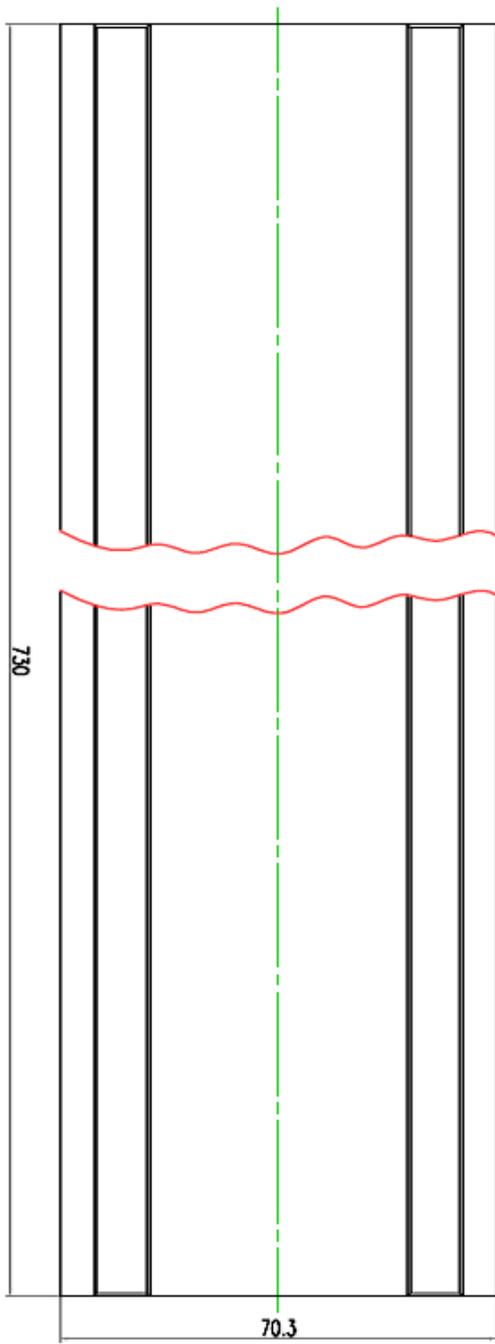


Figura 2.8. Placa guía interna.

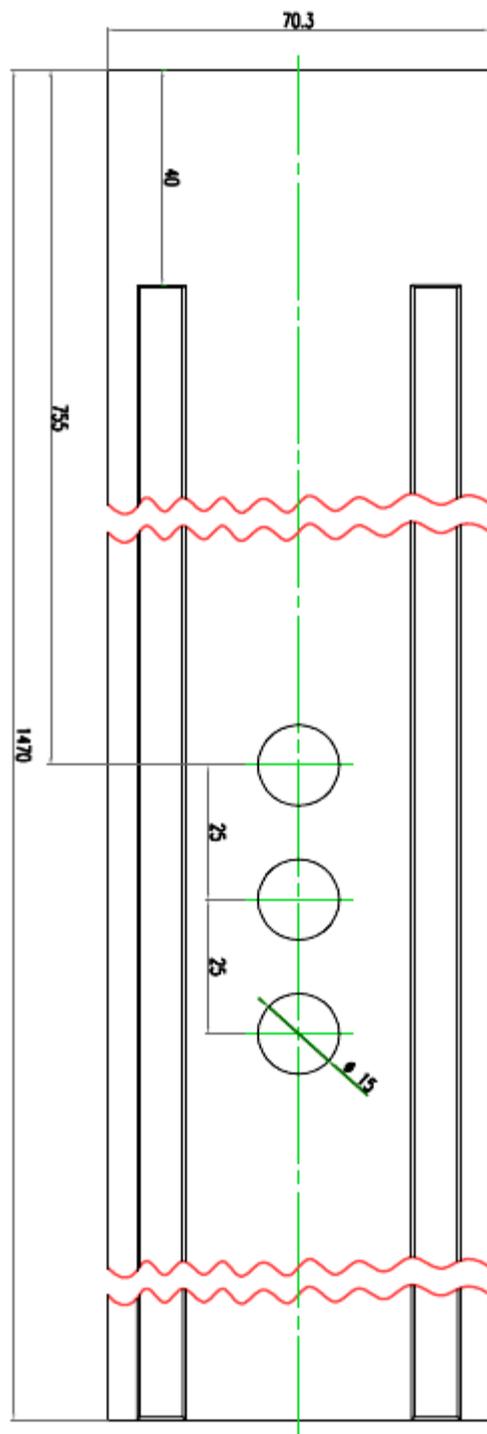


Figura 2.9. Placa guía externa

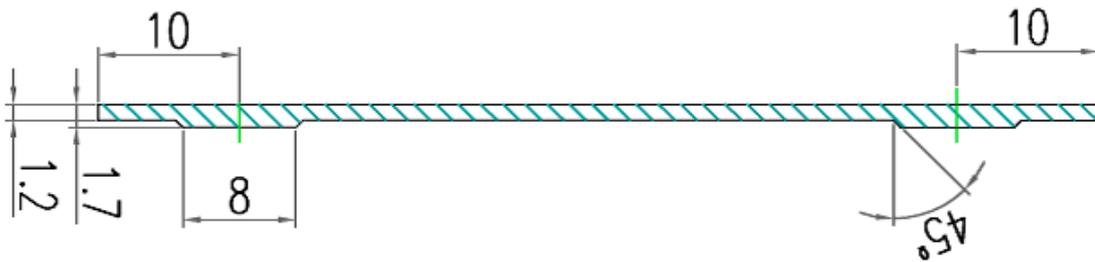


Figura 2.10. Corte de placas las guías.

2.1.3. Barras de control

Están formadas por un par de placas absorbentes de neutrones y un soporte superior.

El material que es el principal absorbente de neutrones de la placa de control es una aleación de plata, indio y cadmio. La plata y el indio tienen una alta sección eficaz de absorción de neutrones epitérmicos, mientras que el cadmio tiene una alta sección eficaz de absorción de neutrones térmicos. Esta placa está cubierta por una vaina de 0.7 mm de espesor, con un tapón inferior y una placa tope superior que están hechas de acero inoxidable AISI 304L. La figura 2.11 muestra el corte de la placa de material absorbente (17), mientras que en la figura 2.12 se observa la placa absorbente completa (18).

La placa se sujeta en la placa tope superior a un soporte, que a su vez se encuentra unido a una barra de sección circular de acero inoxidable. Esta barra es sostenida magnéticamente por el mecanismo de barras de control a fin de poder mover en dirección vertical las placas de control dentro del núcleo.

Las barras de control tienen un recorrido máximo de 66 cm, como se muestra en la figura 2.13 (19). A pesar de ello, están calibradas de modo tal que en la posición de 0% de extracción, la barra de control se encuentre elevada aproximadamente 2.2 cm de su posición mínima; y, la posición de 100% de extracción corresponde a una elevación de 65.2 cm; con esta configuración, la barra de control en su posición de mínima extracción queda centrada con la región activa.

En la tabla 2.4 se presentan los datos característicos de estas barras.

Tabla 2.4. Datos nominales característicos de los ECC.

Placa absorbente	
Material	Ag-In-Cd
Dimensiones [cm]	6.18 x 0.22 x 63.4
Vaina y tapón	
Material	AISI 304L
Dimensiones totales [cm]	6.4 x 0.43 x 86.7
Placa tope y soporte superior	
Material	AISI 304L

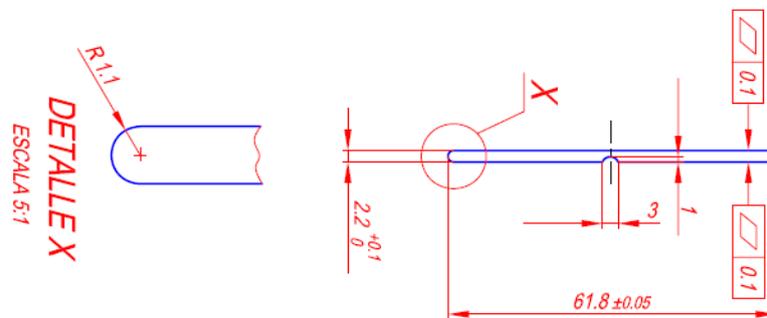


Figura 2.11. Corte de placa de material absorbente de barra de control. Figura extraída directamente del plano.

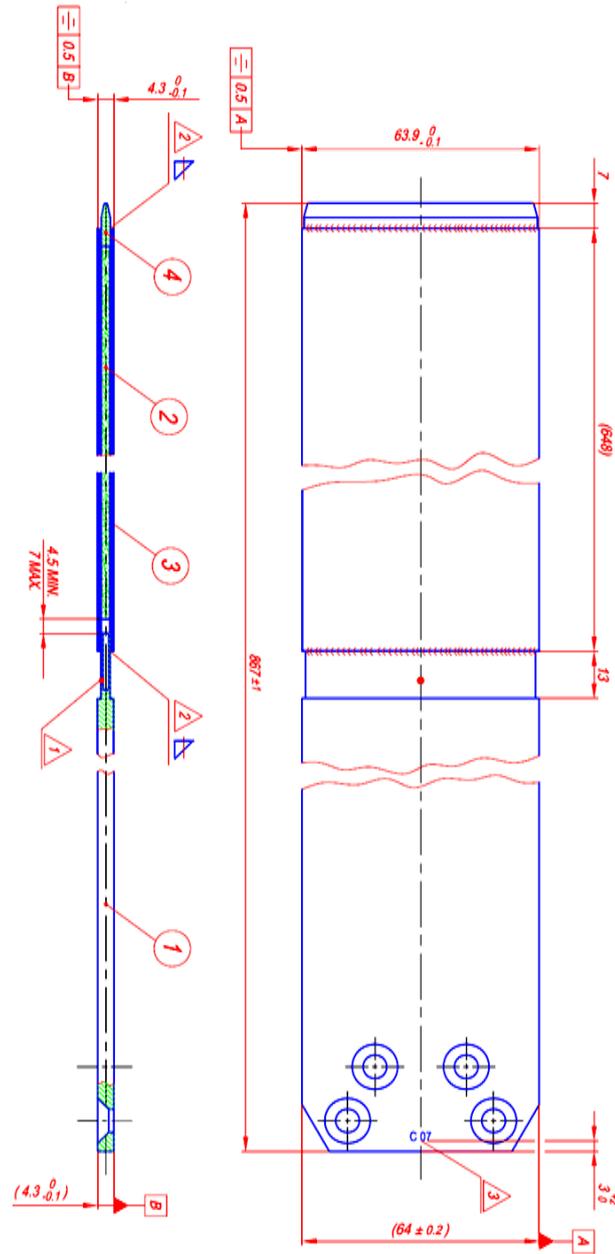


Figura 2.12. Placa absorbente de barra de control. Figura extraída directamente del plano.

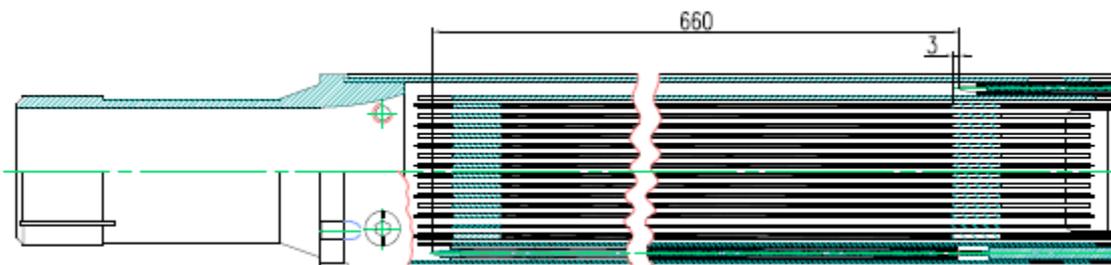


Figura 2.13. Ensamble de ECC con barra de control.

2.1.4. Grilla

Es el elemento soporte de los EECC. Consiste en un bloque de aluminio 6061 de 20 cm de altura, con orificios cilíndricos de sección circular para permitir el paso del refrigerante de las placas combustibles internas (orificios primarios) y de las placas laterales (orificios secundarios).

Los orificios primarios se presentan en un arreglo de 8 x 10, con una separación entre centros (pitch) de 7.7 cm y 8.1 cm en las respectivas direcciones. El diámetro de los mismos es de 6.169 cm.

Los orificios secundarios se encuentran centrados entre 4 orificios primarios, a excepción de los correspondientes a las 4 esquinas, y tienen un diámetro de 2.2 cm.

Las posiciones en la grilla se referencian por una letra y un número; se utilizan números del 1 al 8, y letras entre A y J (alfabéticamente ordenadas).

Otros detalles de la grilla pueden encontrarse en (20).

2.1.5. Filtro de BNCT

Una de las tareas de investigación que se llevan a cabo en el reactor es el análisis del tratamiento de cáncer por el método de BNCT (Boron Neutron Capture Therapy). Para ello es necesario irradiar al paciente con neutrones de una energía particular. Con ese fin, el reactor cuenta con un filtro delante de uno de los conductos de irradiación. Éste está compuesto por ladrillos de aluminio, placas de cadmio y ladrillos de alúmina, insertados dentro de un contenedor de aluminio de dimensiones 77.1 cm x 82.35 cm x 80.3 cm, apoyado sobre la fila A de la grilla. Los 82.35 cm se llenaron del siguiente modo: 17 cm de ladrillos de aluminio, una placa de 0.15 cm de cadmio, otros 10 cm de aluminio, una nueva placa de cadmio, de 0.15 cm, y el resto de ladrillos de alúmina¹. Mayores detalles pueden obtenerse de (21).

2.1.6. Estructura soporte

Es la estructura sobre la que se apoya la grilla. Consiste en un soporte de acero inoxidable AISI 304L con forma de L, unida a un embudo que termina en la cañería del primario. Mayores detalles pueden encontrarse en (22).

¹ Comunicación personal con Juan Longhino.

2.1.7. Cámaras de fisión

Marca INVAP modelo CF-PT9. Son de U-235 enriquecido. Cuando el nivel de contaje se encuentra por lo menos por debajo de una década de su capacidad máxima, una señal apropiada pide el izamiento del sensor respectivo. Este es subido entonces hasta otro nivel, donde su sensibilidad disminuye aproximadamente 300 veces. Mayores detalles pueden encontrarse en (23).

2.1.8. Fuente de neutrones

Para la puesta a crítico, se utilizó una fuente de neutrones de Am-Be de 3 Ci de actividad, que al momento de la medición se retiró.

2.2. Descripción de materiales

2.2.1. Meat

La mezcla combustible (o “*meat*”) se utiliza como material portador del elemento físil. Consiste en una aleación de siliciuro de uranio (U_3Si_2) en una matriz de aluminio. El uranio se encuentra enriquecido al 19.7%. La densidad de uranio en el material es de 4.8 g/cm^3 , la de U_3Si_2 es 5.179 g/cm^3 , y la de aluminio, 1.364 g/cm^3 .

La máxima concentración de boro admisible es de 25 ppm en el siliciuro de uranio (24), y de 30 ppm en el aluminio (25).

De (26) se obtienen la masa de uranio total y la de ^{235}U presente en cada placa de cada elemento combustible utilizado durante el experimento. Los valores promedio y sus desviaciones estándar se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Promedio y desviación estándar de las masas de uranio y U-235 contenidos en las placas combustibles.

	Valor promedio [g]	Desviación estándar [g]
Masa de uranio	90.364	0.147
Masa de U-235	17.872	0.021

2.2.2. Aluminio 6061

Se utiliza para la mayor parte de los elementos estructurales del reactor: vainas de placas combustibles, paredes laterales, boquillas y travesaño de los EC, grilla, mesa soporte, tope del tenedor en los ECC, son algunos de sus ellos.

Según (27), la composición del material es la indicada en la tabla 2.6, y la densidad, 2.7 g/cm^3 .

Tabla 2.6. Composición de Aluminio 6061.

ELEMENTO	PORCENTAJE EN MASA
Aluminio	Resto
Cobre	0,15-0,40
Cromo	0,04-0,35
Magnesio	0,80-1,20
Silicio	0,40-0,80
Cinc	$\leq 0,25$
Hierro	$\leq 0,7$
Manganeso	$\leq 0,15$
Titanio	$\leq 0,15$

La máxima concentración de boro equivalente tolerable es 10 ppm (28).

2.2.3. Plata-Indio-Cadmio

Es el material absorbente utilizado en las barras de control. Está compuesto por 80% de plata, 15% de indio y 5% de cadmio (porcentajes en peso) (28). La densidad de la aleación es de 10.17 g/cm^3 .

Un análisis químico de 16 muestras de este material resultó como se indica en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Análisis químico de muestras de aleación de Ag-In-Cd. Los porcentajes son en peso.

	Cd [%]	In [%]
Muestra 1	5.1 ± 0.3	15.1 ± 0.8
Muestra 2	5.1 ± 0.3	14.9 ± 0.8
Muestra 3	5.1 ± 0.3	14.9 ± 0.8
Muestra 4	5.0 ± 0.3	14.9 ± 0.8
Muestra 5	5.2 ± 0.3	15.5 ± 0.8
Muestra 6	5.1 ± 0.3	15.3 ± 0.8
Muestra 7	5.2 ± 0.3	15.0 ± 0.8
Muestra 8	5.1 ± 0.3	14.9 ± 0.8
Muestra 9	5.4 ± 0.3	16.0 ± 0.8
Muestra 10	5.1 ± 0.3	14.6 ± 0.8
Muestra 11	5.2 ± 0.3	15.2 ± 0.8
Muestra 12	5.2 ± 0.3	14.6 ± 0.8
Muestra 13	5.5 ± 0.3	14.5 ± 0.8
Muestra 14	5.5 ± 0.3	14.7 ± 0.8
Muestra 15	5.4 ± 0.3	14.4 ± 0.8
Muestra 16	5.4 ± 0.3	14.6 ± 0.8

2.2.4. Acero inoxidable AISI 304L

Se utiliza en las barras de control, como vaina del material absorbente.

La densidad es 7.99 g/cm³. La composición del mismo es observa en la tabla 2.8 (28).

Tabla 2.8. Composición del acero inoxidable AISI 304L.

Elemento	Porcentaje en masa
Carbono	0,03
Manganeso	2
Silicio	1
Cromo	18 - 20
Níquel	8 – 12
Hierro	resto

2.2.5. Agua

La temperatura del refrigerante fue de 24°C. Las impurezas tolerables, obtenidas a partir de (29), son:

- Contenido de Fe: ≤ 0,01 ppm.
- Contenido de Cu: ≤ 0,01 ppm.

- Contenido de Cl: $\leq 0,2$ ppm.

2.2.6. Cadmio

Se utiliza como veneno quemable en los EC.

Tiene una densidad de 8.65 g/cm^3 , pureza mayor a 99.9% y las impurezas tolerables son (30):

- Boro: ≤ 10 ppm.
- Cobalto: ≤ 10 ppm.
- Plata: ≤ 100 ppm.

2.2.7. Alúmina

Se utiliza en el filtro de BNCT. De pureza nuclear, tiene una densidad de $3,52 \text{ g/cm}^3$, obtenida experimentalmente.

2.3. Configuración experimental

El experimento se llevó a cabo con la configuración número 7 de (31), que se muestra en la figura 2.14.

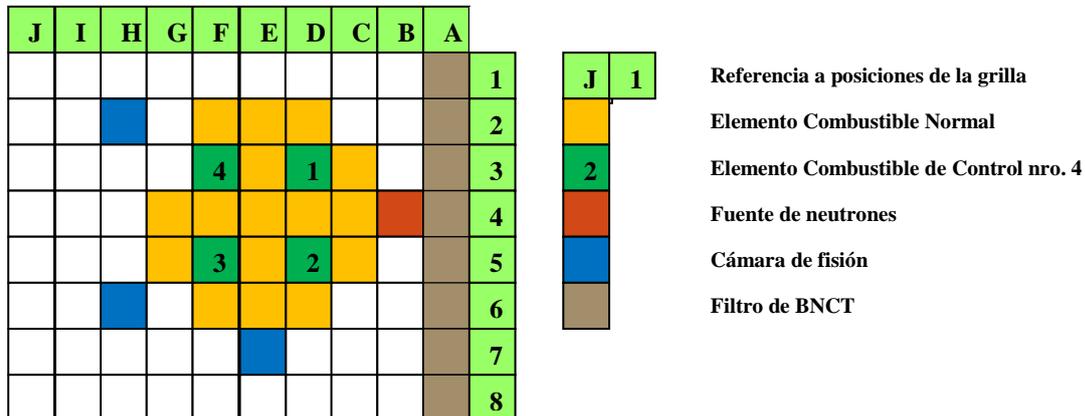


Figura 2.14. Configuración de núcleo utilizada en el núcleo. La disposición se haya rotada 90 grados.

La barra de regulación no se encontraba presente. Las barras de control se encontraban como se indica en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Configuración de las barras de control durante experimento.

Número de barra	Porcentaje de extracción
1	100%
2	100%
3	100%
4	59.5%

Ésta resultó la primera configuración crítica del proceso de puesta en marcha.

2.4. Temperatura

El experimento se realizó en condiciones isotérmicas, con todos los componentes a 24°C.

2.5. Resultados experimentales

El reactor, configurado como se menciona en la sección anterior, resultó con un factor de multiplicación

$$k_{eff} = 1.0000 \pm 0.0001$$

La incerteza corresponde a la máxima resolución alcanzada por el método de medición.

Capítulo 3. Análisis

3.1. Evaluación de datos experimentales

En este capítulo se analiza la información del capítulo anterior. Si hay información inconsistente, se explican las razones por las cuales se utilizó un valor y no otros. Las incertezas se unifican a una desviación estándar (1σ) y, de haber incertezas no reportadas, las mismas se estiman en este capítulo. Se presenta también la influencia de dichas incertezas en el factor de multiplicación del sistema. El capítulo termina con una estimación de la incerteza total.

3.1.1. Placas combustibles

Del análisis de los datos publicados en (9), (10) y (26), y de los valores promedios y nominales listados en las secciones 2.1.2 y 2.2.1, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- La masa promedio de ^{235}U y uranio resultan 17.872 g y 90.364 g respectivamente (0.021 g y 0.147 g las respectivas desviaciones estándar). Los valores nominales, a partir de cálculos con densidad y enriquecimiento nominales, resultan 17.91 g de ^{235}U y 90.92 g de uranio.
- El espesor promedio de las placas combustibles resulta de 1.487 mm, con una desviación estándar de 0.007 mm. El valor nominal es 1.5 mm.
- El largo promedio de la región activa de las mismas es 623.1 mm, con una desviación de 4.4 mm. El valor nominal es 619 mm.

A partir de valor promedio de las masas de uranio, se obtiene un enriquecimiento promedio de 19.78%.

El valor nominal del espesor de la zona activa (donde se producen las fisiones) es 0.51 mm. Si se considera que la diferencia entre el espesor promedio de las placas y su valor nominal se debe a compresión del *meat* (caso 1), el espesor de éste resulta 0.497 mm. Si, por el contrario, la diferencia se debe a compresión de la vaina de aluminio

6061 (caso 2), entonces el espesor de la zona activa es el nominal. El valor real de la misma casi con seguridad se encuentra entre alguno de estos 2 valores.

Considerando que el ancho de las placas es el nominal (ya que no se dispone de información del fabricante al respecto), el volumen “real” de la zona activa de cada placa resulta 18.5850 cm³ para el caso 1 y 19.0668 cm³ para el caso 2. La densidad de uranio en el *meat* resulta entonces 4.862 y 4.739 g/cm³ respectivamente; la nominal, 4.8 g/cm³.

El k_{eff} calculado resultó el mismo para ambos casos analizados, por lo que se eligió arbitrariamente el caso 1 como base para el modelo.

3.1.2. Composición del material absorbente de las placas de control

A partir del análisis químico de las muestras obtenidas del material absorbente de las barras de control que se observan en la tabla 2.6, se obtiene que el mismo está compuesto por (5.23% ± 0.34%) de cadmio, (14.94 ± 0.90%) de indio, y el resto de plata. Los valores se obtuvieron promediando los resultados del análisis químico; las incertezas se calcularon como la raíz de la suma cuadrática de la desviación estándar y la incerteza de cada medición particular.

3.1.3. Otras fuentes de incertezas

A continuación se listan los demás parámetros que se consideraron relevantes en el cálculo de criticidad del sistema:

- **Posición de las barras de control.** El método de posicionamiento de las barras de control tiene una incerteza de apreciación asociada de 0.1% del total de recorrido (equivalente a 0.63 mm), y una incerteza relacionada con la calibración de las mismas de aproximadamente 5 mm. En forma conservativa, la incerteza en la posición de las barras de control es de 6 mm, que equivale a 1% de extracción/inserción. Al ser la barra 4 la única que no se encuentra totalmente extraída, es la de mayor influencia en el análisis de incertezas.
- **Geometría de los venenos quemables.** Los alambres de cadmio tienen una incerteza máxima tolerable de 0.025 mm en su diámetro, y 2 mm en su longitud. Además, la inamovilidad de éstos se logra por medio de la deformación, que modifica el área de los alambres provocando, debido a efectos de autoapantallamiento, incerteza en la reactividad del sistema.

- **Impurezas en *meat* y aluminio 6061.** Sólo se conoce la máxima concentración de boro equivalente permisible, y la presencia o no de éstas resulta de gran influencia en la criticidad del sistema. En el modelo se consideró el valor medio de la cantidad de boro tolerable en el aluminio 6061 (5 ppm) y en el *meat* (12.5 ppm en Si_2U_3 y 15 ppm en polvo de aluminio).
- **Temperatura del refrigerante.** Debido a que durante el experimento el reactor se encontraba a potencia cero, la temperatura del refrigerante se puede considerar homogénea, y la incerteza de ella es la de apreciación (1 °C).
- **Posición de las cámaras de fisión.** Las mismas tienen libertad de movimiento en la dirección axial, para poder acercar o alejarlas del núcleo, para aumentar o disminuir su contaje. No se tiene registro de la posición de estas cámaras durante el experimento, y no fueron modeladas.

3.1.4. Composición de materiales

En el cálculo de la composición del *meat* se consideró que el U_3Si_2 estaba en proporción estequiométrica de uranio y silicio. Se utilizan la densidad y enriquecimiento de uranio calculados a partir de los datos suministrados por el fabricante. La densidad de aluminio utilizada es la suministrada en el capítulo 2, y la cantidad de boro equivalente, la mitad del máximo tolerable.

En la composición del aluminio 6061 y del acero inoxidable AISI 304L hay elementos que pueden estar presentes en un cierto rango (cobre entre 0.15% y 0.4% en peso en el aluminio 6061), y otros que tienen un máximo valor tolerable (cantidad de hierro en Aluminio 6061 menor al 0.7% en peso). Se considera el valor medio para el primer caso, y el máximo tolerable para el segundo. La cantidad de boro en el aluminio 6061 se considera la mitad de la máxima permisible.

En la aleación de Ag-In-Cd, las cantidades de indio y cadmio se consideran los valores promedios de los resultados de los análisis químicos realizados. El resto se considera plata.

Los cálculos se hicieron con agua liviana pura. La densidad de la misma es de $0,9972994 \text{ g/cm}^3$, correspondiente a 24°C de temperatura y 1 atmósfera de presión (32).

La influencia de las impurezas de ésta en la criticidad del sistema resulta insignificante, por lo que no se tuvo en consideración.

Se desprecian las impurezas del cadmio.

Para el cálculo de densidades numéricas se utilizan las abundancias isotópicas de (33) y las masas molares de (34). Número de Avogadro: $0.60221 \frac{\text{átomos}}{\text{barn} \times \text{cm}}$ (1 barn = 10^{-24} cm^2).

No se encontró información sobre la composición del aluminio en el filtro de BCNT. Se supone aluminio puro con una densidad de 2.6989 g/cm^3 (33). La alúmina se supone sin impurezas, composición Al_2O_3 y densidad 3.52 g/cm^3 .

3.2. Análisis de incertezas

Las incertezas que se asocian en esta sección corresponden a incertezas de una desviación estándar en distribuciones gaussianas de los distintos parámetros. Distribuciones gaussianas pueden considerarse las obtenidas por mediciones directas, tales como las masas de uranio y ^{235}U en las placas combustibles, la longitud de la región activa, el espesor de estas placas, la composición del material absorbente de las barras de control obtenida de análisis químicos y la posición de las barras de control. Otros parámetros, tales como la longitud y radio de los alambres de cadmio, la composición del aluminio 6061 y la presencia de boro en este material o en el *meat*, tienen incertezas asociadas a valores máximos tolerables, los cuales suelen caracterizarse por distribuciones constantes; para relacionar a este tipo de distribución con el valor de una desviación estándar, se multiplica el valor de la tolerancia por $3^{-1/2}$ (35).

Las variaciones de k_{eff} se calculan como el promedio de los valores absolutos de las diferencias entre el k_{eff} calculado original y el del modelo perturbado en una desviación estándar por encima y por debajo.

$$\Delta k_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \left(\left| k_{\text{eff}0} - k_{\text{eff}+\sigma} \right| + \left| k_{\text{eff}0} - k_{\text{eff}-\sigma} \right| \right)$$

Observación: En esta sección se utiliza la unidad *pcm* (1 pcm = 10^{-5}) para medir variaciones de K_{eff} . No se utiliza para medir variaciones de reactividad.

3.2.1. Masa de uranio en *meat*

El contenido promedio de uranio en cada placa combustible es de 90.364 g, con una desviación estándar de 0.147 g. Manteniendo constante el enriquecimiento (19.78% en peso de ^{235}U), la variación de la cantidad total de uranio implica variación de la cantidad de ^{235}U en aproximadamente 0.029 g. Este valor resulta mayor a la desviación estándar del promedio de este isótopo en las placas (0.021 g). Por lo tanto, la variación de la cantidad total de uranio resulta más crítica que la variación de la cantidad de ^{235}U , ambos manteniendo el enriquecimiento.

La variación de 0.147 g en la cantidad de uranio contenido en las placas (90.364 g), manteniendo la geometría de las mismas (variando la densidad del Si_2U_3) y el enriquecimiento del uranio, tiene una influencia de 42 pcm en la incerteza del *benchmark*.

3.2.2. Longitud de la región activa de las placas combustibles

La variación de 4.386 mm en la longitud de la región activa de las placas combustibles (623.099 mm), manteniendo constante la masa y el espesor de la placa (variando la densidad del *meat*), influye en 36 pcm en la incerteza del *benchmark*.

3.2.3. Espesor de las placas combustibles

Variaciones de una desviación estándar (0.007 mm) en el espesor de las placas combustibles (1.487 mm), variando el espesor de la zona activa (caso 1), tiene una influencia de 60 pcm en la incerteza del *benchmark*. Si se mantiene constante el espesor de la zona activa y se varía el espesor de la placa, la variación de una desviación estándar influye en 75 pcm en la incerteza del *benchmark*. Considerando un caso intermedio, se estima que la variación del espesor de las placas combustibles influye en 68 pcm en la incerteza del *benchmark*.

3.2.4. Composición del material absorbente de las barras de control

Se considera a la aleación de Ag-In-Cd compuesta el 5.23% de cadmio, 14.94% de indio y el resto (79.83%) de plata, porcentajes en peso.

3.2.4.1. Cantidad de indio en Ag-In-Cd

La variación de la cantidad de indio en una desviación estándar (0.90% en peso), corrigiendo con plata, tiene una influencia de 18 pcm en la incerteza del *benchmark*.

3.2.4.2. Cantidad de cadmio en Ag-In-Cd

La variación de la cantidad de cadmio en una desviación estándar (0.34% en peso), corrigiendo con plata, influye en 28 pcm en la incerteza del *benchmark*.

3.2.5. Posición de las barras de control

Se varió la posición de las 4 barras de control un 2% del total de recorrido (63 cm) desde la posición original. Se obtuvo una diferencia de 115 pcm en el k_{eff} . Dado que la desviación estándar de la posición de las barras es del 1% del total de recorrido, la influencia de la posición de las barras de control en la incerteza del *benchmark* se estima en 58 pcm.

3.2.6. Longitud de los alambres de cadmio

La variación de 2 mm en la longitud de los alambres de cadmio (500 mm) produce una variación de 21 pcm en el k_{eff} calculado. Considerando una distribución constante de ellos, el efecto de una variación de una desviación estándar en la incerteza del *benchmark* se estima en $21/(3^{1/2}) \approx 12$ pcm.

3.2.7. Radio de los alambres de cadmio

La variación de 0.025 mm en el radio de los alambres de cadmio (0.5 mm) produce una variación de 361 pcm en el k_{eff} calculado. Considerando una distribución constante de ellos, el efecto de una variación de una desviación estándar en la incerteza del *benchmark* se estima en $361/(3^{1/2}) \approx 208$ pcm.

3.2.8. Composición del aluminio 6061

El efecto de aumentar al máximo el porcentaje en peso de cobre, cromo, magnesio y silicio en la composición del aluminio 6061 en el k_{eff} calculado fue de 33 pcm. Considerando una distribución constante de los elementos, la influencia de una variación

de una desviación estándar en la incerteza del *benchmark* se estima en $33/(3^{1/2}) \approx 19$ pcm.

3.2.9. Composición del acero inoxidable AISI 304L

El efecto de aumentar al máximo el porcentaje en peso de cromo y níquel en el acero inoxidable AISI 304L en la incerteza del *benchmark* es despreciable.

3.2.10. Impurezas en Cadmio

La influencia en la incerteza del *benchmark* de las impurezas en el cadmio se considera despreciable.

3.2.11. Cantidad de boro en aluminio 6061

En el modelo se consideró 5 ppm de boro en el aluminio 6061. La variación de 5 ppm de dicho elemento en la composición del material en cuestión provoca una variación de 112 pcm en el k_{eff} calculado. Considerando una distribución constante de los elementos, el efecto de una variación de una desviación estándar en la incerteza del *benchmark* se estima en $112/(3^{1/2}) \approx 65$ pcm.

3.2.12. Cantidad de boro en *meat*

La variación de la cantidad de boro de la composición del *meat* (en el modelo se consideran 12.5 ppm en el Si_2U_3 y 15 ppm en el aluminio), llevando dicho valor al máximo tolerable y a cero, provoca una variación de 177 pcm en el k_{eff} calculado. Considerando una distribución constante de los elementos, la influencia de una variación de una desviación estándar en la incerteza del *benchmark* se estima en $177/(3^{1/2}) \approx 102$ pcm.

3.2.13. Temperatura del refrigerante

La medición del coeficiente de reactividad por temperatura en el reactor con un configuración de núcleo similar a la estudiada resultó de -15 pcm/°C. Por lo tanto, la influencia del cambio de 1 °C en la temperatura del refrigerante en la incerteza del *benchmark* se estima en 15 pcm.

3.2.14. Posición de las cámaras de fisión

Las mismas no fueron modeladas, pero, de resultados experimentales, la influencia de las mismas en la incerteza del *benchmark* se estima menor a 15 pcm.

3.3. Combinación de incertezas

En la tabla 3.1 se presentan los parámetros analizados con sus incertezas y la influencia de los mismos en la criticidad del sistema.

Se considera que todos los parámetros son independientes entre sí, por lo que la incerteza total se calcula como la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de las incertezas individuales. Se obtiene así una incerteza total de ± 266 pcm.

Tabla 3.1. Parámetros analizados, incertezas e influencia en la incerteza del benchmark.

PARÁMETRO	VALOR	INCERTEZA	INFLUENCIA [pcm]
Masa de U en el meat [g]	90,364	0,147	42
Longitud activa [mm]	623,099	4,386	36
Espesor [mm]	1,48711	0,007	68
Cantidad de Indio en absorbente [%]	14,944	0,900	18
Cantidad de Cadmio en absorbente [%]	5,225	0,341	20
Posición de las barras de control		$\pm 1\%$ extracción	57
Longitud de alambres de cadmio [mm]	500	2	12
Diámetro de alambres de cadmio [mm]	0,500	0,025	208
Composición del aluminio	Valores promedios	Valores máximos	19
Cantidad de boro en aluminio [ppm]	5	5	65
Cantidad de boro en <i>meat</i> [ppm]	12.5	12.5	102
Temperatura del refrigerante [°C]	24	1	15
Posición de las cámaras de fisión			<15
		TOTAL	266

Capítulo 4. MODELO DEL REACTOR

4.1.Simplificaciones utilizadas y consideraciones sobre el modelo

En el modelo no se tienen en cuenta los siguientes elementos:

- Estructura soporte y cañerías del primario.
- Todo espacio más allá del diámetro interno de la pileta del reactor.
- Travesaños de elementos combustibles.
- Canaleta de los alambres de cadmio.
- Placa tope y soporte superior de barras de control.
- Impurezas del agua.
- Detectores de radiación.

Además, en el modelo se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las boquillas de los elementos combustibles se modelan como tubos cilíndricos. Se considera que empiezan justo cuando termina la pared lateral y se extienden por 13.5 cm dentro de la grilla, con un radio interno de 2.65 cm y 0.4395 cm de espesor.
- Los ECC se modelan de igual longitud que los ECN. Esto significa que no se modelan las placas guías superiores ni los topes de las barras de control, y se acortan las paredes laterales y las placas guías internas y externas.
- El absorbente de las barras de control se modela con sección rectangular (sin las puntas redondeadas), manteniendo el mismo espesor y masa de material. Para ello, se calcula el área de la sección de la placa y, manteniendo el espesor, se calcula el ancho de la misma.
- Las placas guías de los elementos combustibles de control se modelan con sección rectangular.

La influencia de todas las simplificaciones realizadas en la criticidad del sistema se considera despreciable.

4.2. Modelo

Todas las medidas de las figuras de este capítulo están en centímetros (cm).

4.2.1. Pileta

Sólo se modela el agua contenida por ella, en un cilindro circular de 1.2 metros de radio y 10.4 metros de altura.

4.2.2. Elemento combustible normal

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran el corte del elemento combustible normal en el plano XZ, en el plano medio de la placa combustible interna y de la externa respectivamente. La figura 4.3 muestra un corte en el plano YZ del ECN. La sección de las placas combustibles (plano XY) se muestra en las figuras 4.4 y 4.5.

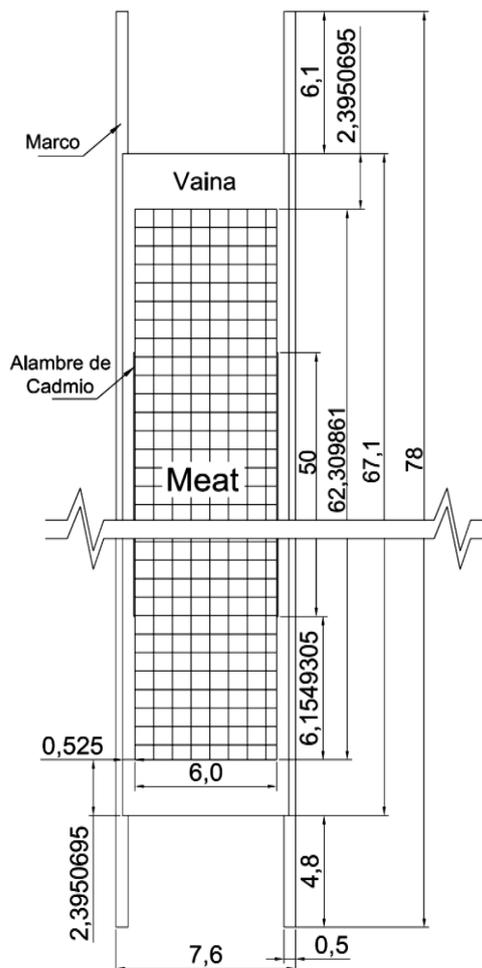


Figura 4.1. Corte en plano XZ del ECN, en el plano medio de una placa combustible interna.

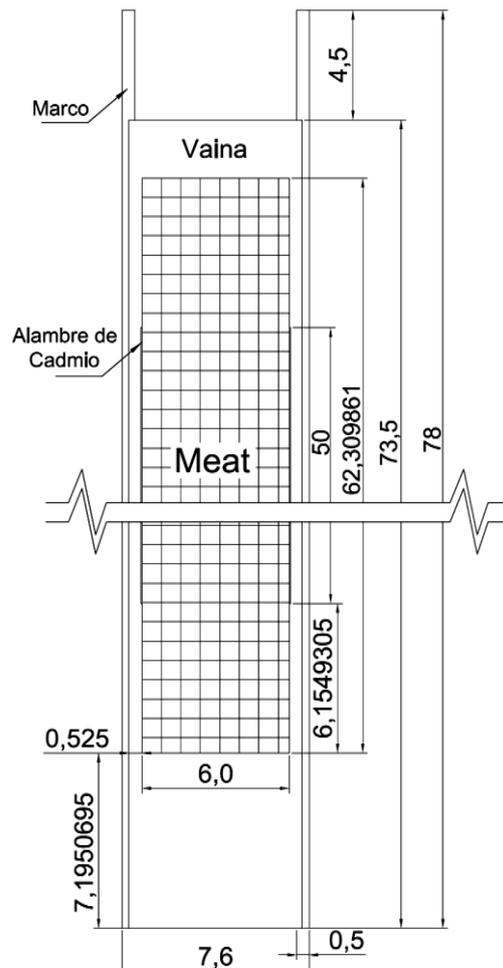


Figura 4.2. Corte en plano XZ del ECN, en el plano medio de una placa combustible externa.

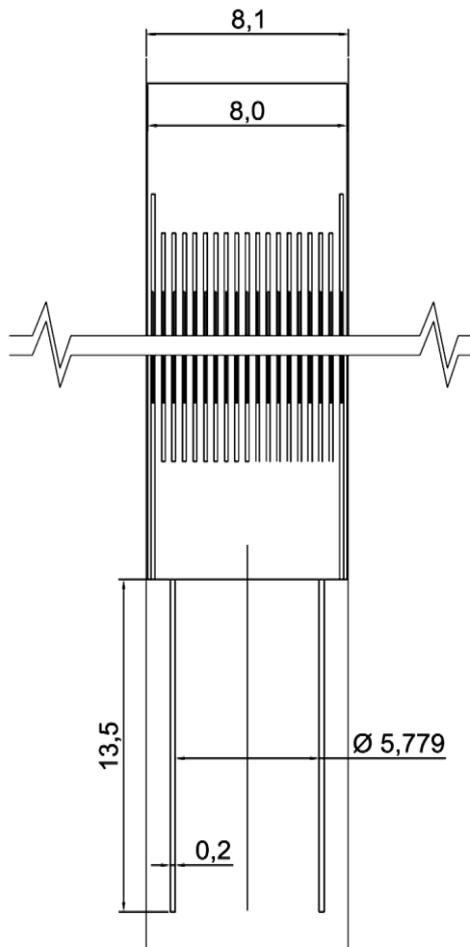


Figura 4.3. Modelo de ECN.

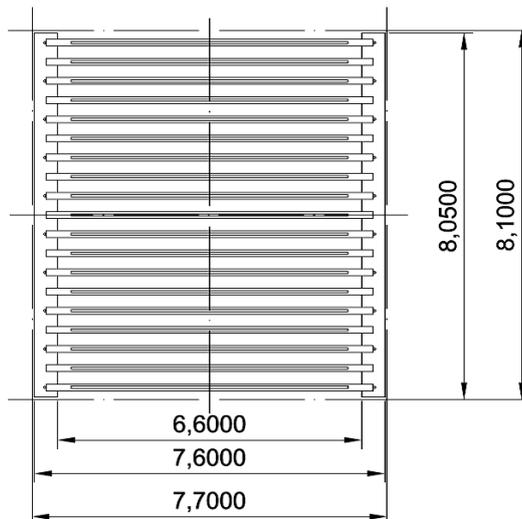


Figura 4.4. Sección de ECN.

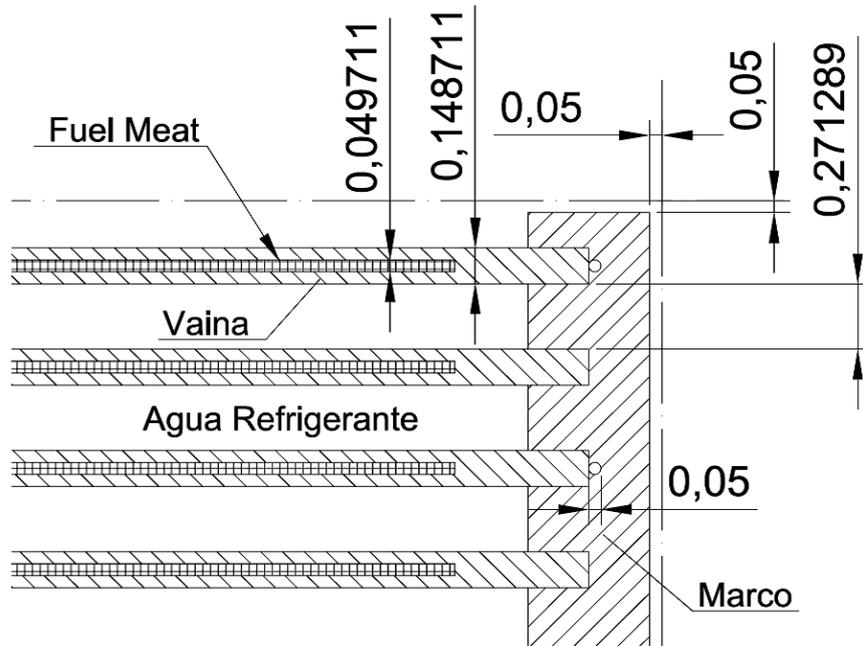


Figura 4.5. Detalle de sección de ECN.

4.2.3. Elemento combustible de control y barra de control

La figura 4.6 muestra el ECC con la barra de control al 0% de extracción (plano YZ); se muestran también las posiciones correspondientes a 59.5% y 100% de extracción. La 4.7 muestra un corte de la barra de control. Las figuras 4.8 y 4.9, por su parte, muestran el corte de estos elementos (plano XY), cuando la barra se halla insertada, y las 4.10 y 4.11 cuando no. A partir de las figuras 4.6 y 4.7 se puede observar la geometría de la barra de control. Los materiales correspondientes son idénticos a los de los ECN, con el agregado del material 3 como material absorbente de las barras de control, y el 5 como el material de las vainas de los mismos.

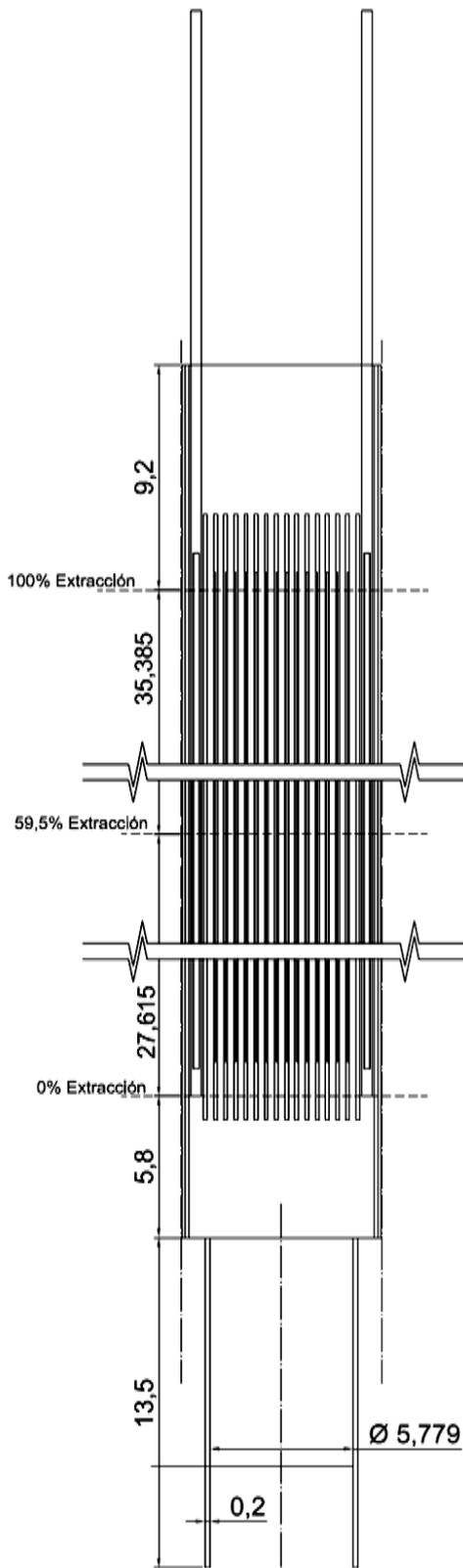


Figura 4.6. Elemento Combustible de Control con barra de control insertada.

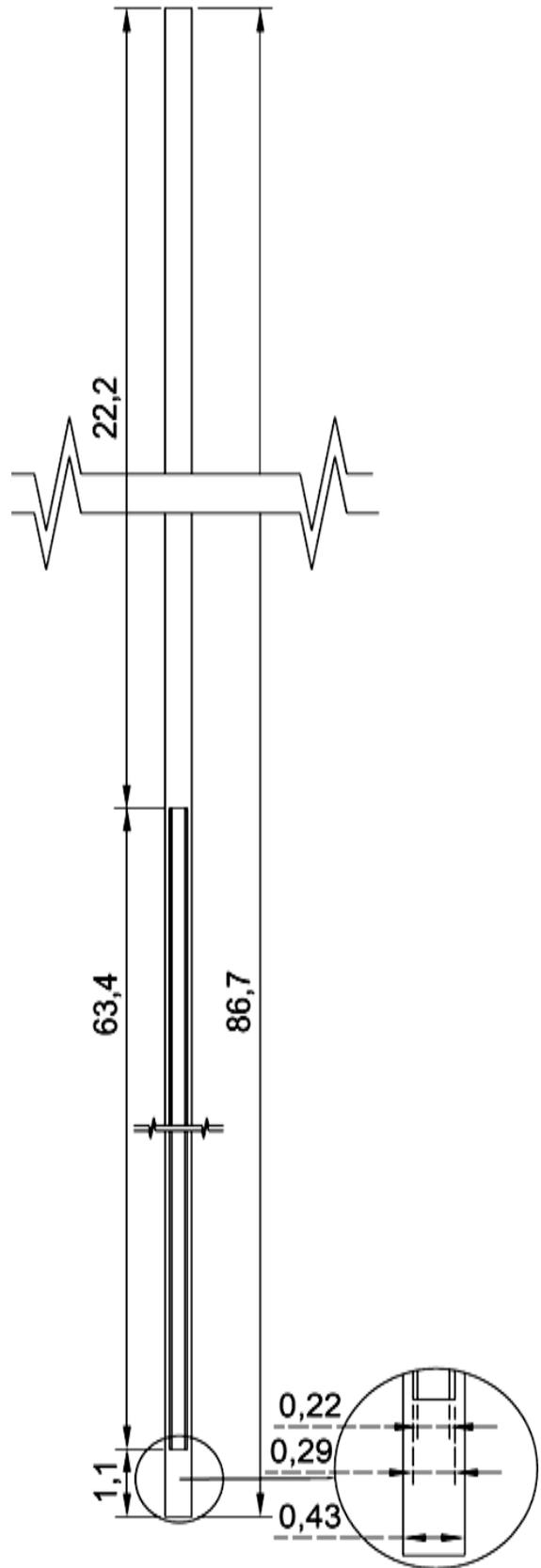


Figura 4.7. Barra de control

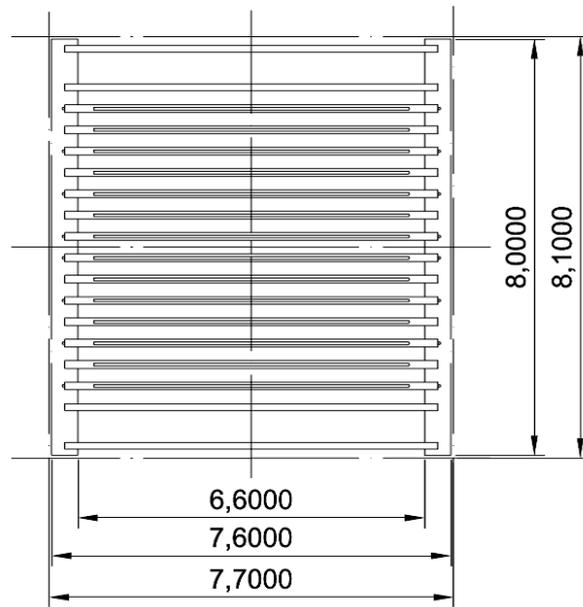


Figura 4.8. Corte de ECC con barra de control extraída.

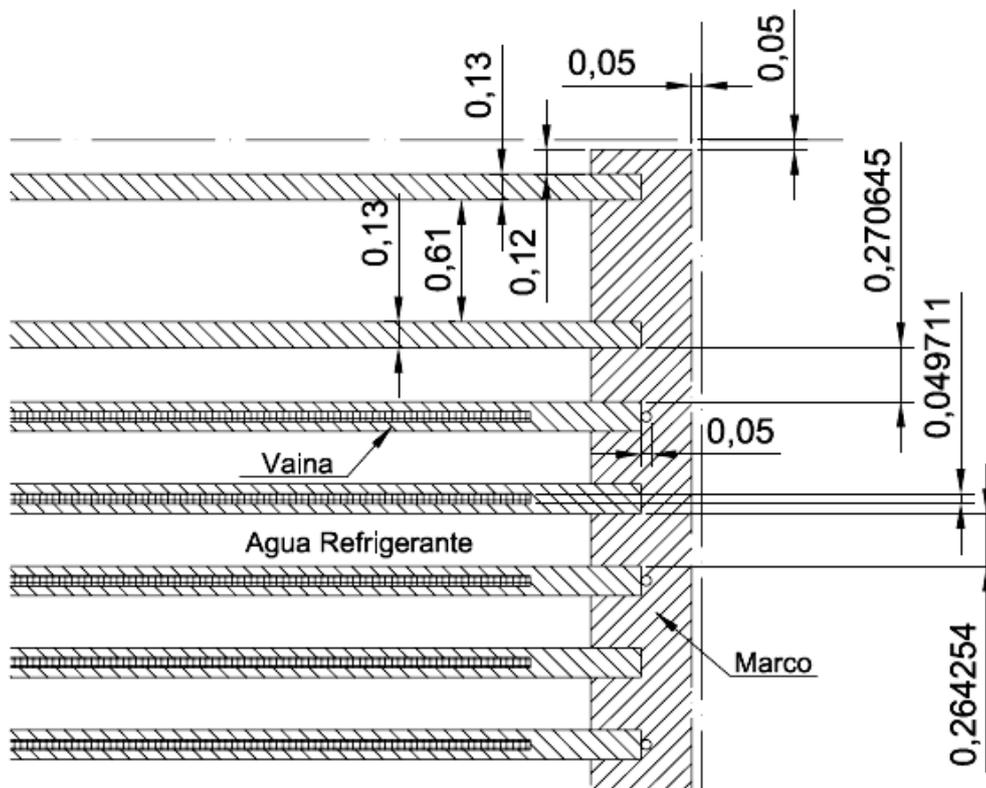


Figura 4.9. Detalle de corte de ECC con barra de control extraída.

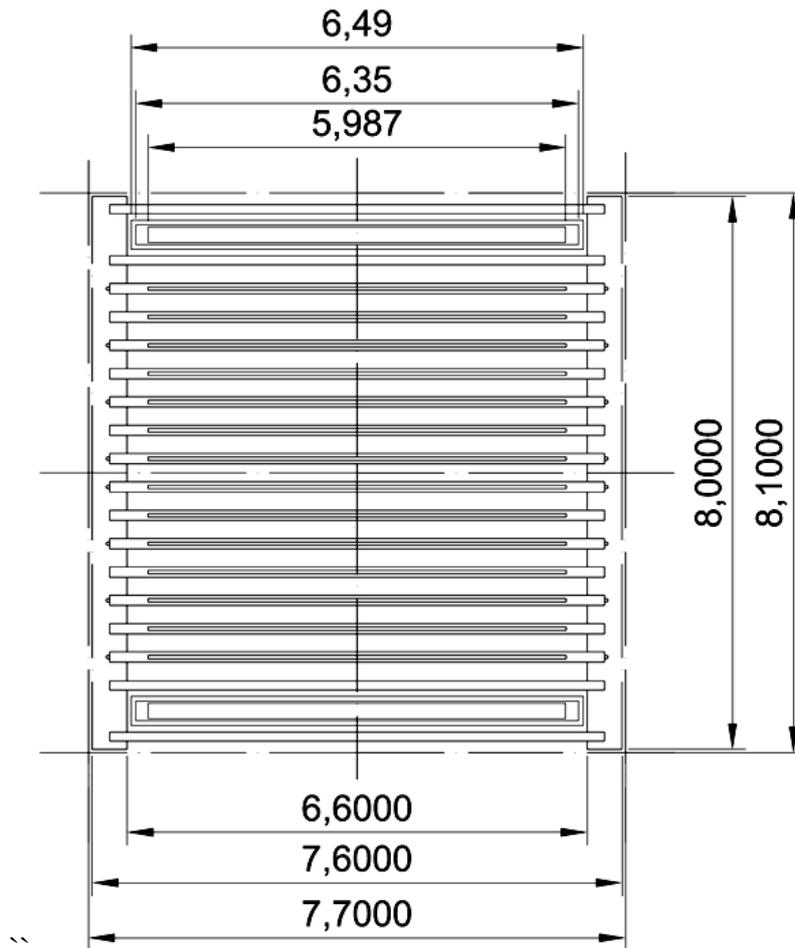


Figura 4.10. Corte de ECC con barra de control insertada.

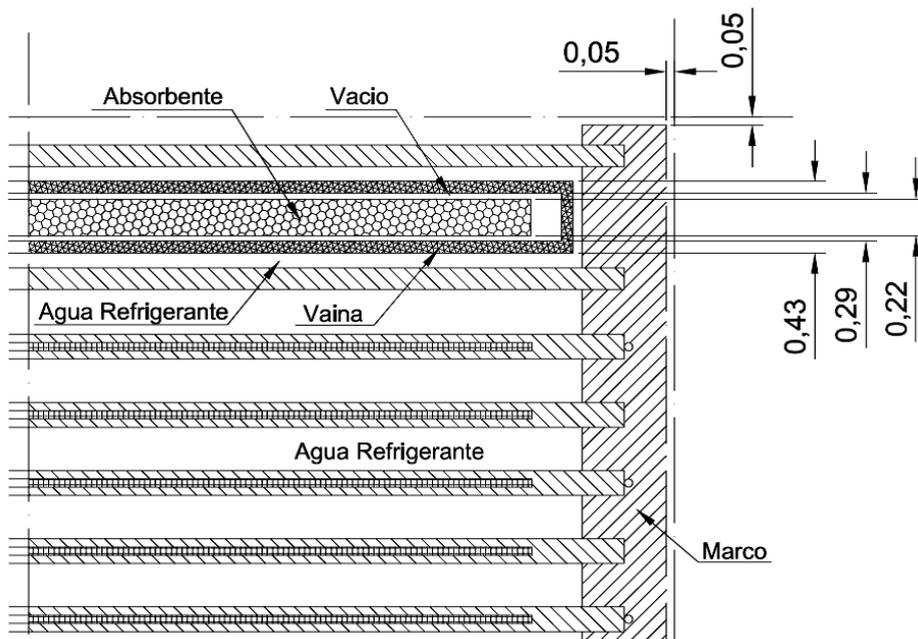


Figura 4.11. Detalle de corte de ECC con barra de control insertada.

4.2.4. Grilla

La figura 4.12 muestra el corte de la grilla (plano XY). La misma es homogénea en la dirección faltante, de 20 cm de altura.

El centro de la grilla está ubicado en el centro de la pileta (radialmente). La superficie que está en contacto con los EECC se encuentra a 301.65 cm del fondo de la pileta.

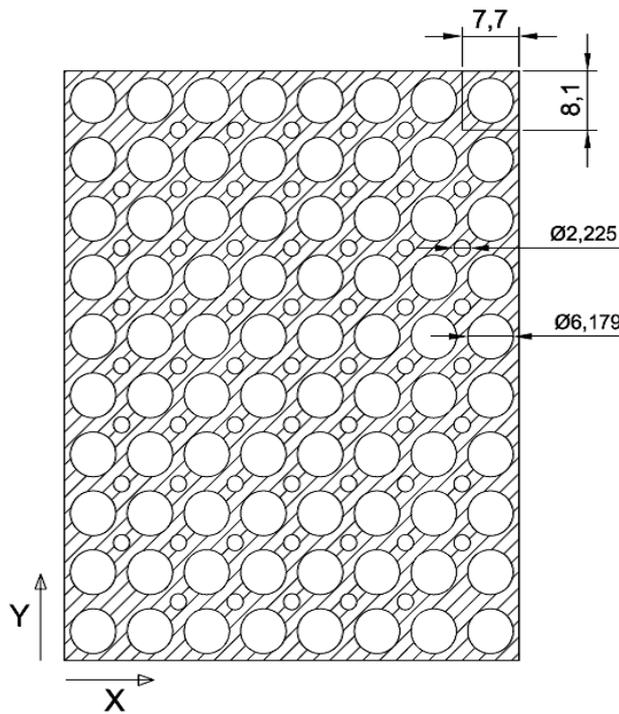


Figura 4.12. Corte de la grilla.

4.2.5. Filtro de BNCT

Se modeló de sección rectangular (en plano XZ), de 77.1 cm x 82.35 cm. En la dirección Y, se completó como se indica en la figura 4.13. Se encuentra directamente apoyado sobre la grilla, cubriendo la primera fila (fila A) de la misma.

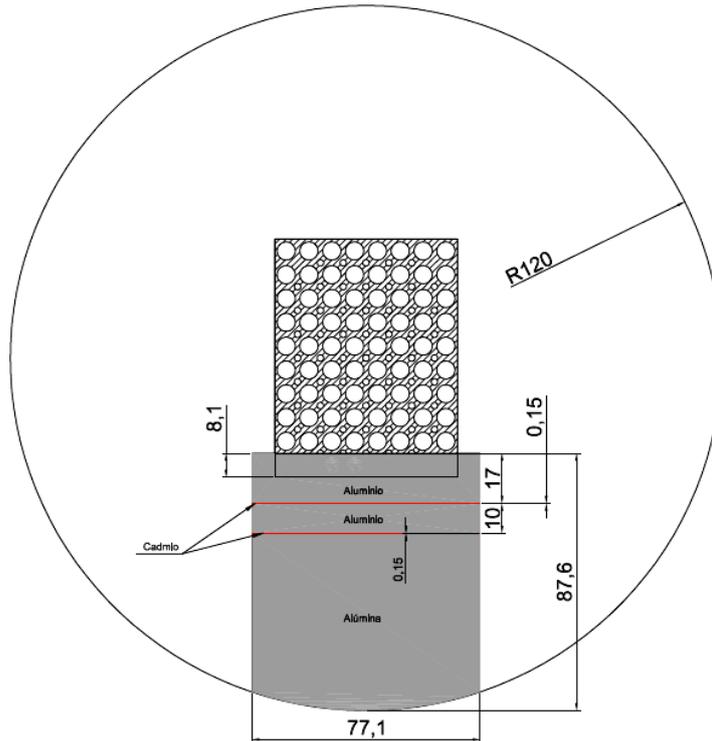


Figura 4.13. Filtro de BNCT.

4.3. Materiales

En la tabla 4.1 se presentan todos los materiales utilizados con sus densidades y composiciones.

Tabla 4.1. Composición y densidad de los materiales.

Material	Elemento	Densidad numérica [10^{24} átomos/cm ³]
Meat	Densidad	5,1001E-02
(material 1)	U-235	2,4638E-03
	U-238	9,8676E-03
	Si-28	7,5821E-03
	Si-29	3,8499E-04
	Si-30	2,5378E-04
	Al-27	3,0444E-02
	B-10	9,4876E-07
	B-11	3,8430E-06
Aluminio 6061	Densidad	5,9860E-02
(material 2)	Al-27	5,8412E-02
	Cu-63	4,8671E-05
	Cu-65	2,1694E-05
	Cr-50	2,6495E-06
	Cr-52	5,1093E-05
	Cr-53	5,7936E-06
	Cr-54	1,4421E-06

	Mg nat	6,6898E-04
	Si-28	3,2037E-04
	Si-29	1,6267E-05
	Si-30	1,0723E-05
	Fe-54	1,1912E-05
	Fe-56	1,8700E-04
	Fe-57	4,3186E-06
	Fe-58	5,7472E-07
	Mn-55	4,4395E-05
	Ti nat	5,0939E-05
	B-10	1,4890E-07
	B-11	6,0310E-07
Ag-In-Cd	Densidad	5,6144E-02
<i>(material 3)</i>	Ag-107	2,3497E-02
	Ag-109	2,1830E-02
	In nat	7,9710E-03
	Cd-106	3,5584E-05
	Cd-108	2,5336E-05
	Cd-110	3,5556E-04
	Cd-111	3,6438E-04
	Cd-112	6,8692E-04
	Cd-113	3,4787E-04
	Cd-114	8,1787E-04
	Cd-116	2,1322E-04
Agua	Densidad	1,0001E-01
<i>(material 4)</i>	H-1	6,6675E-02
	O-16	3,3338E-02
AISI 304L	Densidad	8,7927E-02
<i>(material 5)</i>	C nat	1,2018E-04
	Mn-55	1,7517E-03
	Si-28	1,5801E-03
	Si-29	8,0230E-05
	Si-30	5,2887E-05
	Cr-50	7,6396E-04
	Cr-52	1,4732E-02
	Cr-53	1,6705E-03
	Cr-54	4,1582E-04
	Ni-58	5,5812E-03
	Ni-60	2,1499E-03
	Ni-61	9,3462E-05
	Ni-62	2,9793E-04
	Ni-64	7,5917E-05
	Fe-54	3,4229E-03
	Fe-56	5,3733E-02
	Fe-57	1,2409E-03
	Fe-58	1,6514E-04
Cadmio	Densidad	4,6340E-02
<i>(material 6)</i>	Cd-106	5,7925E-04
	Cd-108	4,1243E-04
	Cd-110	5,7879E-03

	Cd-111	5,9316E-03
	Cd-112	1,1182E-02
	Cd-113	5,6628E-03
	Cd-114	1,3314E-02
	Cd-116	3,4709E-03
Aluminio	Densidad	6.0262E-02
(material 7)	Al-27	6.0262E-02
Alúmina	Densidad	1.1694E-01
(material 8)	Al-27	4.6778E-02
	O-16	7.0166E-02

4.4. Temperatura

En el modelo se usa la densidad del agua a 24 °C.

4.5. Resultado experimental con incertezas calculadas

El k_{eff} experimental es igual a (1.0000 ± 0.0001) . Como se considera que las simplificaciones realizadas no afectan a la criticidad del sistema, el k_{eff} del *benchmark* coincide con el k_{eff} experimental. La incerteza debido a los datos del capítulo 2 se calcula en 266 pcm. La incerteza total resulta

$$\Delta k_{eff} = \sqrt{(0.00266^2 + 0.0001^2)} \approx 0.00266$$

Por lo tanto, el k_{eff} del *benchmark* resulta:

$$k_{eff \text{ benchmark}} = 1.00000 \pm 0.00266$$

Capítulo 5. RESULTADOS

Como se dijo al final del capítulo anterior, el k_{eff} del *benchmark* resulta

$$k_{\text{eff}_{\text{benchmark}}} = 1.00000 \pm 0.00266$$

Este valor de incerteza es del orden de los calculados en estudios similares en otros reactores:

- 0.0033 de incerteza del k_{eff} del *benchmark* realizado en el *Advanced Test Reactor* (ATR), ubicado en el Laboratorio Nacional de Idaho (INL, por sus siglas en inglés), Estados Unidos (36).
- 0.001 de incerteza del k_{eff} del *benchmark* realizado en el reactor de investigación IPEN/MB-01, ubicado en la ciudad de San Pablo, Brasil (37).

El k_{eff} calculado utilizando el código de transporte neutrónico MCNP-5 y la biblioteca de secciones eficaces continua en energía ENDF/B-VI.6,

$$k_{\text{eff}_{\text{modelo}}} = 0.99512 \pm 0.00009$$

donde la incerteza es meramente estadística. Esta incerteza no contempla ninguna diferencia entre el modelo diseñado y la realidad, diferencias que puedan deberse tanto a error humano en la modelización del reactor o a inconsistencias entre las especificaciones técnicas, planos y demás herramientas de las que se extrajo información, y la realidad del sistema físico. La incerteza tampoco contempla la exactitud del método de cálculo y de las secciones eficaces utilizadas; ejemplo de esto es el resultado obtenido utilizando el mismo modelo de reactor, pero con una biblioteca de secciones eficaces distinta (ENDF/B-VI.0), para el cual el resultado obtenido es

$$k_{\text{eff}_{\text{modelo}}}^{\prime} = 0.99381 \pm 0.00009$$

Además, no es raro observar diferencias de más de 500 pcm en cálculos de una misma configuración experimental calculada por distintos códigos (38). Por lo tanto, podemos suponer que el valor de k_{eff} calculado tiene una distribución de probabilidad aproximadamente como la mostrada en la figura 5.1, donde también se presenta el k_{eff} del *benchmark* con su incerteza. En esta figura puede verse que, a pesar de la diferencia entre ambos k_{eff} , existe un solapamiento de los resultados.

Las 9 pcm de incerteza en el k_{eff} calculado significan que el 63% de las historias creadas proporcionan un valor de k_{eff} entre 0.99228 y 0.99246.

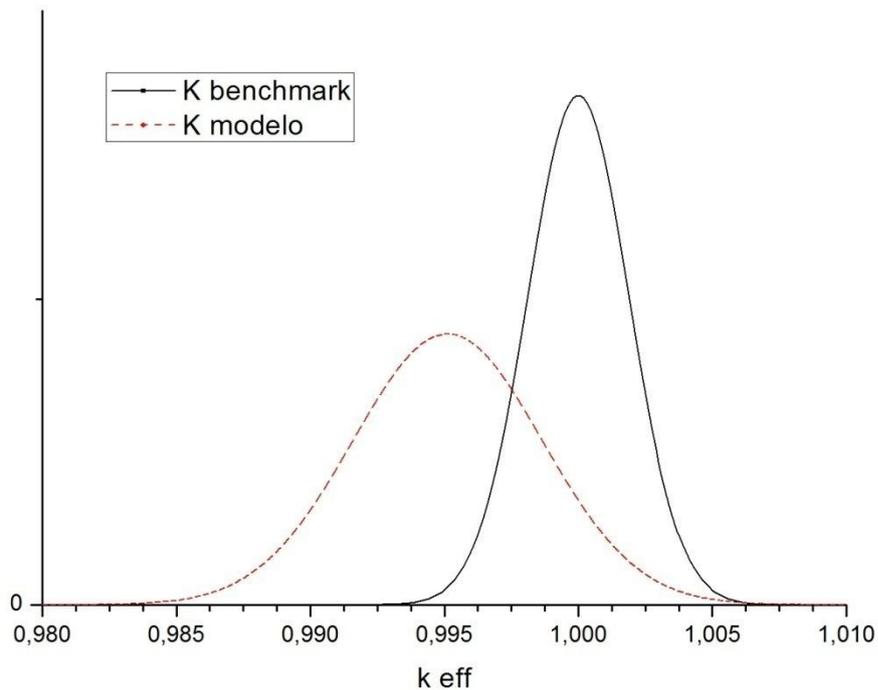


Figura 5.1. K_{eff} calculado y del benchmark con sus respectivas incertezas. La incerteza del modelo se consideró de 500 pcm.

Del análisis de los resultados obtenidos se pueden realizar las siguientes observaciones:

- La diferencia entre el k_{eff} del *benchmark* y el calculado es de 0.00488; este valor resulta menor al 1% del valor del primero y a 3 desviaciones estándar del mismo (0.00266).
- La incerteza asociada al k_{eff} del *benchmark* es menor al 1% del valor del mismo.

Teniendo en cuenta esto, y que la información suministrada en el capítulo 2 permite modelar al reactor, se considera que el trabajo es suficientemente consistente para ser utilizado como *benchmark*.

Capítulo 6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se modeló el núcleo del reactor RA-6, con el fin de cuantificar las incertezas relacionadas con la puesta a crítico de una configuración experimental del mismo. A partir de ello, se pretende analizar la consistencia del mismo como *benchmark*.

Se establecieron las incertezas asociadas a los datos experimentales de los distintos parámetros relevantes en la neutrónica del reactor y se evaluó la influencia de las mismas en el factor de multiplicación efectivo. Ello se logró a partir de la generación de un modelo del núcleo del reactor en MCNP; variando los parámetros en el rango de sus incertezas, se obtiene una variación del k_{eff} asociada a dicho parámetro.

Sumando las incertezas individuales, se puede obtener una incerteza total asociada a dicha configuración crítica.

Los parámetros analizados fueron los siguientes:

- Masa de uranio, espesor y longitud activa de las placas combustibles.
- Posición de las barras de control.
- Composición del material absorbente de neutrones de las barras de control.
- Impurezas en aluminio 6061, material fósil y agua.
- Temperatura del agua.
- Longitud, radio y deformación de venenos quemables.
- Composición del aluminio 6061 y del acero inoxidable AISI 304L.
- Influencia de la posición de las cámaras de fisión.

Se obtuvo una incerteza asociada de 0.00266, siendo el diámetro de los alambres de cadmio y las impurezas en el *meat* y en el aluminio 6061 los parámetros más influyentes. Este valor de incerteza es del orden de los calculados en estudios similares en otros reactores.

Las suposiciones realizadas en el modelo se consideran no influyentes en el k_{eff} del sistema, por lo que no modifican el k_{eff} del *benchmark*, y el resultado final resulta:

$$k_{eff\ benchmark} = 1.00000 \pm 0.00266$$

El k_{eff} calculado resultó (0.99512 ± 0.00009) , que es un valor relativamente preciso, teniendo en cuenta que se estudiaba el caso de un sistema complejo como es un reactor nuclear. En estos casos es común obtener variaciones de más de 500 pcm en cálculos de criticidad dependiendo del código de cálculo y la biblioteca de secciones eficaces utilizados.

Por otro lado, la información del capítulo 2 es lo suficientemente extensa como para poder reproducir el modelo, y la incerteza asociada al k_{eff} del *benchmark* y el k_{eff} calculado son de un valor razonable –en particular, cumplen con los criterios dados en el capítulo 1, de ser menor al 1% del valor de k_{eff} del *benchmark* (el primero) y de estar dentro de las 3 desviaciones estándar del k_{eff} del *benchmark* y a menos del 1% del valor de éste (el segundo). Por lo tanto, se considera que el trabajo tiene la suficiente consistencia para ser considerado *benchmark*.

Referencias

1. **Argonne National Laboratory.** <http://www.rertr.anl.gov/>. [Online]
2. **Briggs, J. B.** *The International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project. INEEL/CON-00-01184.* 2000.
3. **X-5 Monte Carlo team.** Manual de MCNP-5. "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5". 2003.
4. **J. B. Briggs, A. Nouri, V.A.F. Dean.** *NUCLEAR KNOWLEDGE MANAGEMENT EXPERIENCE OF THE INTERNATIONAL CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EVALUATION PROJECT.* s.l. : IAEA-CN-123/03/O/04.
5. **GERENCIA DE AREA ENERGIA NUCLEAR - REACTOR RA-6.** *Informe Final de Seguridad.* 2008.
6. [Online] <http://www.invap.net/nuclear/ra-6/data.html>.
7. **Grupo Diseño UAIN UEN.** *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11DPL3-007-01. "Travesaño".*
8. —. *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11DPL2-002-01. "Boquilla".*
9. Nota ECRI-NT -003/08.
10. Nota ECRI-NT -005/08.
11. **GRUPO DISEÑO UAIN UEN.** *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11dp11-001-01. "ELEMENTO COMBUSTIBLE NORMAL (ENSAMBLE GENERAL)".*
12. **Grupo Diseño UAIN UEN.** *ALAMBRES DE CADMIO PARA LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES DEL REACTOR RA-6. ITA 11DES4-003-01.*
13. —. *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11DPL1-014-01. "ELEMENTO COMBUSTIBLE DE CONTROL".*
14. —. *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11SPL1-015-01. "SUBCONJUNTO CAJA COMBUSTIBLE".*
15. —. *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11DPL1-019-01. "PLACA GUÍA EXTERNA".*
16. —. *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11DPL2-021-01. "PLACA GUÍA INTERNA".*
17. **CNEA.** *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 3.0.26.102. "PLACA ABSORBENTE".*
18. —. *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 3.0.26.101. "PLACA CONTROL DE REACTIVIDAD".*
19. **Grupo Diseño UAIN UEN.** *Proyecto UBERA-6. Plano nro. 11DPL1-020-01. "ENSAMBLE EC DE CONTROL Y CONJUNTO TENEDOR".*
20. Plano CNEA RA-6 14 0403 003 PD 1.
21. **CNEA.** Plano nro. PL-06NBX-400. "FILTRO DE BNCT".
22. Plano CNEA RA-6 00 - 0403 0016 PB 1A 2.
23. Especificaciones Técnicas Contador de Fisión.CF-PT9/1. INVAP.
24. **Estévez, E. A.** *POLVO DE SILICIURO DE URANIO (U₃Si₂) PARA LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE REACTORES DE INVESTIGACION. Informe Técnico 10DES4-006-01.*
25. —. *POLVO DE ALUMINIO PARA EL NUCLEO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES DE REACTORES DE INVESTIGACION. Informe Técnico 10DES4-004-01.*
26. CERTIFICADOS DE LIBERACIÓN ECRI-PT44-CL 5.1.14 N 01/07 a 17/07.
27. **Markiewicz, M.** *PLANCHUELAS DE ALUMINIO PARA COMPONENTES DE LOS ELEMENTOS COMBUSTIBLES NORMAL Y DE CONTROL PARA EL REACTOR RA-6. Informe Técnico 11DES4-006-01.*
28. **Blaumann, H.** *Datos para el análisis neutrónico y termohidráulico del núcleo. ET 06NBX-402.*

29. —. DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO DEL ELEMENTO COMBUSTIBLE EN BASE A U₃Si₂ PARA EL REACTOR RA-6. Especificación técnica ET-06NBX-401.
30. **Markiewicz, M.** “Alambres de Cadmio para los elementos combustibles del reactor RA-6”. Informe Técnico 11DESA4-003-01.
31. **Blaumann, H. and Sanchez, F.** Núcleos de puesta en marcha. Informe Técnico ITA-06NBX-707.
32. **Lide, D. R.** "*CRC Handbook of Chemistry and Physics*", 77th ed. Boca RAtón, Florida, CRC Press : s.n., 1996.
33. **Brookhaven National Laboratory.** *Nuclear Wallets Cards*. 2005.
34. EVALUATION GUIDE FOR THE INTERNATIONAL REACTOR PHYSICS EXPERIMENTS EVALUATION PROJECT.
35. **NUCLEAR ENERGY AGENCY.** *ICSBEP Guide to the Expression of Uncertainties*.
36. **S. S. Kim, B. G. Schnitzler.** *ADVANCED TEST REACTOR: SERPENTINE ARRANGEMENT OF HIGHLY ENRICHED WATER-MODERATED URANIUM-ALUMINIDE FUEL PLATES REFLECTED BY BERYLLIUM. HEU-MET-THERM-022.* s.l. : International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, 2005.
37. **A. dos Santos, G. Simões de Andrade e Silva, L. C. Cabelo Bernardes.** *CRITICAL LOADING CONFIGURATIONS OF THE IPEN/MB-01 REACTOR. NEA/NSC/DOC/(95)03/IV Volume IV LEU-COMP-THERM-077.* s.l. : INTERNATIONAL HANDBOOK OF EVALUATED CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EXPERIMENTS, 2006.
38. **Cullen, D. E.** "*How Accurately can we Calculate Thermal Systems?*". s.l. : LLNL Report, UCRL-TR-203892, 2004.

Anexo 1. Código base de MCNP-5

```
Corrida critica
c Original
c CELDAS
c UNIVERSO 1: Placa con cadmio de ECN
11 1 5.1001E-02 -1 imp:n= 1 u= 1 $ Meat
12 2 5.9860E-02 1 -2 imp:n= 1 u= 1 $ Vaina
13 6 4.6340E-02 -3 imp:n= 1 u= 1 $ Alambres de cadmio de atrás
14 6 4.6340E-02 -4 imp:n= 1 u= 1 $ Alambres de cadmio de adelante
15 2 5.9860E-02 2 3 -11 imp:n= 1 u= 1 $ Pared lateral de atrás
16 2 5.9860E-02 2 4 -12 imp:n= 1 u= 1 $ Pared lateral de adelante
17 5 1.00013E-01 2 11 12 imp:n= 1 u= 1 $ Agua
c UNIVERSO 2: Placa sin cadmio de ECN
21 1 5.1001E-02 -1 imp:n= 1 u= 2 $ Meat
22 2 5.9860E-02 1 -2 imp:n= 1 u= 2 $ Vaina
23 2 5.9860E-02 2 -11 imp:n= 1 u= 2 $ Pared lateral de atrás
24 2 5.9860E-02 2 -12 imp:n= 1 u= 2 $ Pared lateral de adelante
25 5 1.00013E-01 2 11 12 imp:n= 1 u= 2 $ Agua
c UNIVERSO 3: Placa con cadmio de ECC
31 1 5.1001E-02 -1 imp:n= 1 u= 3 $ Meat
32 2 5.9860E-02 1 -2 imp:n= 1 u= 3 $ Vaina
33 6 4.6340E-02 -3 imp:n= 1 u= 3 $ Alambres de cadmio de atrás
34 6 4.6340E-02 -4 imp:n= 1 u= 3 $ Alambres de cadmio de adelante
35 2 5.9860E-02 2 3 -21 imp:n= 1 u= 3 $ Pared lateral de atrás
36 2 5.9860E-02 2 4 -22 imp:n= 1 u= 3 $ Pared lateral de adelante
37 5 1.00013E-01 2 21 22 imp:n= 1 u= 3 $ Agua
c UNIVERSO 4: Placa sin cadmio de ECC
41 1 5.1001E-02 -1 imp:n= 1 u= 4 $ Meat
42 2 5.9860E-02 1 -2 imp:n= 1 u= 4 $ Vaina
43 2 5.9860E-02 2 -21 imp:n= 1 u= 4 $ Pared lateral de atrás
44 2 5.9860E-02 2 -22 imp:n= 1 u= 4 $ Pared lateral de adelante
45 5 1.00013E-01 2 21 22 imp:n= 1 u= 4 $ Agua
c UNIVERSO 5: Espacio de placas de ECN
51 5 1.00013E-01 31 -32 35 -36 33 -34 imp:n= 1 lat=1 u= 5 fill= 0:0 -10:10 0:0
5 9 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 9 5 $ El arreglo de las 19 placas
52 5 1.00013E-01 -31 32 -35 36 -33 34 imp:n= 1 u= 5 $ Afuera del arreglo
c UNIVERSO 6: Espacio de placas de ECC
61 5 1.00013E-01 31 -32 37 -38 33 -34 imp:n= 1 lat=1 u= 6 fill= 0:0 -7:6 0:0
3 4 3 4 3 4 3 3 4 3 4 3 4 3 $ El arreglo de las 13 placas
62 5 1.00013E-01 -31 32 -37 38 -33 34 imp:n= 1 u= 6 $ Afuera del arreglo
c UNIVERSO 7: Vainas vacías para ECC
71 2 5.9860E-02 -5 imp:n= 1 u= 7 $ Vaina
72 2 5.9860E-02 5 -21 imp:n= 1 u= 7 $ Pared lateral de atrás
73 2 5.9860E-02 5 -22 imp:n= 1 u= 7 $ Pared lateral de adelante
74 5 1.00013E-01 5 21 22 imp:n= 1 u= 7 $ Agua
c UNIVERSO 77: Vainas vacías para ECC
771 2 5.9860E-02 -6 imp:n= 1 u= 77 $ Vaina
772 2 5.9860E-02 6 -21 imp:n= 1 u= 77 $ Pared lateral de atrás
773 2 5.9860E-02 6 -22 imp:n= 1 u= 77 $ Pared lateral de adelante
774 5 1.00013E-01 6 21 22 imp:n= 1 u= 77 $ Agua
c UNIVERSO 8: Placa absorbente
81 4 5.6144E-02 -41 imp:n= 1 u= 8 $ Absorbente
82 0 41 -43 imp:n= 1 u= 8 $ Vacio
83 3 8.7927E-02 43 -42 imp:n= 1 u= 8 $ Vaina
84 5 1.00013E-01 42 imp:n= 1 u= 8 $ Agua externa
c UNIVERSO 9: Placa externa de ECN
91 1 5.1001E-02 -1 imp:n= 1 u= 9 $ Meat
92 2 5.9860E-02 1 -13 imp:n= 1 u= 9 $ Vaina
93 6 4.6340E-02 -3 imp:n= 1 u= 9 $ Alambres de cadmio de atrás
94 6 4.6340E-02 -4 imp:n= 1 u= 9 $ Alambres de cadmio de adelante
95 2 5.9860E-02 13 3 -11 imp:n= 1 u= 9 $ Pared lateral de atrás
96 2 5.9860E-02 13 4 -12 imp:n= 1 u= 9 $ Pared lateral de adelante
97 5 1.00013E-01 13 11 12 imp:n= 1 u= 9 $ Agua
c UNIVERSO 10: Elemento combustible de control nro 1, con barra absorbente
```

101 5 1.00013E-01 -51 fill= 6 (0 -0.205 0) imp:n= 1 u= 10 \$ Mitad de las barras combustibles

102 5 1.00013E-01 -52 fill= 7 (0 -3.075 0) imp:n= 1 u= 10 \$ Vaina vacía interna

103 2 5.9860E-02 -53 imp:n= 1 u= 10 \$ Pared lateral en parte absorbente

104 2 5.9860E-02 -54 imp:n= 1 u= 10 \$ Pared lateral en parte absorbente

105 5 1.00013E-01 -55 fill= 8 (0 -3.445 63.25) imp:n= 1 u= 10 \$ Placa absorbente

106 5 1.00013E-01 -56 fill= 77 (0 -3.815 0) imp:n= 1 u= 10 \$ Vaina vacía externa

107 5 1.00013E-01 -57 fill= 7 (0 3.075 0) imp:n= 1 u= 10 \$ Vaina vacía interna

108 2 5.9860E-02 -58 imp:n= 1 u= 10 \$ Pared lateral en parte absorbente

109 2 5.9860E-02 -59 imp:n= 1 u= 10 \$ Pared lateral en parte absorbente

110 5 1.00013E-01 -60 fill= 8 (0 3.445 63.25) imp:n= 1 u= 10 \$ Placa absorbente

111 5 1.00013E-01 -61 fill= 77 (0 3.815 0) imp:n= 1 u= 10 \$ Vaina vacía externa

112 5 1.00013E-01 -62 #101 #102 #103 #104 #105 #106 #107 #108 #109 #110 #111
imp:n= 1 u= 10 \$ El espacio exterior

c UNIVERSO 11: Elemento combustible de control nro 2, con barra absorbente

113 5 1.00013E-01 -51 fill= 6 (0 -0.205 0) imp:n= 1 u= 11 \$ Mitad de las barras combustibles

114 5 1.00013E-01 -52 fill= 7 (0 -3.075 0) imp:n= 1 u= 11 \$ Vaina vacía interna

115 2 5.9860E-02 -53 imp:n= 1 u= 11 \$ Pared lateral en parte absorbente

116 2 5.9860E-02 -54 imp:n= 1 u= 11 \$ Pared lateral en parte absorbente

117 5 1.00013E-01 -55 fill= 8 (0 -3.445 63.25) imp:n= 1 u= 11 \$ Placa absorbente

118 5 1.00013E-01 -56 fill= 77 (0 -3.815 0) imp:n= 1 u= 11 \$ Vaina vacía externa

119 5 1.00013E-01 -57 fill= 7 (0 3.075 0) imp:n= 1 u= 11 \$ Vaina vacía interna

120 2 5.9860E-02 -58 imp:n= 1 u= 11 \$ Pared lateral en parte absorbente

121 2 5.9860E-02 -59 imp:n= 1 u= 11 \$ Pared lateral en parte absorbente

122 5 1.00013E-01 -60 fill= 8 (0 3.445 63.25) imp:n= 1 u= 11 \$ Placa absorbente

123 5 1.00013E-01 -61 fill= 77 (0 3.815 0) imp:n= 1 u= 11 \$ Vaina vacía externa

124 5 1.00013E-01 -62 #101 #102 #103 #104 #105 #106 #107 #108 #109 #110 #111
imp:n= 1 u= 11 \$ El espacio exterior

c UNIVERSO 12: Elemento combustible de control nro 3, con barra absorbente

125 5 1.00013E-01 -51 fill= 6 (0 -0.205 0) imp:n= 1 u= 12 \$ Mitad de las barras combustibles

126 5 1.00013E-01 -52 fill= 7 (0 -3.075 0) imp:n= 1 u= 12 \$ Vaina vacía interna

127 2 5.9860E-02 -53 imp:n= 1 u= 12 \$ Pared lateral en parte absorbente

128 2 5.9860E-02 -54 imp:n= 1 u= 12 \$ Pared lateral en parte absorbente

129 5 1.00013E-01 -55 fill= 8 (0 -3.445 63.25) imp:n= 1 u= 12 \$ Placa absorbente

130 5 1.00013E-01 -56 fill= 77 (0 -3.815 0) imp:n= 1 u= 12 \$ Vaina vacía externa

131 5 1.00013E-01 -57 fill= 7 (0 3.075 0) imp:n= 1 u= 12 \$ Vaina vacía interna

132 2 5.9860E-02 -58 imp:n= 1 u= 12 \$ Pared lateral en parte absorbente

133 2 5.9860E-02 -59 imp:n= 1 u= 12 \$ Pared lateral en parte absorbente

134 5 1.00013E-01 -60 fill= 8 (0 3.445 63.25) imp:n= 1 u= 12 \$ Placa absorbente

135 5 1.00013E-01 -61 fill= 77 (0 3.815 0) imp:n= 1 u= 12 \$ Vaina vacía externa

136 5 1.00013E-01 -62 #101 #102 #103 #104 #105 #106 #107 #108 #109 #110 #111
imp:n= 1 u= 12 \$ El espacio exterior

c UNIVERSO 13: Elemento combustible de control nro 4, con barra absorbente

138 5 1.00013E-01 -51 fill= 6 (0 -0.205 0) imp:n= 1 u= 13 \$ Mitad de las barras combustibles

139 5 1.00013E-01 -52 fill= 7 (0 -3.075 0) imp:n= 1 u= 13 \$ Vaina vacía interna

140 2 5.9860E-02 -53 imp:n= 1 u= 13 \$ Pared lateral en parte absorbente

141 2 5.9860E-02 -54 imp:n= 1 u= 13 \$ Pared lateral en parte absorbente

142 5 1.00013E-01 -55 fill= 8 (0 -3.445 37.735) imp:n= 1 u= 13 \$ Placa absorbente

143 5 1.00013E-01 -56 fill= 77 (0 -3.815 0) imp:n= 1 u= 13 \$ Vaina vacía externa

144 5 1.00013E-01 -57 fill= 7 (0 3.075 0) imp:n= 1 u= 13 \$ Vaina vacía interna

145 2 5.9860E-02 -58 imp:n= 1 u= 13 \$ Pared lateral en parte absorbente

146 2 5.9860E-02 -59 imp:n= 1 u= 13 \$ Pared lateral en parte absorbente

147 5 1.00013E-01 -60 fill= 8 (0 3.445 37.735) imp:n= 1 u= 13 \$ Placa absorbente

148 5 1.00013E-01 -61 fill= 77 (0 3.815 0) imp:n= 1 u= 13 \$ Vaina vacía externa

149 5 1.00013E-01 -62 #101 #102 #103 #104 #105 #106 #107 #108 #109 #110 #111
imp:n= 1 u= 13 \$ El espacio exterior

c UNIVERSO 15: Elemento combustible normal

151 5 1.00013E-01 -71 fill= 5 imp:n= 1 u= 15 \$ Espacio de las placas combustibles

152 5 1.00013E-01 71 # 153 # 154 # 155 # 156 imp:n= 1 u= 15 \$ Resto

153 2 5.9860E-02 -72 imp:n= 1 u= 15 \$ Pared faltante

154 2 5.9860E-02 -73 imp:n= 1 u= 15 \$ Pared faltante

155 2 5.9860E-02 -74 imp:n= 1 u= 15 \$ Pared faltante

156 2 5.9860E-02 -75 imp:n= 1 u= 15 \$ Pared faltante

c UNIVERSO 16: Arreglo de los elementos combustibles

161 5 1.00013E-01 -81 imp:n= 1 lat= 1 u= 16 fill= -3:4 -4:4 0:0
16 16 16 16 16 16 16 16

```

16 16 15 15 15 16 16 16
16 15 10 15 11 15 16 16
16 15 15 15 15 15 16 16
16 15 13 15 12 15 16 16
16 16 16 15 15 16 16 16
16 16 16 16 16 16 16 16
16 16 16 16 16 16 16 16
16 16 16 16 16 16 16 16
c UNIVERSO 17: Esquina superior izquierda de la grilla
171 2 5.9860E-02 -101 106 102 imp:n= 1 u= 17 $ Aluminio
172 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 17 $ Agujero central
173 5 1.00013E-01 -106   imp:n= 1 u= 17 $ Agujero esquina inferior derecha
174 5 1.00013E-01 101 106   imp:n= 1 u= 17 $ El resto
c UNIVERSO 18: Esquina superior derecha de la grilla
181 2 5.9860E-02 -101 105 102 imp:n= 1 u= 18 $ Aluminio
182 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 18 $ Agujero central
183 5 1.00013E-01 -105   imp:n= 1 u= 18 $ Agujero esquina inferior izquierda
184 5 1.00013E-01 101 105   imp:n= 1 u= 18 $ El resto
c UNIVERSO 19: Esquina inferior izquierda de la grilla
191 2 5.9860E-02 -101 104 102 imp:n= 1 u= 19 $ Aluminio
192 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 19 $ Agujero central
193 5 1.00013E-01 -104   imp:n= 1 u= 19 $ Agujero esquina superior derecha
194 5 1.00013E-01 101 104   imp:n= 1 u= 19 $ El resto
c UNIVERSO 20: Esquina inferior derecha de la grilla
201 2 5.9860E-02 -101 103 102 imp:n= 1 u= 20 $ Aluminio
202 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 20 $ Agujero central
203 5 1.00013E-01 -103   imp:n= 1 u= 20 $ Agujero esquina superior izquierda
204 5 1.00013E-01 101 103   imp:n= 1 u= 20 $ El resto
c UNIVERSO 21: Lateral superior de la grilla
211 2 5.9860E-02 -101 105 102 106 imp:n= 1 u= 21 $ Aluminio
212 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 21 $ Agujero central
213 5 1.00013E-01 -105   imp:n= 1 u= 21 $ Agujero esquina inferior izquierda
214 5 1.00013E-01 -106   imp:n= 1 u= 21 $ Agujero esquina inferior derecha
215 5 1.00013E-01 101 105 106 imp:n= 1 u= 21 $ El resto
c UNIVERSO 22: Lateral derecho de la grilla
221 2 5.9860E-02 -101 105 102 103 imp:n= 1 u= 22 $ Aluminio
222 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 22 $ Agujero central
223 5 1.00013E-01 -105   imp:n= 1 u= 22 $ Agujero esquina inferior izquierda
224 5 1.00013E-01 -103   imp:n= 1 u= 22 $ Agujero esquina superior derecha
225 5 1.00013E-01 101 105 103 imp:n= 1 u= 22 $ El resto
c UNIVERSO 23: Lateral inferior de la grilla
231 2 5.9860E-02 -101 103 102 104 imp:n= 1 u= 23 $ Aluminio
232 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 23 $ Agujero central
233 5 1.00013E-01 -103   imp:n= 1 u= 23 $ Agujero esquina superior izquierda
234 5 1.00013E-01 -104   imp:n= 1 u= 23 $ Agujero esquina superior derecha
235 5 1.00013E-01 101 103 104 imp:n= 1 u= 23 $ El resto
c UNIVERSO 24: Lateral izquierdo de la grilla
241 2 5.9860E-02 -101 104 102 106 imp:n= 1 u= 24 $ Aluminio
242 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 24 $ Agujero central
243 5 1.00013E-01 -106   imp:n= 1 u= 24 $ Agujero esquina inferior derecha
244 5 1.00013E-01 -104   imp:n= 1 u= 24 $ Agujero esquina superior derecha
245 5 1.00013E-01 101 104 106 imp:n= 1 u= 24 $ El resto
c UNIVERSO 25: Centro de la grilla
251 2 5.9860E-02 -101 102 103 104 105 106 imp:n= 1 u= 25 $ Aluminio
252 5 1.00013E-01 -102   imp:n= 1 u= 25 $ Agujero central
253 5 1.00013E-01 -103   imp:n= 1 u= 25 $ Agujero esquina superior izquierda
254 5 1.00013E-01 -104   imp:n= 1 u= 25 $ Agujero esquina superior derecha
255 5 1.00013E-01 -105   imp:n= 1 u= 25 $ Agujero esquina inferior izquierda
256 5 1.00013E-01 -106   imp:n= 1 u= 25 $ Agujero esquina inferior derecha
257 5 1.00013E-01 101 102 103 104 105 106 imp:n= 1 u= 25 $ El resto
c UNIVERSO 26: Centro de la grilla con combustible
261 2 5.9860E-02 -101 107 103 104 105 106 108 imp:n= 1 u= 26 $ Aluminio
262 5 1.00013E-01 -107   imp:n= 1 u= 26 $ Agujero central
263 5 1.00013E-01 -103   imp:n= 1 u= 26 $ Agujero esquina superior izquierda
264 5 1.00013E-01 -104   imp:n= 1 u= 26 $ Agujero esquina superior derecha
265 5 1.00013E-01 -105   imp:n= 1 u= 26 $ Agujero esquina inferior izquierda
266 5 1.00013E-01 -106   imp:n= 1 u= 26 $ Agujero esquina inferior derecha
267 5 1.00013E-01 101 107 103 104 105 106 108 imp:n= 1 u= 26 $ El resto
268 5 1.00013E-01 -108   imp:n= 1 u= 26 $ Parte de abajo del cilindro central

```

```

c UNIVERSO 27: Grilla
271 2 5.9860E-02 -101 imp:n= 1 U= 27 lat= 1 fill= -3:4 -5:4 0:0
    28 19 23 23 23 20 28
    19 31 25 25 25 25 20
    24 25 26 26 26 25 22
    24 26 26 26 26 25 22
    24 26 26 26 26 25 22
    24 26 26 26 26 25 22
    24 25 25 26 26 25 22
    24 25 25 25 25 25 22
    17 29 25 25 25 30 18
    28 17 21 21 21 18 28
c UNIVERSO 28: Esquinas de la grilla
281 2 5.9860E-02 -101 102 imp:n= 1 u= 28 $ Aluminio
282 5 1.00013E-01 -102 imp:n= 1 u= 28 $ Agujero central
283 5 1.00013E-01 101 102 imp:n= 1 u= 28 $ El resto
c UNIVERSO 29: Complemento de esquina superior izquierdo
291 2 5.9860E-02 -101 104 105 106 102 imp:n= 1 u= 29 $ Aluminio
292 5 1.00013E-01 -102 imp:n= 1 u= 29 $ Agujero central
293 5 1.00013E-01 -104 imp:n= 1 u= 29 $ Agujero superior derecho
294 5 1.00013E-01 -105 imp:n= 1 u= 29 $ Agujero inferior izquierdo
295 5 1.00013E-01 -106 imp:n= 1 u= 29 $ Agujero inferior derecho
296 5 1.00013E-01 101 104 105 106 102 imp:n= 1 u= 29 $ El resto
c UNIVERSO 30: Complemento de esquina superior derecho
301 2 5.9860E-02 -101 103 105 106 102 imp:n= 1 u= 30 $ Aluminio
302 5 1.00013E-01 -102 imp:n= 1 u= 30 $ Agujero central
303 5 1.00013E-01 -103 imp:n= 1 u= 30 $ Agujero superior izquierdo
304 5 1.00013E-01 -105 imp:n= 1 u= 30 $ Agujero inferior izquierdo
305 5 1.00013E-01 -106 imp:n= 1 u= 30 $ Agujero inferior derecho
306 5 1.00013E-01 101 103 105 106 102 imp:n= 1 u= 30 $ El resto
c UNIVERSO 31: Complemento de esquina inferior izquierda
311 2 5.9860E-02 -101 102 103 104 106 imp:n= 1 u= 31 $ Aluminio
312 5 1.00013E-01 -102 imp:n= 1 u= 31 $ Agujero central
313 5 1.00013E-01 -103 imp:n= 1 u= 31 $ Agujero superior izquierdo
314 5 1.00013E-01 -104 imp:n= 1 u= 31 $ Agujero superior derecho
315 5 1.00013E-01 -106 imp:n= 1 u= 31 $ Agujero inferior derecho
316 5 1.00013E-01 101 102 103 104 106 imp:n= 1 u= 31 $ El resto
c UNIVERSO 32: Complemento de esquina inferior derecha
321 2 5.9860E-02 -101 102 103 104 105 imp:n= 1 u= 32 $ Aluminio
322 5 1.00013E-01 -102 imp:n= 1 u= 32 $ Agujero central
323 5 1.00013E-01 -103 imp:n= 1 u= 32 $ Agujero superior izquierdo
324 5 1.00013E-01 -104 imp:n= 1 u= 32 $ Agujero superior derecho
325 5 1.00013E-01 -105 imp:n= 1 u= 32 $ Agujero inferior izquierdo
326 5 1.00013E-01 101 102 103 104 105 imp:n= 1 u= 32 $ El resto
c El espacio real!!!!!!
1000 5 1.00013E-01 -91 fill= 16 imp:n= 1 $ Los elementos combustibles
1001 7 6.0262E-02 -92 95 imp:n= 1 $ El filtro de BNCT: 1er aluminio
1002 6 4.6340E-02 -92 -95 96 imp:n= 1 $ El filtro de BNCT: 1er cadmio
1003 7 6.0262E-02 -92 -96 97 imp:n= 1 $ El filtro de BNCT: 2do aluminio
1004 6 4.6340E-02 -92 -97 98 imp:n= 1 $ El filtro de BNCT: 2do cadmio
1005 8 1.1694E-01 -92 -93 -98 imp:n= 1 $ El filtro de BNCT: 3er aluminio
1006 5 1.00013E-01 -93 91 92 94 imp:n= 1 $ El agua de reflector
1007 5 1.00013E-01 -94 fill= 27 ( 0 0 -48.35 ) imp:n= 1 $ La grilla
1008 0 93 imp:n= 0 $ El resto

c SUPERFICIES
c 0-Placa de Elementos combustibles en general
1 rpp -3 3 -0.0248555 0.0248555 -31.1549305 31.1549305 $ Meat. X: ancho Y: espesor
Z: largo
2 rpp -3.525 3.525 -0.0743555 0.0743555 -33.55 33.55 $ Vaina
3 rcc -3.55 0 -25 0 0 50 0.025 $ Cilindro para alambres de cadmio de atrás
4 rcc 3.55 0 -25 0 0 50 0.025 $ Cilindro para alambres de cadmio de adelante
5 rpp -3.525 3.525 -0.065 0.065 -33.55 33.55 $ Vaina para placa de aluminio
6 rpp -3.525 3.525 -0.065 0.065 -38.35 39.65 $ Vaina para placa de aluminio externa
c 1-Placa de ECN (propios)
11 rpp -3.8 -3.3 -0.21 0.21 -38.35 39.65 $ Pared lateral de atrás
12 rpp 3.3 3.8 -0.21 0.21 -38.35 39.65 $ Pared lateral de adelante
13 rpp -3.525 3.525 -0.0743555 0.0743555 -38.35 35.15 $ Vaina placa de ECN externa
c 2-Placa de ECC (propios)

```

21 rpp -3.8 -3.3 -0.205 0.205 -38.35 39.65 \$ Pared lateral de atrás
 22 rpp 3.3 3.8 -0.205 0.205 -38.35 39.65 \$ Pared lateral de adelante
 c 3-Paredes de los Elementos combustibles, que formaran los ECN (UNIVERSO 5) Y ECC (UNIVERSO 6)
 31 px -3.85 \$ A lo ancho
 32 px 3.85 \$ A lo ancho
 33 pz -38.35 \$ A lo largo
 34 pz 39.65 \$ A lo largo
 35 py -0.21 \$ Espesor de ECN
 36 py 0.21 \$ Espesor de ECN
 37 py -0.205 \$ Espesor de ECC
 38 py 0.205 \$ Espesor de ECC
 c 4-Placas absorbentes
 41 rpp -2.9935 2.9935 -0.11 0.11 -31.7 31.7 \$ Absorbente
 42 rpp -3.245 3.245 -0.215 0.215 -32.8 53.9 \$ Vaina
 43 rpp -3.175 3.175 -0.145 0.145 -31.7 31.7 \$ Vacio
 c 5-6- Elemento combustible de control
 51 rpp -3.85 3.85 -2.87 2.87 -38.35 39.65 \$ Espacio para la mitad de las barras combustibles. Contiene un espacio de la mitad de la separación entre vaina vacia y vaina combustible
 52 rpp -3.85 3.85 -3.23 -2.87 -38.35 39.65 \$ Espacio para la vaina vacia interna. Tiene el lugar del gap de agua.
 53 rpp -3.8 -3.3 -3.66 -3.23 -38.35 39.65 \$ Espacio para pared lateral a la altura del absorbente.
 54 rpp 3.3 3.8 -3.66 -3.23 -38.35 39.65 \$ Espacio para pared lateral a la altura del absorbente.
 55 rpp -3.3 3.3 -3.66 -3.23 -33.15 118.25 \$ Espacio para la placa absorbente
 56 rpp -3.85 3.85 -4 -3.66 -38.35 39.65 \$ Placa vacia externa, hasta borde de elemento combustible
 57 rpp -3.85 3.85 2.87 3.23 -38.35 39.65 \$ Espacio para la vaina vacia interna. Tiene el lugar del gap de agua.
 58 rpp -3.8 -3.3 3.23 3.66 -38.35 39.65 \$ Espacio para pared lateral a la altura del absorbente.
 59 rpp 3.3 3.8 3.23 3.66 -38.35 39.65 \$ Espacio para pared lateral a la altura del absorbente.
 60 rpp -3.3 3.3 3.23 3.66 -33.15 118.25 \$ Espacio para la placa absorbente
 61 rpp -3.85 3.85 3.66 4 -38.35 39.65 \$ Placa vacia externa, hasta borde de elemento combustible
 62 so 1000
 c 7- Elemento combustible normal
 71 rpp -3.8 3.8 -3.99 3.99 -38.35 39.65 \$ Espacio para los combustibles en elemento combustible normal
 72 rpp -3.8 -3.3 -4 -3.99 -38.35 39.65 \$ Espacio para el pedacito de pared que falta.
 73 rpp 3.3 3.8 -4 -3.99 -38.35 39.65 \$ Espacio para el pedacito de pared que falta.
 74 rpp -3.8 -3.3 3.99 4 -38.35 39.65 \$ Espacio para el pedacito de pared que falta.
 75 rpp 3.3 3.8 3.99 4 -38.35 39.65 \$ Espacio para el pedacito de pared que falta.
 c 8- Arreglo de elementos combustibles
 81 rpp -3.85 3.85 -4.05 4.05 -38.35 118.4549305 \$ Un lugar de la grilla. Despues un lattice y se forma.
 c 9- Espacio real
 91 rpp -26.95 34.65 -36.45 36.45 -38.35 118.4549305 \$ Lugar para los elementos combustibles
 92 rpp -34.7 42.4 -122.95 -36.45 -38.35 44 \$ Lugar para los filtros de BNCT, se supone una masa completa que se va a llenar de aluminio.
 93 rcc 3.85 -4.05 -380 0 0 1040 120 \$ Lo que agregamos de agua alrededor, no ponemos todo el tanque para ahorrar tiempo
 94 rpp -26.95 34.65 -44.55 36.45 -58.35 -38.35 \$ Lugar para la grilla
 95 py -53.45
 96 py -53.6
 97 py -63.6
 98 py -63.75
 c 10- Para los espacios de la grilla
 101 rpp -3.85 3.85 -4.05 4.05 -10 10 \$ Caja para llenar de aluminio
 102 rcc 0 0 -10 0 0 20 3.0895 \$ Agujero central
 103 rcc -3.85 4.05 -10 0 0 20 1.1125 \$ Cilindro superior izquierdo
 104 rcc 3.85 4.05 -10 0 0 20 1.1125 \$ Cilindro superior derecho
 105 rcc -3.85 -4.05 -10 0 0 20 1.1125 \$ Cilindro inferior izquierdo
 106 rcc 3.85 -4.05 -10 0 0 20 1.1125 \$ Cilindro inferior derecho
 107 rcc 0 0 -3.5 0 0 13.5 2.8895 \$ Agujero central con combustible

108 rcc 0 0 -10 0 0 6.5 3.0895 \$ Parte de abajo del agujero central con comb.

c -----Materiales-----

c Meat

m1 92235.66c 2.4638E-03
92238.66c 9.8676E-03
14028.66c 7.5821E-03
14029.66c 3.8499E-04
14030.66c 2.5378E-04
13027.66c 3.0444E-02
5010.66c 9.4876E-07
5011.66c 3.8430E-06

c Al6061 (dens=2.7g/cm3)

m2 13027.66c 5.8412E-02 \$ Al
29063.66c 4.8671E-05 \$ Cu63
29065.66c 2.1694E-05 \$ Cu65
24050.66c 2.6495E-06 \$ Cr50
24052.66c 5.1093E-05 \$ Cr52
24053.66c 5.7936E-06 \$ Cr53
24054.66c 1.4421E-06 \$ Cr54
12000.66c 6.6898E-04 \$ Mg
14028.66c 3.2037E-04 \$ Si28
14029.66c 1.6267E-05 \$ Si29
14030.66c 1.0723E-05 \$ Si30

c 30000.66c 0.0000E+00 \$ Zn, no estÃ; la biblioteca.

26054.66c 1.1912E-05 \$ Fe54
26056.66c 1.8700E-04 \$ Fe56
26057.66c 4.3186E-06 \$ Fe57
26058.66c 5.7472E-07 \$ Fe58
25055.66c 4.4395E-05 \$ Mn55
22000.66c 5.0939E-05 \$ Ti
5010.66c 1.4890E-07 \$ B10
5011.66c 6.0310E-07 \$ B11

c Acero inoxidable AISI 304L (dens=7.99 g/cm3)

m3 6000.66c 1.2018E-04 \$C
25055.66c 1.7517E-03 \$Mn55
14028.66c 1.5801E-03 \$Si28
14029.66c 8.0230E-05 \$Si29
14030.66c 5.2887E-05 \$Si30
24050.66c 7.6396E-04 \$Cr50
24052.66c 1.4732E-02 \$Cr52
24053.66c 1.6705E-03 \$Cr53
24054.66c 4.1582E-04 \$Cr54
28058.66c 5.5812E-03 \$Ni58
28060.66c 2.1499E-03 \$Ni60
28061.66c 9.3462E-05 \$Ni61
28062.66c 2.9793E-04 \$Ni62
28064.66c 7.5917E-05 \$Ni64
26054.66c 3.4229E-03 \$Fe54
26056.66c 5.3733E-02 \$Fe56
26057.66c 1.2409E-03 \$Fe57
26058.66c 1.6514E-04 \$Fe58

c Aleacion Ag-In-Cd (dens=10.17 g/cm3)

m4 47107.66c 2.3497E-02 \$Ag107
47109.66c 2.1830E-02 \$Ag109
49000.66c 7.9710E-03 \$In113
48106.66c 3.5584E-05 \$Cd106
48108.66c 2.5336E-05 \$Cd108
48110.66c 3.5556E-04 \$Cd110
48111.66c 3.6438E-04 \$Cd111
48112.66c 6.8692E-04 \$Cd112
48113.66c 3.4787E-04 \$Cd113
48114.66c 8.1787E-04 \$Cd114
48116.66c 2.1322E-04 \$Cd116

c Agua

m5 1001.66c 2
8016.66c 1

c impurezas...

mt5 lwtr.01t

```
c AISI 316. hace falta?
c   Alambres de Cd (dens=8.65 g/cm3)
m6  48106.66c 0.0125 $ Cd106
    48108.66c 0.0089 $ Cd108
    48110.66c 0.1249 $ Cd110
    48111.66c 0.1280 $ Cd111
    48112.66c 0.2413 $ Cd112
    48113.66c 0.1222 $ Cd113
    48114.66c 0.2873 $ Cd114
    48116.66c 0.0749 $ Cd116
c Aluminio
m7  13027.66c 6.0262E-02
c Alumina
m8  13027.66c 4.6778E-02
    8016.66c 7.0166E-02
kcode 10000 1 50 8050
ksrc   0 0 0
```

Agradecimientos

Antes que a nadie quiero agradecerle a mi familia. Sin ellos, yo no estaría acá. Ustedes me hicieron lo que soy y me dieron todo lo que tengo. Sivia, Orencio, Agustín, Guido, Paulo y Berni, este trabajo es para ustedes. A mis abuelos Pepe y Lucía, a tíos y primos; resulta difícil estar lejos de tan gran familia.

A Inés, por bancarme y contenerme siempre que lo necesité.

A las familias Sapei, Bisquerra y Monjo y a Analía, a los que les guardo mucho cariño, por el apoyo continuo.

A los viejos amigos. A Bufo, mi amigo del alma; al Lichi, Belu, Nico, Pichi, David, Marcos, Marquitos, Panza, Seba, Walter, Nacho, Turco, Meli y Mechi, por tantos lindos momentos y por acompañarme a la distancia.

A los nuevos amigos, fruto de estos últimos 3 años. A Pablo, Pablito, Mariano, Andrés, Darío, Tito, Fede, Maile, Cele, Marcos, Ariel y al resto de IB06 y 07, por acompañarme en esta nueva experiencia.

A Herman y a Nacho, que sin ellos no podría haber hecho este trabajo. Al resto de DIFRA, por hacerme un lugar en su división. Al personal de biblioteca, de limpieza, profesores y directivos del Instituto, que todos los días brindan su esfuerzo para nuestra educación.

A todos ellos, muchas gracias.