

## **“Validación y diseño con la línea de cálculo HUEMUL-PUMA sobre celda tipo BWR y reactor IPEN/MB-01”**

**Carrera: Especialización en reactores nucleares y su ciclo de combustible**

Autor: Ing. Gonzalo Hernán Bergás

Director: Ing. Juan Ignacio Beliera.

Co - Director: Ing. Carlos Grant.

Marzo 2017



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## **Resumen**

El trabajo se dividió en tres partes. En la primera se realizó un *benchmark* con Huemul de una celda con  $Gd_2O_3$  como veneno quemable, de dimensiones típicas de un reactor tipo BWR. En la misma se calcularon diferentes parámetros en función del quemado, y se obtuvieron resultados que aportaron información acerca de la aplicabilidad del código a este tipo de celdas.

En la segunda parte se realizaron dos *benchmarks* del reactor IPEN/MB-01 con cálculos de celda y núcleo, por lo que se utilizaron ambos códigos. En uno de los experimentos se calculó la variación de la reactividad al ir agregando placas reflectoras en el núcleo, y se determinó la posición crítica en cada caso. El otro experimento consistió en verificar cuanto variaba el exceso de reactividad al agregar un tanque de  $D_2O$  en la zona reflectora.

Los resultados obtenidos brindaron información del error asociado al utilizar los códigos en este tipo de reactor, combustible y reflector.

En la tercera parte se estudió la factibilidad de diseñar una caja central de irradiación en el reactor IPEN/MB-01. Se probaron diferentes configuraciones y combustibles que involucraron la utilización de ambos códigos, y se plantearon posibles modificaciones.

# **Índice**

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo1: Introducción .....                                                                          | 5  |
| 1.1 Objetivos del trabajo.....                                                                         | 5  |
| 1.2 Magnitudes Fundamentales .....                                                                     | 6  |
| 1.3 Glosario .....                                                                                     | 8  |
| 1.4 Cálculo de Celda .....                                                                             | 8  |
| 1.5 Cálculo de Núcleo.....                                                                             | 10 |
| Capítulo2: Benchmark BWR.....                                                                          | 11 |
| 2.1 Cálculo celda BWR .....                                                                            | 11 |
| 2.1.1 Celdas a Evaluar .....                                                                           | 11 |
| 2.1.2 Modelos en HUEMUL.....                                                                           | 12 |
| 2.1.2.1 Caso sin veneno quemable .....                                                                 | 12 |
| 2.1.2.2 Caso con veneno quemables .....                                                                | 14 |
| 2.1.3 Resultados.....                                                                                  | 15 |
| 2.1.3.1 Reactividad en función del quemado .....                                                       | 15 |
| 2.1.3.2 Concentraciones .....                                                                          | 16 |
| 2.1.3.3 Perfil de concentración de $^{155}\text{Gd}$ y $^{157}\text{Gd}$ en los pines con veneno ..... | 21 |
| 2.1.3.4 Potencia .....                                                                                 | 22 |
| 2.2 Cálculos IPEN/MB-01 .....                                                                          | 24 |
| 2.2.1 Descripción del Reactor .....                                                                    | 24 |
| 2.2.2 Modelo de Celda .....                                                                            | 27 |
| 2.2.2.1 Celda combustible y combustible-barra de control.....                                          | 27 |
| 2.2.2.2 Agua cercana, agua lejana, agua pesada y SS-304.....                                           | 28 |
| 2.2.3 Modelo de Núcleo.....                                                                            | 28 |
| 2.2.4 Resultados.....                                                                                  | 30 |
| 2.2.4.1 Placas reflectoras SS-304 .....                                                                | 30 |
| 2.2.4.2 Tanque de agua pesada .....                                                                    | 31 |
| 2.2.4.3 Discusión de resultados .....                                                                  | 31 |
| Capítulo 3: Diseño .....                                                                               | 33 |
| 3.1 Propuesta .....                                                                                    | 33 |
| 3.2 Consideraciones para el diseño .....                                                               | 33 |
| 3.3 Caso 1: Combustible original ( $\text{UO}_2$ 4% enriquecido).....                                  | 33 |
| 3.3.1 Resultados.....                                                                                  | 36 |
| 3.4 Caso 2: $\text{UO}_2$ 8% de enriquecimiento .....                                                  | 37 |
| 3.4.1 Modelos en HUEMUL para núcleo con 64 pines extraídos en el centro y 29 en cada esquina.....      | 38 |
| 3.4.1.1 Modelo de celda “combustible” y celda “combustible con barras de control” .....                | 38 |
| 3.4.1.2 Agua Lejana y Agua Cercana .....                                                               | 39 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.1.3 Cálculos PUMA.....                                           | 40 |
| 3.4.1.1 Resultados.....                                              | 40 |
| 3.4.2 Modelos en HUEMUL con agua de caja central en las celdas ..... | 41 |
| 3.4.2.1 Modelos de celda .....                                       | 41 |
| 3.4.2.2 Agua Cercana Y Agua Lejana .....                             | 41 |
| 3.4.2.3 Cálculos En PUMA .....                                       | 41 |
| 3.4.2.4 Resultados.....                                              | 42 |
| 3.5 Conclusiones del diseño.....                                     | 42 |
| Conclusiones .....                                                   | 44 |
| Referencias bibliográficas .....                                     | 45 |
| ANEXOS.....                                                          | 46 |

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Objetivos del trabajo

La línea de cálculo HUEMUL-PUMA fue desarrollada por CNEA y actualmente se utiliza en todo tipo de reactores, principalmente para realizar cálculos de celda y de núcleo en reactores tipo PHWR. Debido a su uso continuado en las centrales ATUCHA I y EMBALSE, está adecuadamente validada para el uso en este tipo de reactores y combustibles.

A partir de los proyectos iniciados en los últimos años, surgió la necesidad de corroborar la validez de la línea en cálculos para diferentes tipos de reactores.

Con el objetivo de verificar su comportamiento en celdas con presencia de venenos quemables y en reactores de investigación, con distintos enriquecimientos y tipos de reflector, se realizaron una serie de *benchmarks*.

Se entiende por benchmark cualquier modelo numérico o medición experimental que reporte suficientes datos de manera de permitir el modelado y reproducción por cálculo de parámetros neutrónicos de interés.

El trabajo se divide en tres partes. La primer parte del trabajo consistió en realizar un *benchmark* de un arreglo de 4x4 barras de un BWR, de las cuales dos contenían  $Gd_2O_3$  como veneno quemable. Se realizaron cálculos de quemado y se obtuvieron resultados de diferentes parámetros. El objetivo fue comparar estos resultados con los obtenidos por los otros códigos del *benchmark* para evaluar el comportamiento de HUEMUL al realizar cálculos de este tipo de celdas.

En la segunda parte se realizaron dos *benchmarks* en el reactor IPEN/MB-01 utilizando HUEMUL para calcular las celdas y PUMA para realizar los cálculos de núcleo. El objetivo fue comparar los resultados obtenidos de los códigos con los obtenidos experimentalmente, para obtener de esta forma una mejor referencia del error de la línea de cálculo. El primer experimento consistió en colocar placas de acero inoxidable (SS-304) en un lado del núcleo, y a medida que se fueron agregando se observó la variación de reactividad y la posición crítica de los bancos de control en función del número de placas. En el segundo experimento se calculó cuanto varió el exceso de reactividad colocando un tanque de  $D_2O$  en el reflector.

Por último, como ejercicio de diseño se estudió la factibilidad de instalar una caja central de irradiación en el reactor IPEN/MB-01. Se propusieron restricciones y se probaron diferentes configuraciones y composiciones.

## 1.2 Magnitudes Fundamentales

### **Interacciones de los neutrones con la materia:**

Al no poseer carga eléctrica, los neutrones solo interactúan con los núcleos.

Las reacciones se pueden dividir en dos grupos:

- Reacción de dispersión o scattering: después de la colisión sigue existiendo el neutrón libre.

Se dividen en:

- Elásticas: El sistema neutrón-medio conserva su energía cinética y cantidad de movimiento
- Inelástica: El sistema neutrón-medio conserva la cantidad de movimiento pero no la energía cinética.

- Reacciones de absorción: después de la colisión el neutrón desaparece del sistema generando nuevas partículas.

Se dividen en:

- Captura radiactiva: El neutrón es absorbido por el núcleo pasando este a un estado excitado del que regresa emitiendo radiación gamma.
- Absorción con emisión de partículas: El neutrón es absorbido y como resultado se forma un núcleo que emite partículas (electrón, positrón, alfa, protón, 2 o más neutrones).
- Fisión: El neutrón es absorbido y el núcleo que se forma se divide emitiendo neutrones. [4]

### **Sección eficaz microscópica:**

Sección efectiva que ofrece cada núcleo a la interacción con los neutrones.

Es una variable asociada a la probabilidad de interacción. Las principales son:

- Sección eficaz de *scattering*.
- Sección eficaz de captura.
- Sección eficaz de fisión.

La sección eficaz total es la suma de cada una de éstas. Las unidades son [cm<sup>2</sup>]. Dado que las magnitudes son muy chicas, se utiliza una unidad equivalente llamada “barns”, que es equivalente a 10<sup>24</sup> cm<sup>2</sup>. [4]

### **Sección eficaz macroscópica:**

Se define como la sección eficaz microscópica multiplicada por la densidad atómica (átomos/cm<sup>3</sup>). Es equivalente a la sección eficaz por unidad de volumen. Las unidades son [1/cm]. [4]

### **Camino libre medio:**

Se denomina así a la distancia promedio que recorre un neutrón hasta sufrir una interacción. Se calcula como la inversa de la sección eficaz macroscópica. [4]

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma}$$

***Moderación:***

En un reactor térmico la mayoría de las fisiones se producen por neutrones térmicos. Sin embargo, los neutrones que nacen de una fisión son rápidos, es decir, tienen mucha energía. Por tal motivo, es necesario que disminuyan su energía para que aumente su probabilidad de producir fisiones.

Para hacer posible esto, los reactores térmicos cuentan con un material denominado moderador cuyo objetivo es que los neutrones pierdan su energía mediante interacciones de *scattering*, produciendo el mínimo de absorciones posible. Por esto el material moderador debe tener una baja sección eficaz de absorción y una alta sección eficaz de *scattering*.

Por otro lado, mientras menor sea la masa del núcleo, este adquirirá mayor velocidad en la interacción de *scattering*, por lo que el neutrón perderá mayor energía, siendo esto otra condición para que un material sea buen moderador.

Ejemplos de moderadores utilizados en reactores térmicos son el agua liviana, el agua pesada y el grafito. [4]

***Flujo neutrónico:***

Se define como la cantidad de neutrones que atraviesan una superficie en una unidad de tiempo (Neutrones/seg.cm<sup>2</sup>). [4]

***Espectros característicos:***

En un reactor térmico los neutrones nacen como neutrones rápidos, a medida que sufren interacciones con los núcleos del medio van perdiendo energía, hasta que la energía de los mismos es comparable a la energía de agitación térmica de los átomos y moléculas del medio, a estos neutrones se los denomina térmicos. Si se divide a los neutrones en tres grupos de energía se pueden definir los espectros rápido, epitérmico y térmico. Los neutrones correspondientes a esta última región del espectro son los responsables de la mayoría de las fisiones en un reactor térmico, y de ahí su nombre. [4]

***Factor de multiplicación, K:***

Se define como el cociente entre el número de neutrones que producen fisión en dos generaciones sucesivas.

Si el número de fisiones que ocurre en la unidad de tiempo es constante, se dice que el reactor está en un estado “crítico”. Si el número de fisiones aumenta en la unidad de tiempo, el reactor esta “supercrítico”. Si el número de fisiones disminuye en el tiempo, el reactor esta “subcrítico”.

Se pueden definir dos factores:

- **K efectivo (K<sub>eff</sub>):** Relaciona el número de fisiones por unidad de tiempo respecto al número de absorciones y de fugas por unidad de tiempo.
- **K infinito (K<sub>inf</sub>):** Relaciona el número de fisiones por unidad de tiempo respecto al número de absorciones por unidad de tiempo, es decir, no tiene en cuenta las fugas. Corresponde a un reactor infinito.

La relación entre los dos factores es la siguiente: [4]

$$K_{eff} = K_{inf} \cdot F$$

Siendo  $F$  el factor de no fugas, el cual oscila entre cero y uno, siendo uno para el caso de reactor infinito.

Una magnitud derivada del  $K$  es la reactividad, que expresada en pcm (porcentual mil) se relacionan mediante la siguiente expresión: [4]

$$\text{Reactividad (pcm)} = \left(1 - \frac{1}{K}\right) \cdot 100000$$

**Reactividad en exceso:**

Es el valor de reactividad que tiene el núcleo cuando se extraen todas las barras absorbentes del mismo. Es un parámetro de seguridad e indica la flexibilidad del núcleo para realizar diferentes experiencias al introducir materiales absorbentes.

**Margen de apagado:**

Es el valor de reactividad negativa (antirreactividad) que se introduce al insertar todas las barras de control y seguridad en el núcleo. Es un parámetro relevante para la seguridad y la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) exige un mínimo de 3000 pcm. [5] [6].

**Margen de apagado con falla única:**

Es el valor de antirreactividad del núcleo cuando se insertan todos los bancos de seguridad y control, solo dejando afuera el de mayor peso. La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) exige un mínimo de 1000 pcm. [5]

**Coefficientes de reactividad:**

Indican cuánto varía la reactividad cuando se varía algún parámetro del reactor como temperatura del combustible o refrigerante.

Los principales son:

- Coeficiente de reactividad por temperatura del refrigerante ( $\alpha_{T_{\text{refr}}}$ ).
- Coeficiente de reactividad por temperatura del combustible ( $\alpha_{T_{\text{comb}}}$ ).

Por razones de seguridad, es conveniente que ambos coeficientes sean negativos.

### 1.3 Glosario:

**Pitch:** Distancia entre dos centros de barras combustibles o absorbentes en un arreglo.

**Pin:** Barra combustible o absorbente.

### 1.4 Cálculo de Celda

Una celda es un conjunto de elementos que representa parte del núcleo de un reactor. El objetivo de un cálculo de celda es obtener las secciones eficaces macroscópicas de una zona homogenizada para luego poder utilizarlas en el cálculo del núcleo, manteniendo los ritmos de reacción.

El cálculo de la celda se realiza a través de un programa que utiliza una biblioteca de secciones eficaces con una relativamente alta discretización en energía. El programa se encarga de homogenizar los materiales que la constituyen, y obtiene la sección eficaz de la celda homogenizada y condensada a un determinado número de grupos de energía menor a la cantidad de grupos iniciales.

HUEMUL[1] es un código que utiliza el método de probabilidades de colisión para resolver la ecuación de transporte neutrónico. Este método representa una solución aproximada de la ecuación integral de transporte, que se basa en calcular el flujo escalar de neutrones en un determinado lugar del espacio a partir de la contribución de los neutrones generados en el resto del sistema. Para ello se los debe afectar por la probabilidad de que alcancen la región de interés sin colisionar en el camino.

Si bien la ecuación integral representa una solución exacta de la ecuación de transporte, el método requiere suponer scattering y fuentes isotrópicas y flujo plano en cada región en que se discretiza el sistema.

Para las fronteras reflejadas del sistema impone la condición de frontera blanca, lo que introduce un error si el flujo en esa zona no es isotrópico. [12]

La representación de las celdas de geometrías unidimensionales y bidimensionales es con elementos de bordes planos o circulares y éstas pueden contener círculos con varios radios para delimitar regiones.

Utiliza las bibliotecas de secciones eficaces y grupos de energía a 69 grupos de WLUP. El programa cuenta con métodos para realizar cálculos resonantes y cadenas de decaimiento. [1]

Además de calcular secciones eficaces, también se pueden calcular otros parámetros como densidad de potencia,  $K_{inf}$ ,  $K_{eff}$  y concentraciones isotópicas por canal. [2]

El programa que se utiliza para graficar celdas bidimensionales es GENRED v1. En este se grafica la celda y mediante los elementos mencionados anteriormente se divide en regiones que se denominan celdillas. A cada celdilla se le asigna un número de canal. Un canal puede cubrir una o más celdillas. [1]

La red graficada en GENRED se corre y genera un archivo de salida con la información de la misma. Luego se genera un archivo con especificaciones materiales mediante el cual se le asignan a la celda las concentraciones de isótopos, los elementos que requieren tratamiento resonante y el tipo de frontera del sistema.

Estos dos archivos se corren con HUEMUL. Primero se corre el archivo correspondiente a la geometría, y HUEMUL guarda los datos en otro archivo denominado “maestro”, que se definió previamente en GENRED y es el que contiene toda la información del cálculo. Luego se corre el archivo correspondiente a materiales, que toma la información de la red que se guardó en el archivo “maestro” y genera una salida con los resultados requeridos.

Para realizar cálculos de quemado, en el mismo archivo de las especificaciones materiales se cargan los datos correspondientes. Se deben especificar la potencia (expresada en MW) y los pasos de quemado (expresados en MWd/t donde las toneladas son de combustible metálico). Se introducen tantos pasos de quemado como sea necesario hasta llegar al quemado deseado. HUEMUL calcula los parámetros pedidos en el estado actual del reactor en una evolución dada.

En los materiales combustibles y absorbentes de los reactores el quemado es mayor en la periferia que en el centro, lo que produce una diferencia de concentraciones isotópicas. Teniendo en cuenta que HUEMUL toma valores medios de flujo por celdillas y valores de concentración isotópica medios por canal, se debe verificar si es necesario discretizar estos representar mejor ambos perfiles. Para el caso de los absorbentes fuertes, estos presentan caminos libres chicos, por lo que este efecto se acentúa, y en general en estos casos el mallado debe ser mayor.

Para elegir la discretización se toman diferentes modelos en los que se va aumentando el número de celdillas y canales se van midiendo valores como por ejemplo reactividad. Una vez que se observa que los resultados no varían más allá

de un margen tolerable respecto al caso anterior, se toma este caso como un valor convergido.

Con relación a los pasos de quemado, también deben evaluarse distintas discretizaciones de los mismos. El procedimiento es similar al anterior, se realizan cálculos con diferentes pasos de quemado hasta observar que el aumento en la discretización no afecta a los resultados obtenidos con una discretización menor.

De esta forma se obtiene un modelo de celda discretizado en un cierto número de celdillas, canales y pasos de quemado.

Para los modelos de celda unidimensionales, los procedimientos son los mismos, pero en este caso no se utiliza GENRED v1, se cargan los datos correspondientes en la entrada que contiene las especificaciones de los materiales indicando el número de regiones y el número de canales. Las celdas unidimensionales pueden ser de geometría cilíndrica o *slab*. Esta alternativa es muy útil al momento de obtener secciones eficaces de materiales del reactor que estén fuera del núcleo.

## **1.5 Cálculo de Núcleo**

Los cálculos de núcleo se realizan por medio de programas que utilizan las secciones eficaces obtenidas en los cálculos de celda. La mayoría de estos programas utiliza el modelo de difusión[7] para resolver la ecuación de transporte neutrónico. Debido a que el modelo de difusión presenta dificultades al aplicarse en sistemas con fuertes heterogeneidades, en cercanía de fuentes localizadas o en medios muy absorbentes, se deben realizar homogeneizaciones por zonas para poder resolverlo, por este motivo se realizan los cálculos de celda descritos anteriormente.

El código PUMA[3] resuelve la ecuación de transporte en tres dimensiones mediante la aproximación de difusión multigrupo.

PUMA agrupa las celdas de cálculo en canales para los cortes transversales del reactor, y en trozos en el sentido axial.

Para realizar un movimiento de barras en PUMA, basta modificar la asignación axial de tablas para los distintos trozos definidos en el canal correspondiente.

Otro aspecto importante del código es la posibilidad de calcular secciones eficaces en función de varios parámetros.

Para calcular las secciones eficaces se interpola en tablas en función de algún parámetro como por ejemplo densidad del refrigerante o temperatura de algún material, lo que produce una variación en la sección eficaz calculada. Esta variación de secciones eficaces se traslada a PUMA mediante tablas de interpolación múltiple o tablas con superposición lineal de efectos. Cuando se le pide a PUMA calcular para algún valor de estos parámetros, este realiza una interpolación de las tablas y calcula los valores correspondientes para las secciones eficaces.

## Capítulo2: Benchmark BWR

### 2.1 Cálculo celda BWR

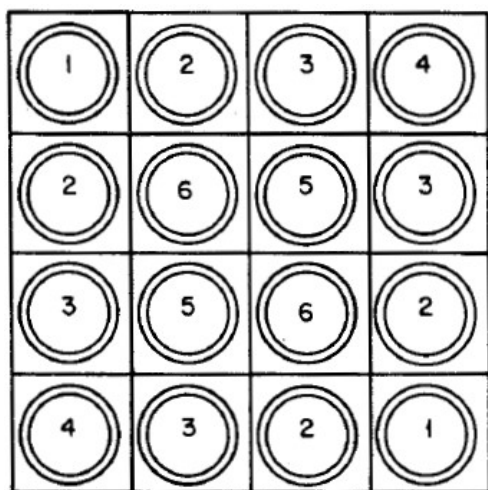
En la siguiente sección se presenta el estudio del *benchmark* de celda tipo BWR con el código HUEMUL. [8]

El mismo se realizó para dos celdas diferentes: Una con barras de  $\text{UO}_2$  y  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  como veneno quemable y otra celda solo con barras  $\text{UO}_2$ .

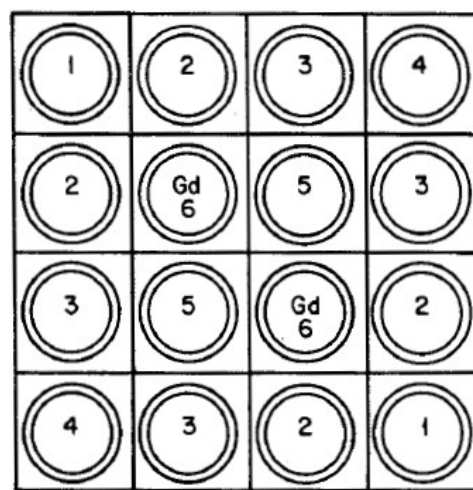
Se calcularon diferentes parámetros como variación de reactividad, concentraciones y potencias en función del quemado, y luego se los comparó con los resultados de los otros códigos que participaron en el *benchmark* para verificar la validez de los resultados calculados con HUEMUL.

#### 2.1.1 Celdas a Evaluar

En las figuras 1 y 2 se detallan los dos tipos de celdas evaluadas.



**Figura 1.** Celda sin venenos quemables (16 pines combustibles, *pitch*: 1,6 cm).



**Figura 2.** Celda con venenos quemables (14 pines combustibles y 2 pines combustibles con  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , *pitch*: 1,6 cm).

|                | Diámetro [cm] |         | Material                                                                                             | Densidad [g/cm <sup>3</sup> ] | Temperatura [°C] | Presión [bar] |
|----------------|---------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| Pin sin veneno | 1             |         | UO <sub>2</sub> 3% enriquecido                                                                       | 10                            | 600              |               |
| Pin con veneno | 1             |         | 97% en peso de UO <sub>2</sub><br>(3% enriquecido) y<br>3% en peso de Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 10                            | 600              |               |
| Vaina          | Interno       | Externo | Zircaloy-2                                                                                           | 6,55                          | 300              |               |
|                | 1             | 1,2     |                                                                                                      |                               |                  |               |
| Moderador      |               |         | H2O líquida                                                                                          | 0,74                          | 286              | 70.6          |

**Tabla 1.** Especificaciones de las celdas para ambos casos.

### 2.1.2 Modelos en HUEMUL

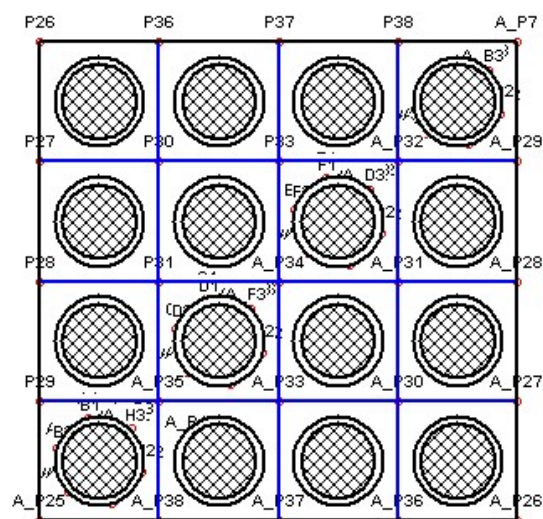
Los cálculos se realizaron hasta un valor de quemado total de 10000 MWd/t. La potencia utilizada fue de 20 W por gramo de uranio metálico (20W/gU). Para realizar el análisis de convergencia, se realizó un quemado de hasta 10000MWd/t y se observó cómo evolucionó la reactividad cada 1000MWd/t para cada modelo realizado.

El valor de  $K_{inf}$  reportado en el *benchmark* tiene el xenón en equilibrio para todos los pasos salvo el paso de quemado cero. Se tiene en cuenta esto para realizar las comparaciones con HUEMUL.

#### 2.1.2.1 Caso sin veneno quemable

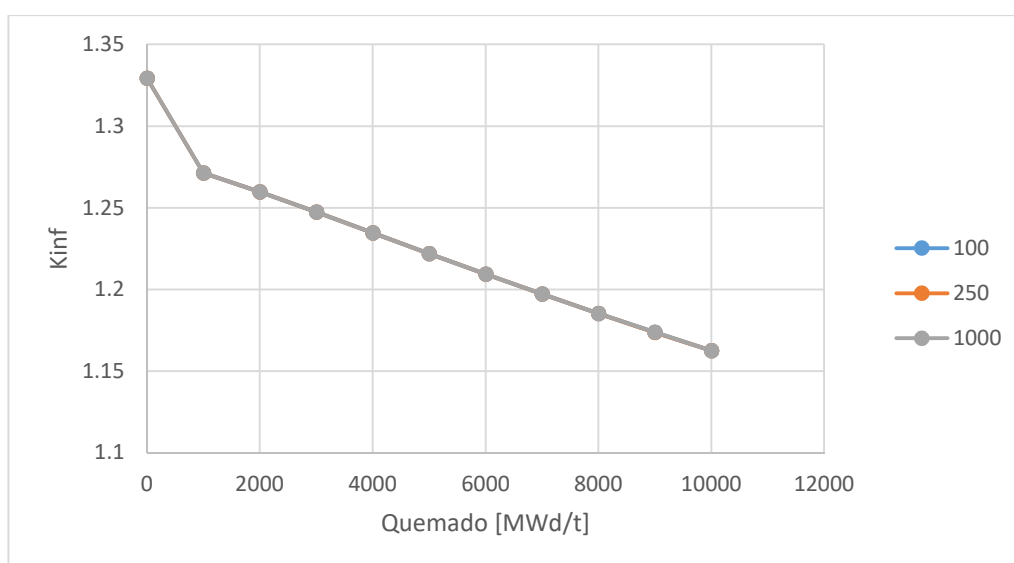
Cuando se realizó el análisis de discretización, se comenzó dividiendo los pines en dos radios y se observó que los resultados no variaban respecto al caso sin subdivisiones, por lo que se tomó esta celda como modelo geométrico.

El modelo de celda se observa en la figura 3.



**Figura 3.** Modelo de celda sin veneno.

En la figura 4 se observan los resultados del análisis en la discretización de los pasos de quemado.



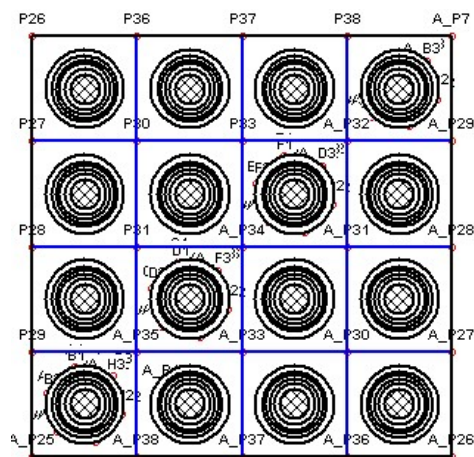
**Figura 4.** Variación de  $K_{inf}$  con quemado tomando diferentes pasos de quemado para celda sin veneno.

Se observa que la variación de  $K_{inf}$  para diferentes pasos de quemado es mínima, por lo que no fue necesario continuar discretizando.

Se determinó que la celda a utilizar era sin subdividir los pines y con pasos de quemado de 1000 MWd/t.

### 2.1.2.2 Caso con veneno quemables

Se realizó el análisis de convergencia geométrica y se observó que para el caso del pin discretizado en 5 radios, los resultados presentaban una diferencia menor respecto al caso anterior, por lo que se decidió no seguir discretizando. La celda seleccionada es la que se observa en la figura 5.

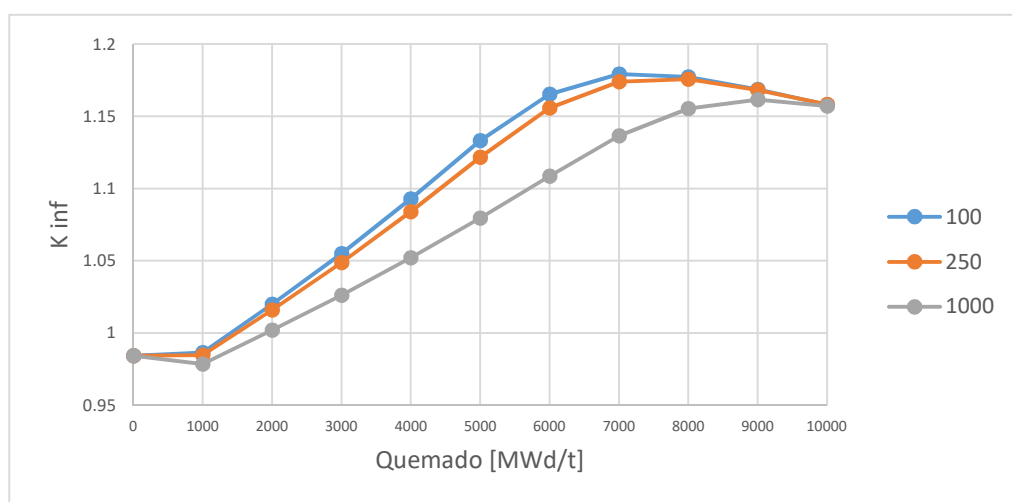


**Figura 5.** Modelo de celda con veneno.

Si bien en este caso ha sido necesario realizar una mayor discretización geométrica debido a la presencia de los pines con veneno, probablemente hubiera sido suficiente subdividir solamente los pines con veneno, ya que en el caso anterior se demostró que no hacía falta discretizar los pines combustibles.

Sin embargo, al momento de realizar el modelo resultó más sencillo realizarlo para todos los pines juntos y el tiempo de procesamiento al momento de realizar los cálculos no fue inconveniente, por lo que se optó por realizarlo de este modo.

La discretización de los pasos de quemado utilizados en HUEMUL se observa en la figura 6.



**Figura 6.** Variación de  $K_{inf}$  con quemado utilizando diferentes pasos de quemado para celda con veneno.

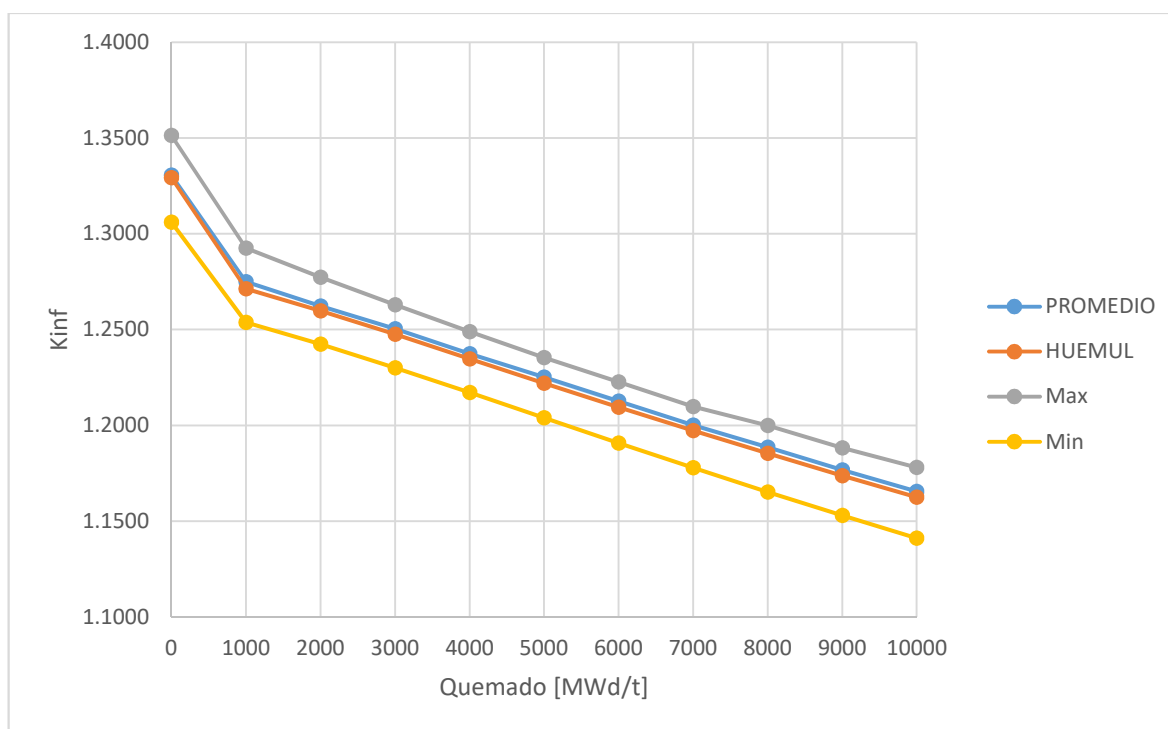
Como se observa en la figura 6, la diferencia de los resultados entre pasos de 250 MWd/t y 100 MWd/t no presentó diferencias considerables, por lo que se tomó a este último como paso de quemado a utilizar en HUEMUL.

El modelo seleccionado para este caso fue con los pines subdivididos en 5 radios y pasos de quemado de 100MWd/t. A modo de ejemplo en el anexo 1 se observa el *input* especificaciones materiales y tratamientos resonantes correspondientes a este modelo.

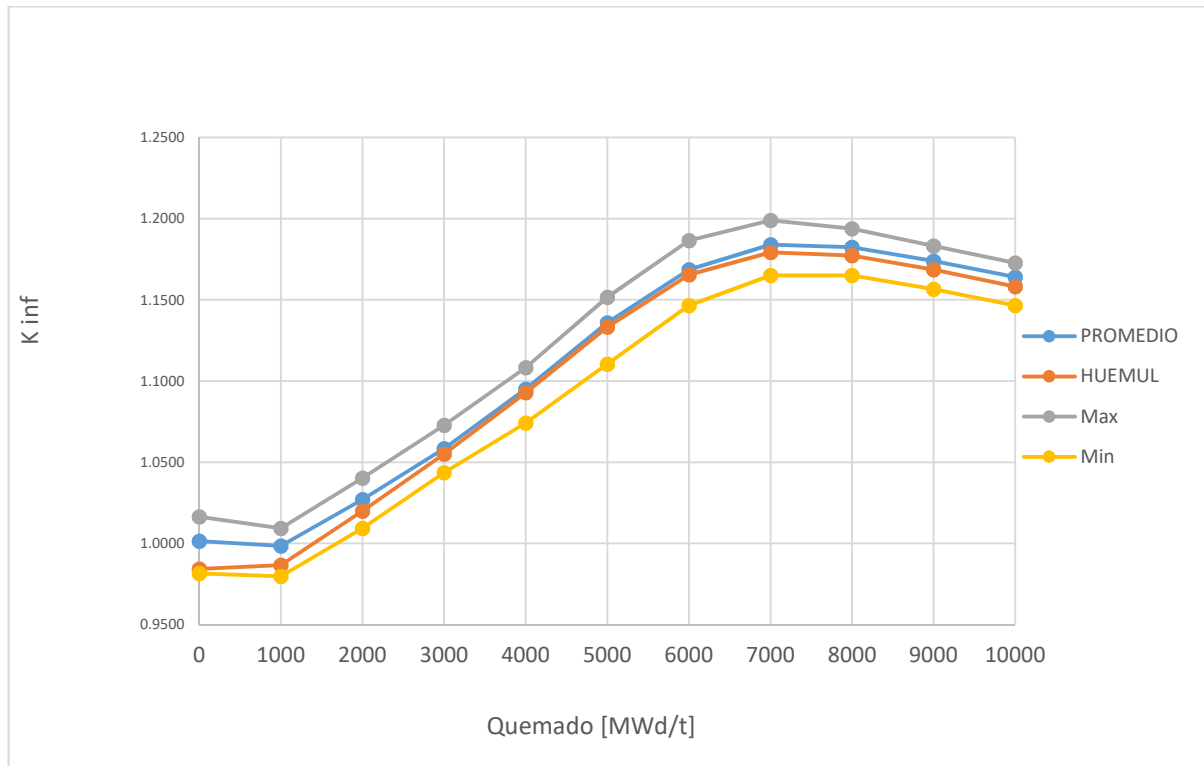
### 2.1.3 Resultados

Con el objetivo de verificar si los resultados calculados con HUEMUL entraban dentro de la dispersión de los otros códigos, se graficaron los máximos, mínimos y el promedio de los resultados de los códigos utilizados en el *benchmark*, y se los comparó con los valores obtenidos con HUEMUL.

#### 2.1.3.1 Reactividad en función del quemado



**Figura 7.** Variación de  $K_{inf}$  respecto del quemado para celda sin veneno.



**Figura 8.** Variación de  $K_{inf}$  respecto del quemado para celda con veneno.

Para la celda con veneno, se observa que la reactividad aumenta en función del quemado. Esto se debe a la presencia de los venenos, ya que a medida que se van quemando, implica desaparición de absorbente, por lo que el núcleo se vuelve más reactivo. Se llegó a un punto donde la reactividad comenzó a caer, esto se debe a que ya se quemó la mayor parte del veneno y comienza a tomar más importancia el quemado de combustible, por lo que la reactividad comienza a caer.

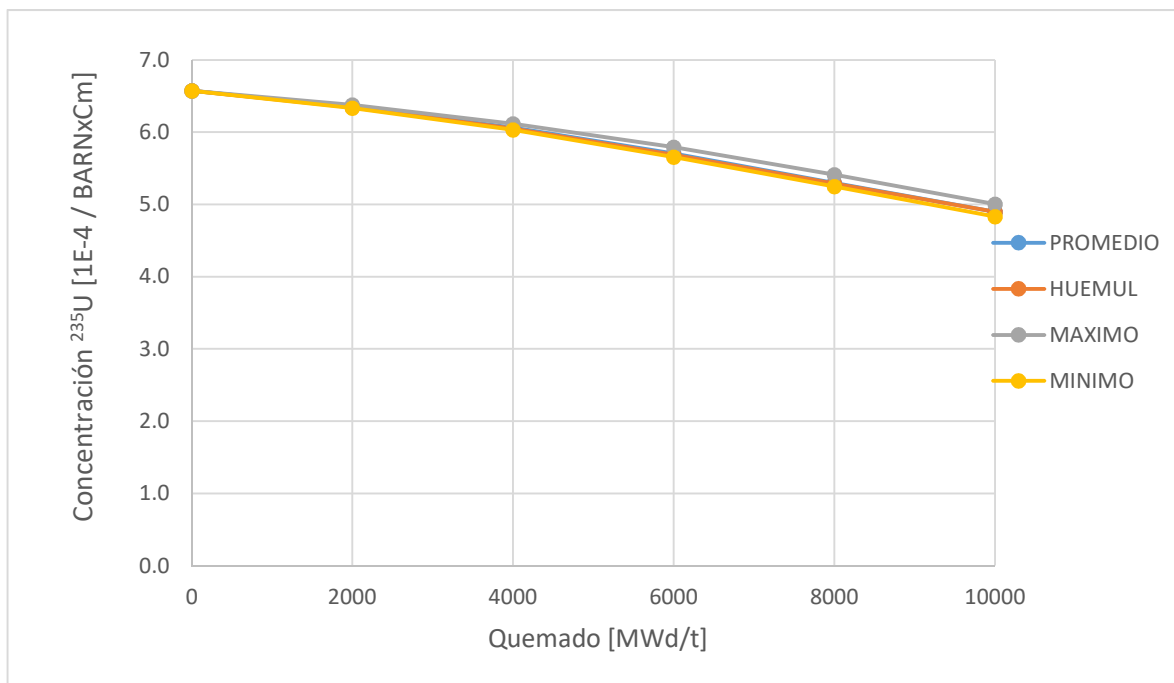
### **2.1.3.2 Concentraciones**

Para el caso sin veneno se calcularon valores promedio de la celda, mientras que para el caso con veneno se calcularon solo para los pines con veneno.

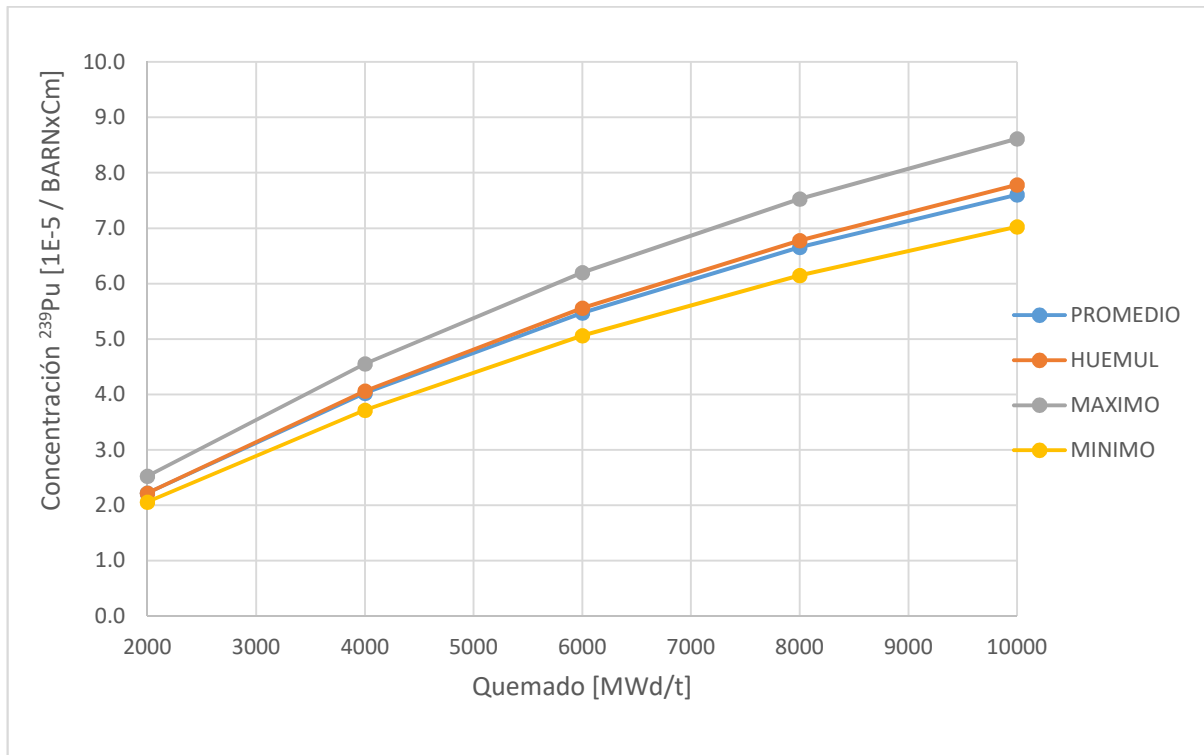
La unidad de concentración es en número de átomos sobre unidad de volumen, y se calculó cada 2000 MWd/t, hasta un total de 10000 MWd/t.



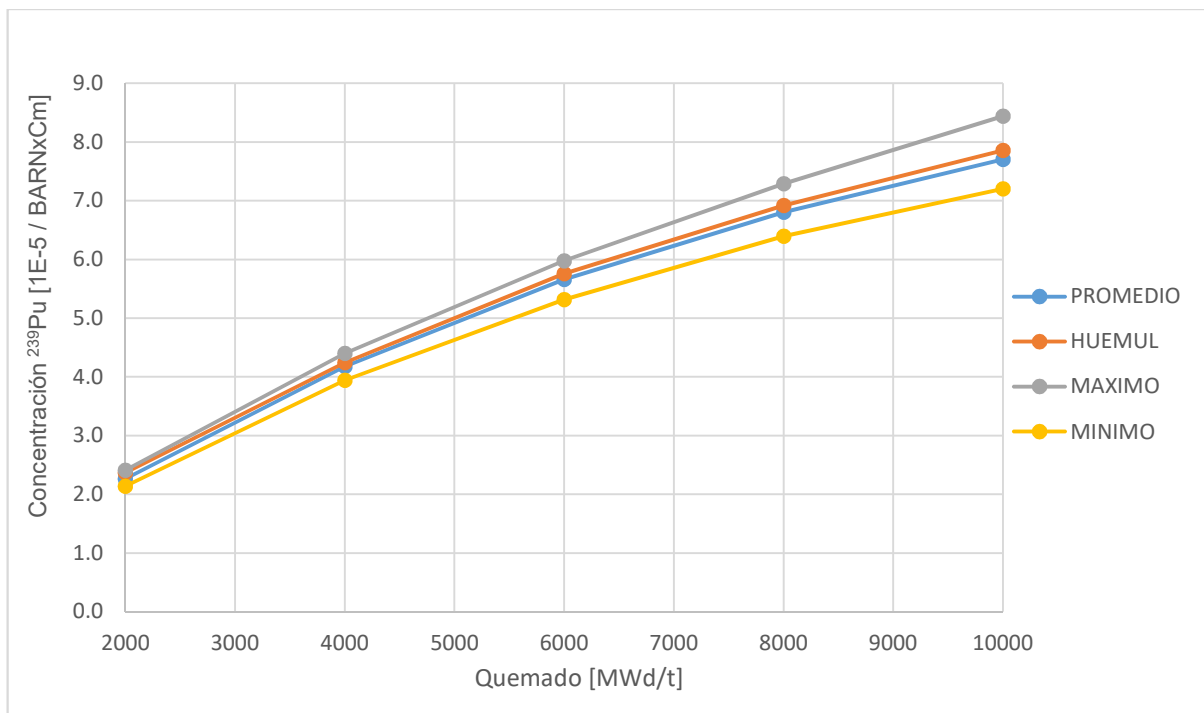
**Figura 9.** Variación de la concentración de  $^{235}\text{U}$  en función del quemado en la celda sin veneno. Valor promedio de la celda.



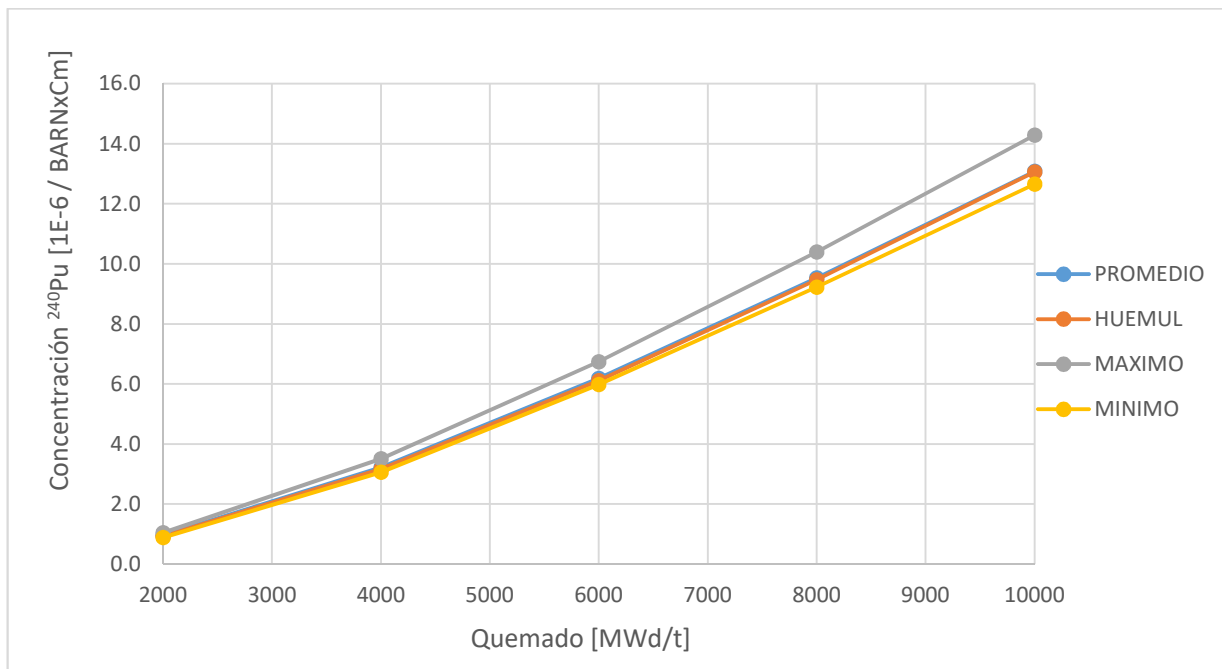
**Figura 10.** Variación de la concentración de  $^{235}\text{U}$  en función del quemado en la celda con veneno. Evaluada en el pin con veneno.



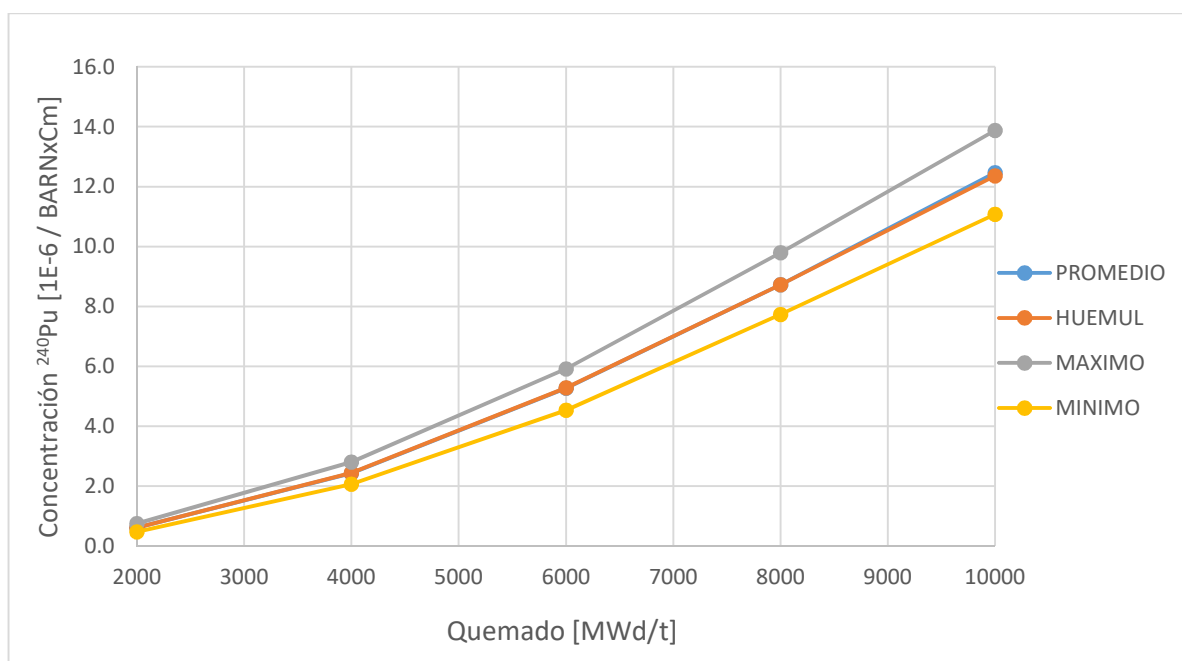
**Figura 11.** Variación de la concentración de  $^{239}\text{Pu}$  en función del quemado en la celda sin veneno. Valor promedio de la celda.



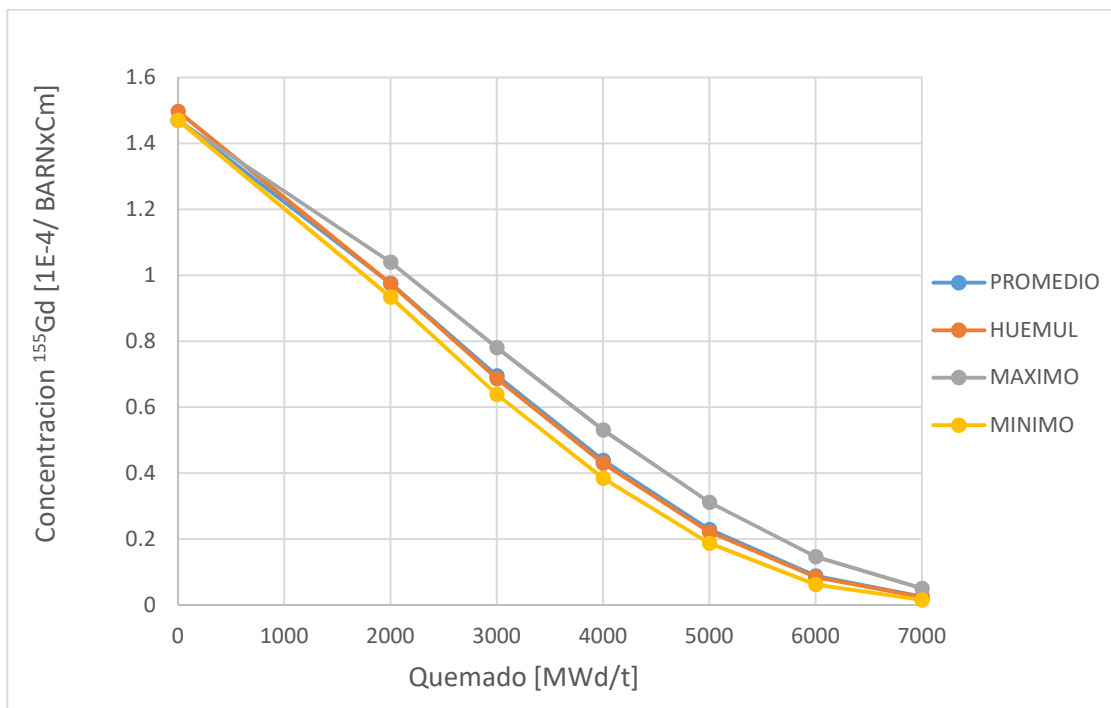
**Figure 12.** Variación de la concentración de  $^{239}\text{Pu}$  en función del quemado en la celda con veneno. Evaluada en el pin con veneno.



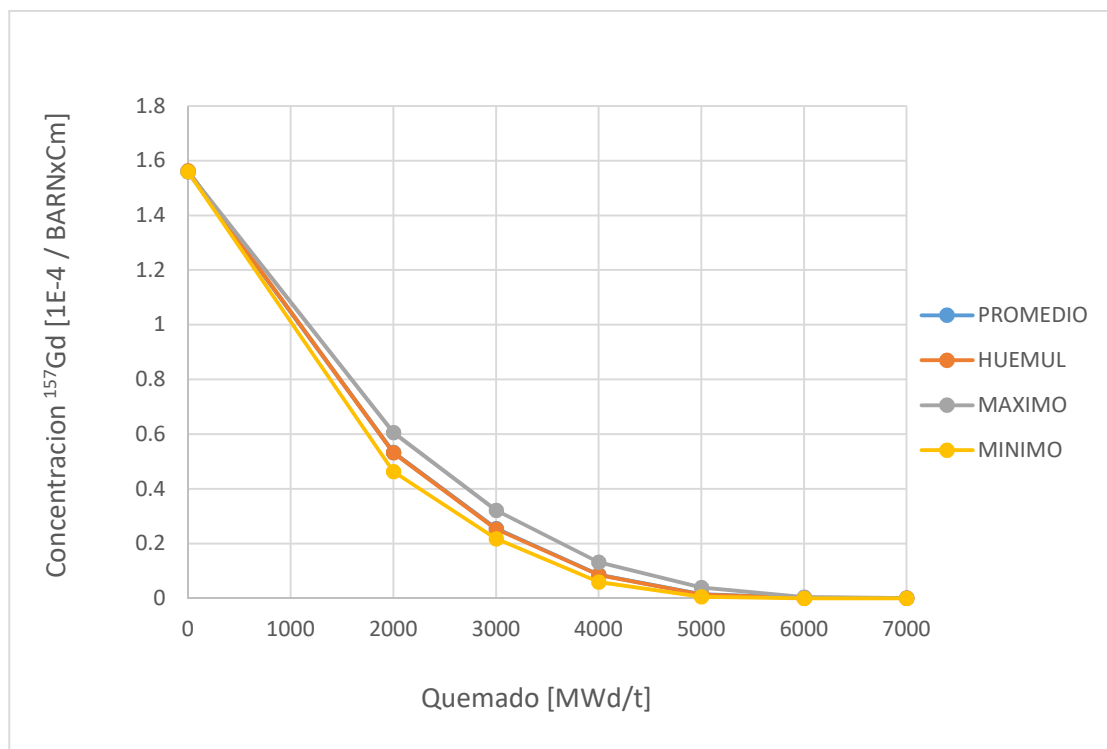
**Figura 13.** Variación de la concentración de  $^{240}\text{Pu}$  en función del quemado en la celda sin veneno. Valor promedio de la celda.



**Figura 14.** Variación de la concentración de  $^{240}\text{Pu}$  en función del quemado en la celda con veneno. Evaluada en el pin con veneno.



**Figura 15.** Variación de la concentración de  $^{155}\text{Gd}$  en función del quemado. Evaluado en el pin con veneno.

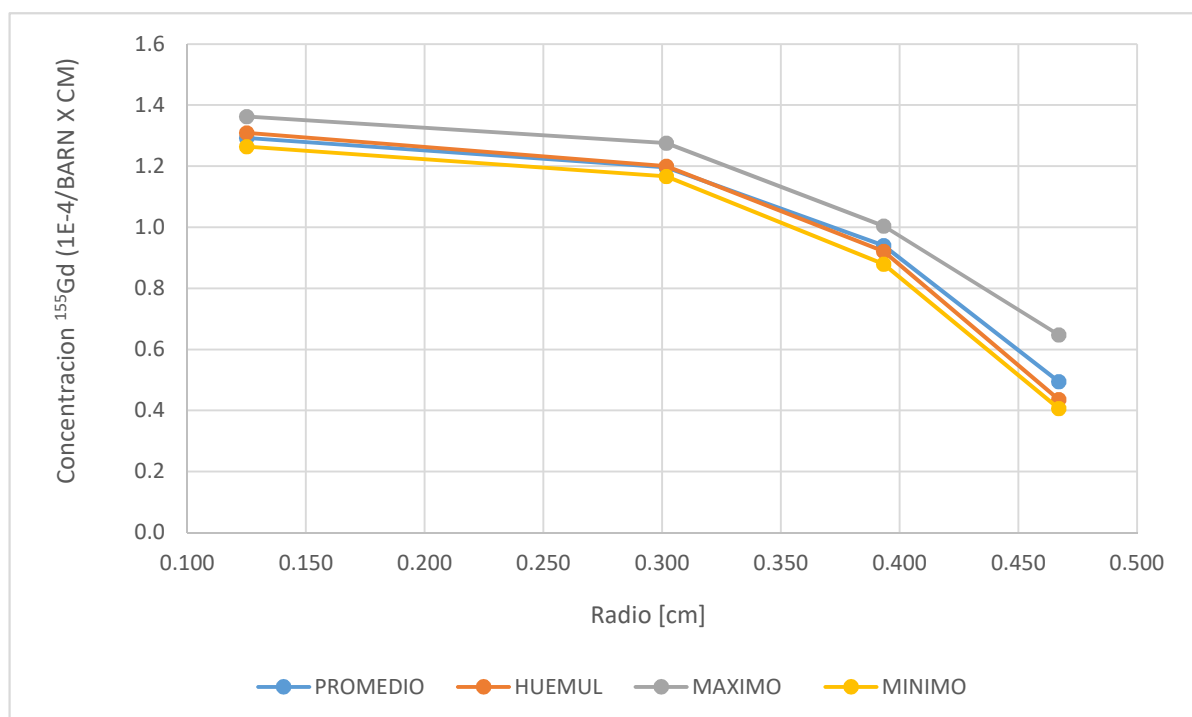


**Figura 16.** Variación de la concentración de  $^{157}\text{Gd}$  en función del quemado. Evaluado en pin con veneno.

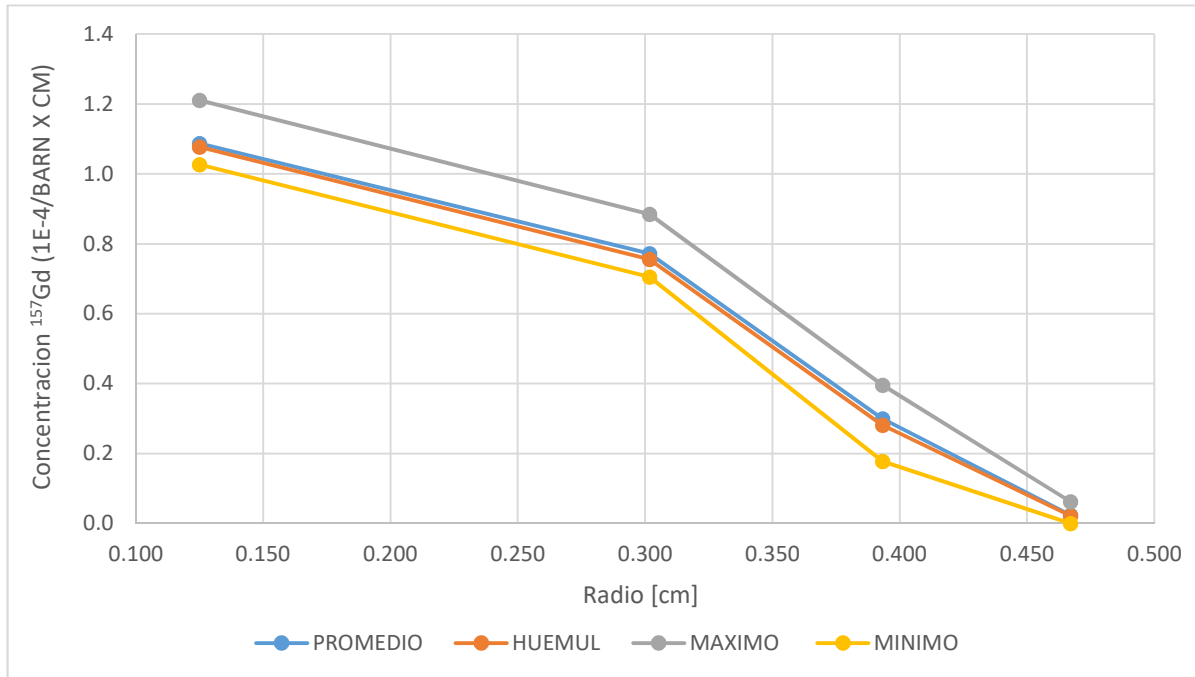
### 2.1.3.3 Perfil de concentración de $^{155}\text{Gd}$ y $^{157}\text{Gd}$ en los pines con veneno

Se analizó cuál era la variación de  $^{155}\text{Gd}$  y  $^{157}\text{Gd}$  en función del radio en los pines con Veneno para un valor de quemado de 2000 MWd/t. El *benchmark* reportaba valores para cuatro valores de radios. Dado que el modelo seleccionado se discretizó en cinco anillos a los cuales se le asignó un valor de canal a cada uno, las concentraciones que se obtuvieron en HUEMUL fueron para cinco radios, por lo que se realizó una interpolación lineal entre cada par de datos para obtener las mismas en cuatro radios.

Los resultados se observan en las figuras 17 y 18.



**Figura 17.** Concentración de  $^{155}\text{Gd}$  en función del radio para el pin con veneno.



**Figura 18.** Concentración de  $^{157}\text{Gd}$  en función del radio para el pin con veneno

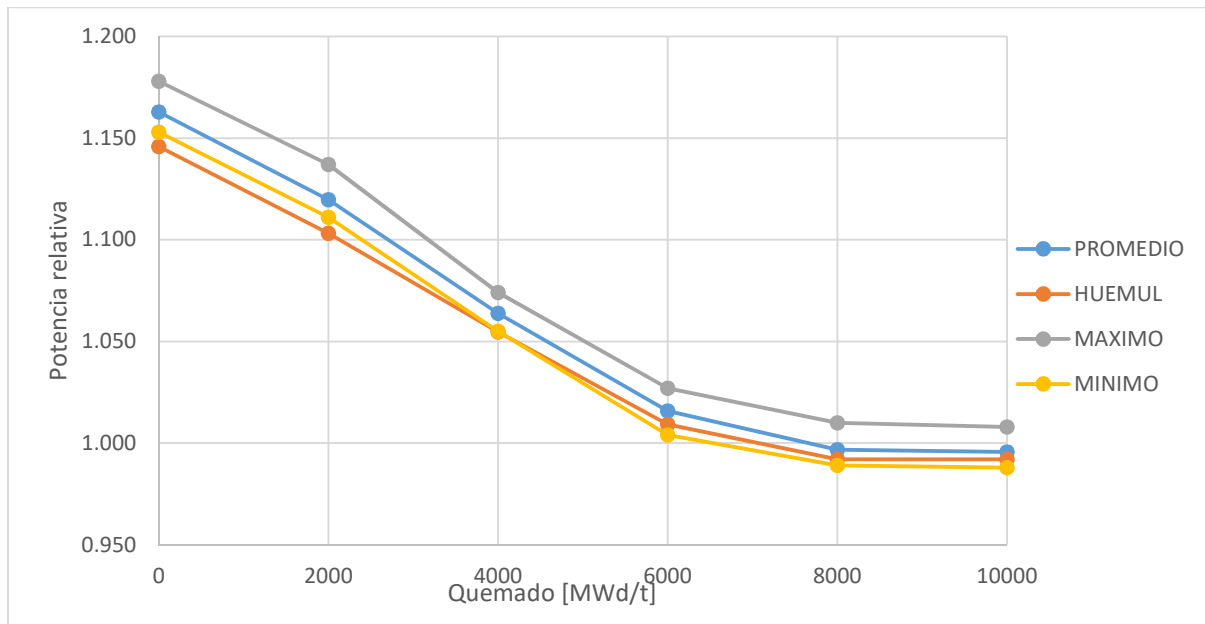
Tal como se muestra en las gráficas anteriores, los resultados obtenidos con HUEMUL están dentro de la dispersión de los resultados de los códigos utilizados en el Benchmark.

En la figura 15 se observa que la concentración inicial de  $^{155}\text{Gd}$  presentó una diferencia respecto a los valores utilizados por los otros códigos.

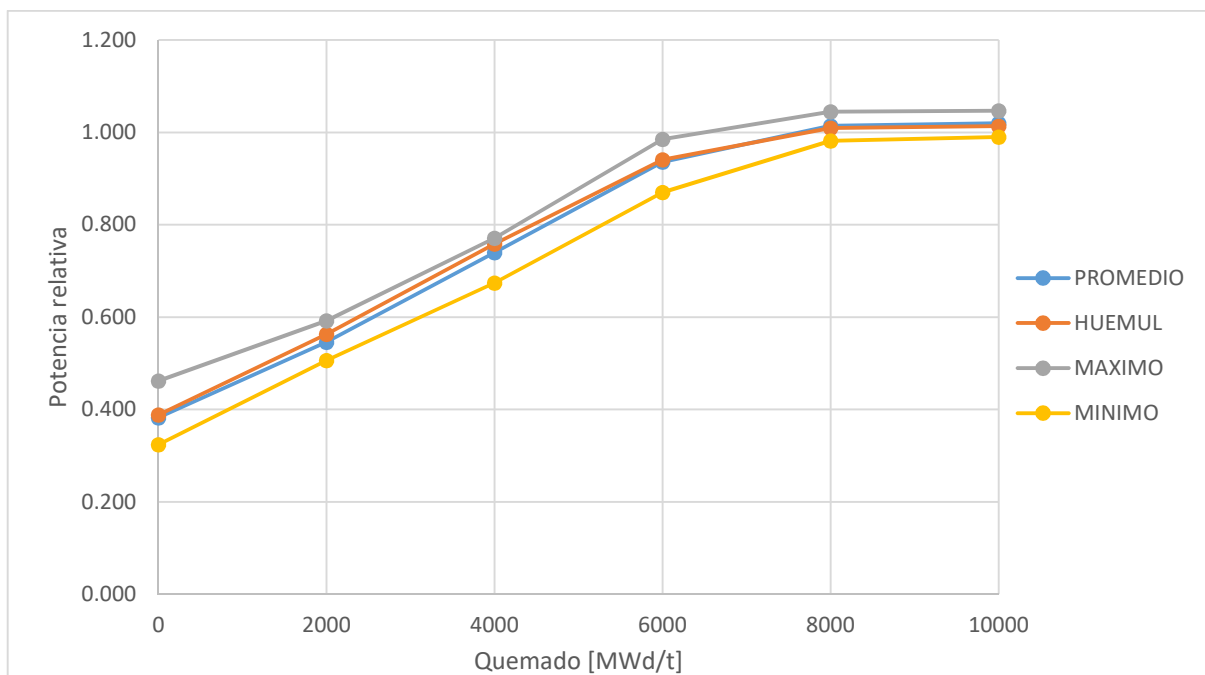
#### **2.1.3.4 Potencia**

La potencia reportada es una potencia relativa, es decir, la potencia en el pin por unidad de masa de uranio metálico, dividido la potencia total sobre unidad de masa de uranio metálico total. Sin embargo, se pueden obtener los mismos resultados utilizando los volúmenes en vez de las masas de U metálico, tal como se realizó en este caso.

Para el caso de la celda sin veneno la potencia se calculó en el pin cuatro, mientras que para el caso con veneno se calcula en el pin con  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ .



**Figura 19.** Potencia en función del quemado para celda sin veneno. Evaluada en el pin 4.



**Figura 20.** Potencia en función del quemado para celda con veneno. Evaluada en el pin con veneno.

Se observa que si bien el cálculo con HUEMUL para el caso de celda sin veneno no está entre los valores máximos y mínimos del *benchmark*, la mayor diferencia se observa para un valor de quemado de 2000 MWd/t, y esta diferencia es menor al 1%, por lo que se puede tomar como un valor aceptable.

## 2.2 Cálculos IPEN/MB-01

### 2.2.1 Descripción del Reactor

El reactor experimental IPEN/MB-01 ubicado en San Pablo, Brasil, es una facilidad crítica especialmente diseñada para medir una amplia gama de parámetros y ser utilizado para *benchmarks*.

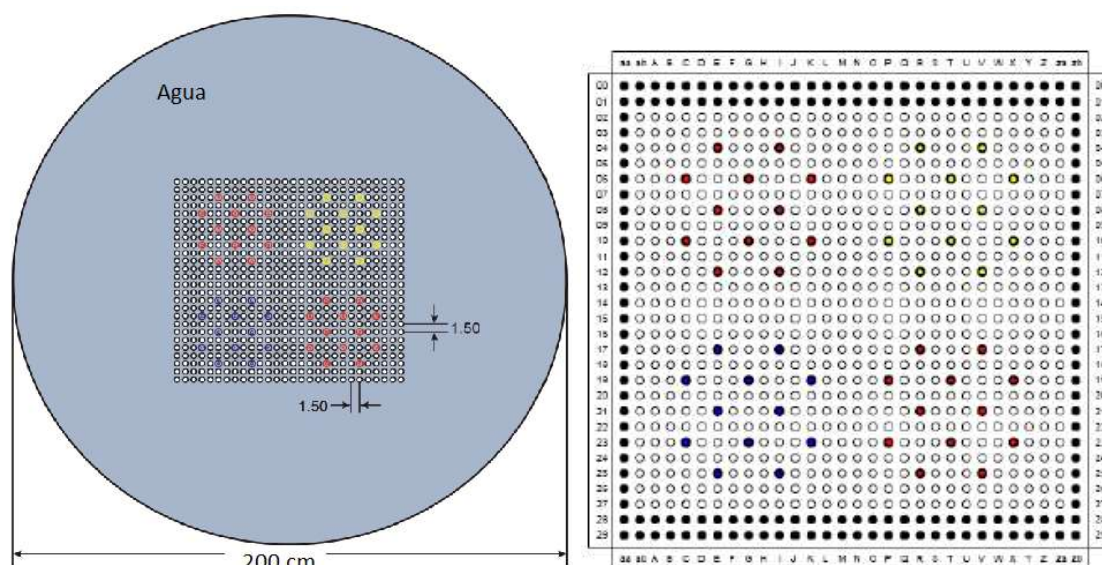
El núcleo del reactor es un arreglo rectangular de 26x28 pines de los cuales 48 son tubos guías para las barras de seguridad y control, y el resto es combustible de  $\text{UO}_2$  con un enriquecimiento de 4,34% en peso. El núcleo se encuentra inmerso en un tanque reflector de  $\text{H}_2\text{O}$  de 200 cm de diámetro y 160 cm altura, la columna de agua por encima del núcleo es de 60 cm. La distancia entre pines combustibles es de 1,5 cm. El reactor cuenta con dos bancos de barras de control de Ag-In-Cd, y dos bancos de barras de seguridad de  $\text{B}_4\text{C}$ , cada banco contiene 12 barras. Los tubos guías de los bancos de control y seguridad se encuentran llenos de agua cuando no están ocupados por estos.

En operación normal, sin que se esté evaluando ningún experimento, los bancos de seguridad se encuentran 100% extraídos, mientras que la posición crítica de los bancos en operación normal es de 58% extraídos para ambos. El reactor puede operar con una potencia máxima de 100W.

El núcleo cuenta con espacios disponibles en la periferia para agregar mayor número de pines, estos espacios se encuentran cubiertos por agua.

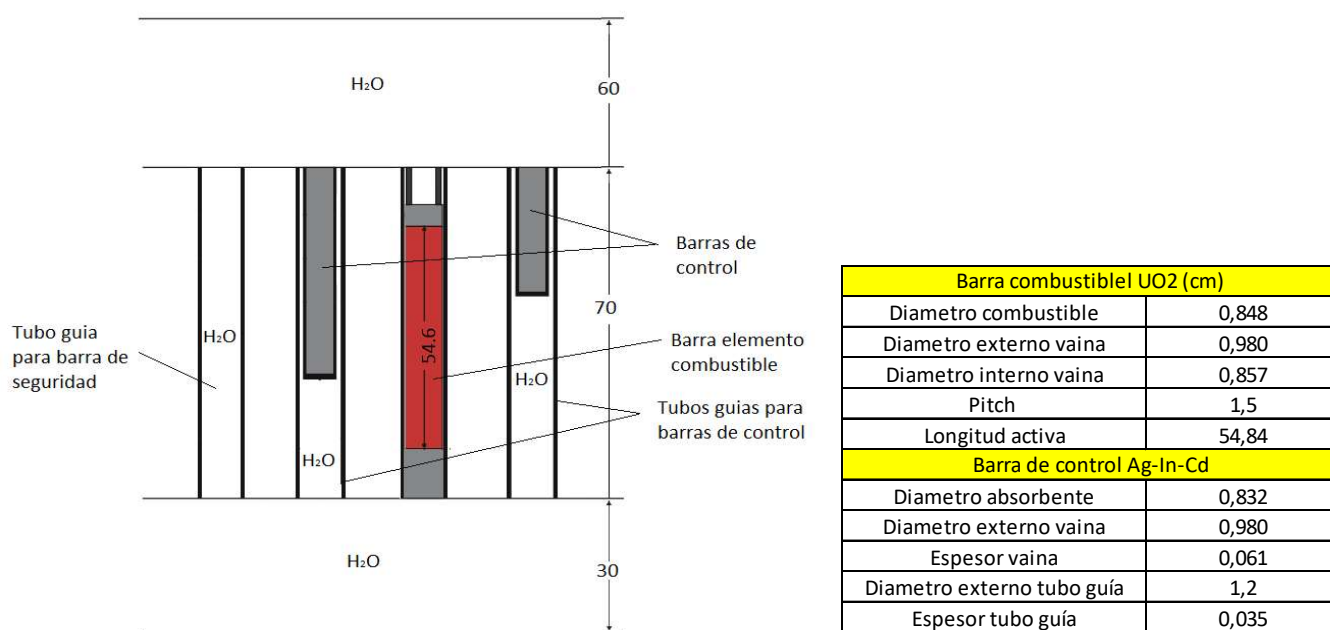
Una de las características más importantes es la posibilidad de quitar y cambiar de lugar los pines combustibles. Esto permite una amplia variedad de geometrías del núcleo. Esto, junto a otras características, lo hace muy versátil respecto a las experiencias a realizar.

En las figuras 21 y 22 se encuentran los esquemas del reactor, mientras que en la tabla 1 se encuentran las características geométricas de los pines y la composición material.



**Figura 21.** Esquema de un corte transversal del reactor y del núcleo.

En la figura 21 los pines en blanco corresponden a las barras de elemento combustible. Los espacios en negro corresponden a los lugares periféricos que permiten el agregado de nuevos pines. Los pines azules y amarillos (cuadrante superior derecho e inferior izquierdo) corresponden a los bancos de control. Los pines rojos (cuadrante superior izquierdo e inferior derecho) corresponden a los bancos de seguridad.

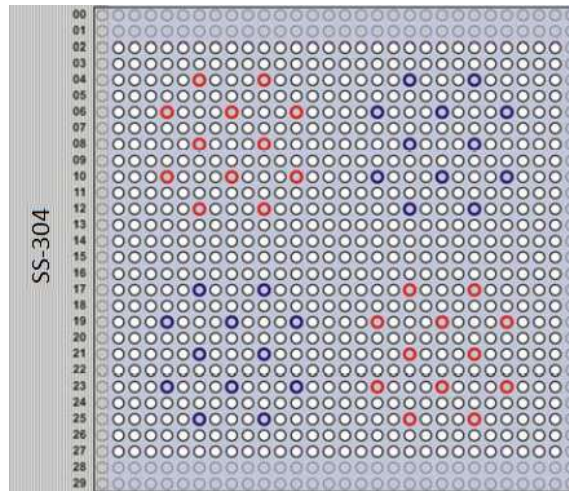


**Figura 22.** Tabla con dimensiones de barras de control y corte longitudinal del reactor. En el mismo se observan las barras de control, barras de seguridad y elemento combustible. Las distancias están en centímetros.

En la figura 22 se observa un corte longitudinal del núcleo donde se observan las barras de control y seguridad, y una tabla con las especificaciones geométricas de dichas barras. En el anexo 8 se encuentra la tabla con los isótopos y concentraciones de los materiales del núcleo.

El primer experimento[9] consistió en agregar placas de SS-304 de 3 mm de espesor en el lado izquierdo del núcleo. Las dimensiones de las placas cubrían la zona activa del núcleo y se fueron agregando hasta completar un espesor de 9,6 cm, producto de 32 placas. La distancia entre las placas y la primera hilera de pines fue de 5,5 cm. Durante toda la experiencia, tanto la temperatura del agua moderadora como reflectora se mantuvieron en 20°C. Se calculó la reactividad en función de las placas y se las comparó con los resultados experimentales. Luego se comparó la posición crítica de los bancos de control en función con los resultados de los otros códigos que participaron en el experimento.

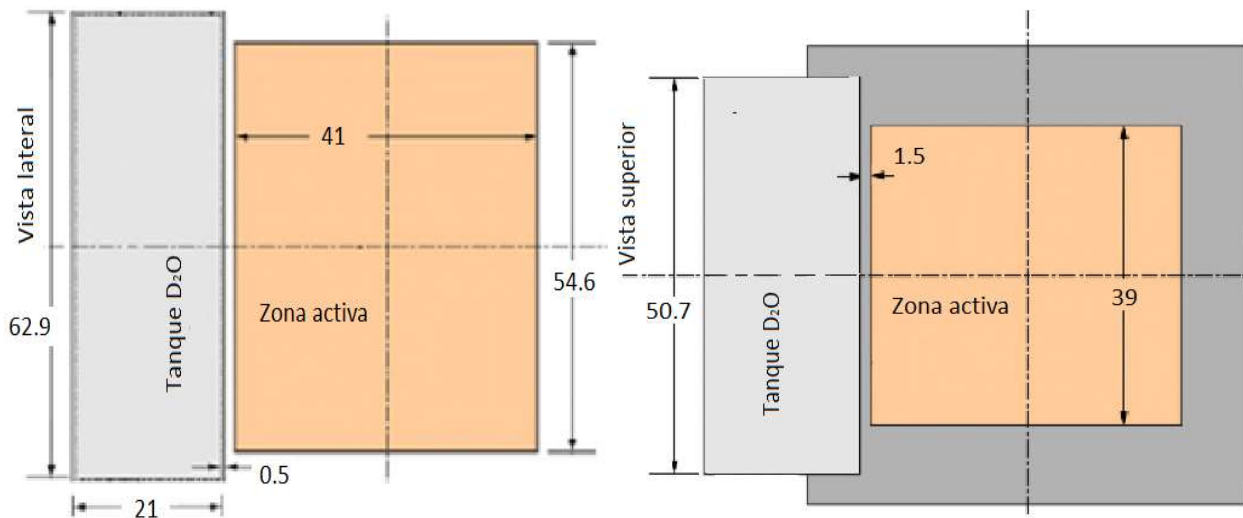
A modo ilustrativo, en la figura 23 se representa el caso con las 32 placas insertadas.



**Figura 23.** Núcleo con placas de SS-304. Caso final con las 32 placas insertadas.

El segundo experimento[10] consistió en colocar un tanque de D<sub>2</sub>O en la zona reflectora del reactor. El tanque tenía una altura de 62,9 cm, un espesor de 21 cm y 50,7 cm de ancho. El material era Aluminio 5052 de 0,5 cm de espesor. Se ubicó de forma centrada con la parte activa del núcleo y la distancia al lado más cercano al núcleo era de 1,5 cm. La temperatura del D<sub>2</sub>O, al igual que el agua moderadora y reflectora fue de 20°C. La densidad del D<sub>2</sub>O a esta temperatura es 1,1 g/cm<sup>3</sup>.

La configuración del experimento es el que se observa en la figura 24.



**Figura 24.** Vista lateral y superior de la configuración del experimento. Todas las medidas están en cm.

## 2.2.2 Modelo de Celda

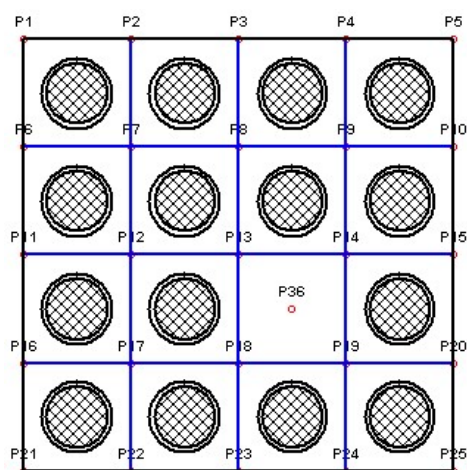
### 2.2.2.1 Celda combustible y combustible-barra de control

Como se mencionó anteriormente, el reactor opera con los dos bancos de seguridad 100% extraídos. Los tubos guías correspondientes a estos bancos se encuentran llenos de agua. Teniendo en cuenta esto, se consideró el núcleo dividido en cuatro cuadrantes con propiedades homogéneas y se tomaron dos modelos de celdas: uno solamente con barras combustibles correspondientes a los cuadrantes con los bancos de seguridad extraídos; y otro con barras de control y barras combustibles, correspondiente a los cuadrantes con barras de control. Los tubos guías correspondientes a los bancos de seguridad. En el modelo de celda correspondiente a elementos combustibles no se tuvieron en cuenta los tubos guías, ya que se evaluó el error asociado a esta simplificación y se consideró dentro del error de cálculo.

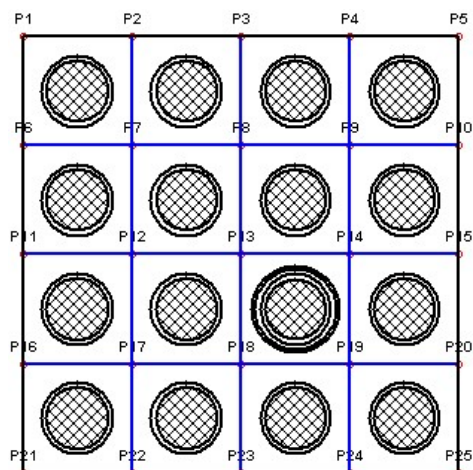
Los modelos de celda se realizaron teniendo en cuenta correcciones en las densidades de los materiales que componen la celda para que estas sean representativas del cuadrante correspondiente. Estas se realizaron para el elemento combustible, barras de control y agua, teniendo la precaución de solo realizar variaciones mínimas en la densidad de las barras de control. Las vainas y tubos guías no se tuvieron en cuenta, ya que se verificó que un pequeño cambio de densidad no afecta considerablemente el resultado de los cálculos. Estos valores se encuentran en los archivos de entrada de HUEMUL materiales correspondientes en el anexo 2 y 3.

Dado que no se realizaron cálculos de quemado, no se realizaron subdivisiones en los pines.

Los modelos realizados se observan en las figuras 25 y 26.



**Figura 25.** Celda correspondiente al cuadrante con barras combustibles. El espacio en blanco corresponde al tubo guía lleno con agua.



**Figura 26.** Celda correspondiente al cuadrante con barras de control.

### **2.2.2.2 Agua cercana, agua lejana, agua pesada y SS-304**

Debido a la variación en el espectro en la interfaz núcleo-reflector, cuando se modela el reactor el agua reflectora se debe dividir en agua lejana y agua cerca, siendo esta última la que corresponde a la zona de interfaz.

Las secciones eficaces deben condensarse separadamente en HUEMUL. El espesor de agua cercana en el modelo del reactor debe coincidir con el utilizado en el modelo de PUMA. Para encontrar el espesor adecuado se realizó una prueba con un modelo unidimensional en HUEMUL.

Se realizó un núcleo homogéneo, un radio correspondiente al agua cercana y un radio correspondiente al agua lejana. Se realizaron cálculos para diferentes espesores de agua cercana y se condensaron las secciones eficaces. Estos se utilizaron en PUMA para calcular la reactividad, cuando se observó que los resultados no presentaban una diferencia considerable respecto al caso anterior, se tomó ese espesor para utilizar en PUMA. El modelo quedó definido con un núcleo homogenizado de 22,83 cm de radio, un espesor de agua cercana de 10 cm y un espesor de agua lejana de 67,7 cm. Se realizó un análisis de convergencia hasta 22 regiones, de las cuales 11 regiones corresponden al núcleo, 7 al agua cercana y 4 al agua lejana. De este modelo se obtuvieron las secciones eficaces para dichas aguas.

Para obtener las secciones eficaces del SS-304 se realizó otro modelo con núcleo homogenizado con un radio de 22,83 cm dividido en 15 regiones, un espesor de SS-304 de 5 cm y 4 regiones y un espesor agua lejana de 72,16 cm y 3 regiones.

Para el caso de D<sub>2</sub>O, el núcleo tiene la misma discretización que para el caso de agua cercana y agua lejana, el espesor de agua pesada fue de 21 cm y se discretizó en 15 radios y el espesor de agua lejana fue de 55,72 cm discretizándolo en 4 regiones.

A modo de ejemplo en anexo 4 se adjunta el archivo de entrada de HUEMUL correspondiente al agua cercana y agua lejana.

### **2.2.3 Modelo de Núcleo**

Para poder realizar el mallado en coordenadas **X-Y-Z**, el tanque reflector se modeló de forma rectangular conservando el área. El modelado se realizó considerando el espesor total de placas de SS-304 (32 placas). El agua reflectora se separó en agua cercana y agua lejana. Se realizó el mallado teniendo en cuenta que la importancia del flujo en la zona correspondiente al agua lejana era menor que en el núcleo y en el agua cercana, de forma que el número de regiones fue mayor para el núcleo y el agua cercana, mientras que para el agua lejana se tomó una menor discretización siendo la mínima para la región más alejada del núcleo (periferia del tanque reflector).

El mallado se fue discretizado hasta que la diferencia entre los últimos dos casos arrojaron valores de reactividad con una diferencia del orden de 200 pcm, tomando este último como el modelo a utilizar.

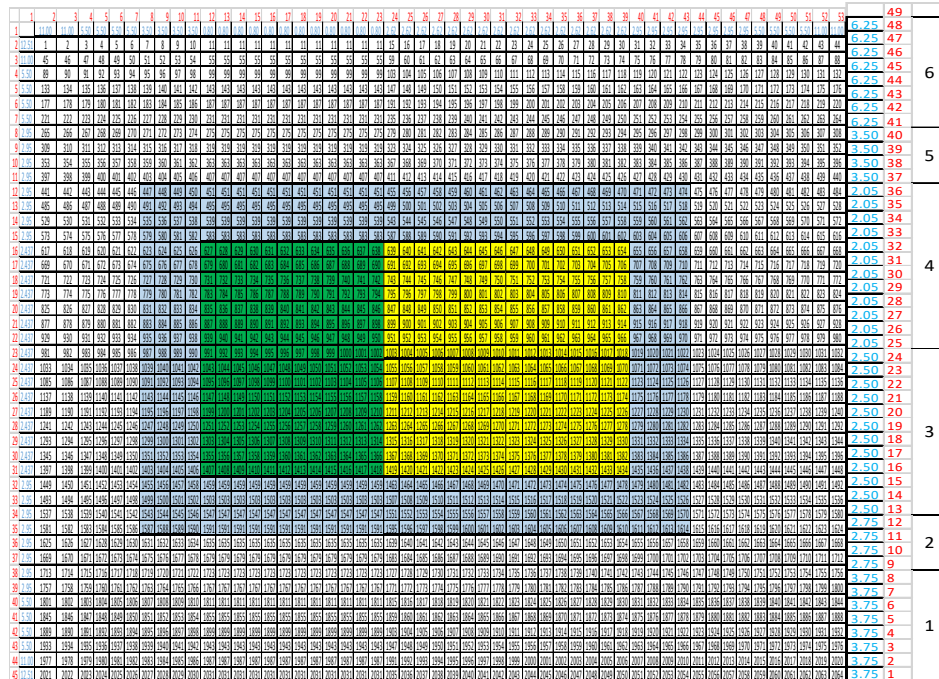
La geometría quedó definida de la siguiente forma:

- 53 planos en el eje **X**
- 45 planos en la dirección **Y**

- 49 planos en la dirección **Z**

Quedaron definidas 2064 regiones y 48 segmentos. Se tomaron 10 canales de los cuales 4 corresponden al núcleo, y 6 trozos de los cuales 2 pertenecen al núcleo. Los cálculos se realizaron a 2 grupos de energía.

El esquema del modelo de núcleo seleccionado se muestra en la figura 27.



**Figura 27.** Representación del reactor con placas modelado en PUMA. Se observa la discretización en el plano X-Y y en el eje Z. Se observan los diferentes canales correspondientes a núcleo (amarillo), placas de SS-304 (verde), agua cercana (celeste) y agua lejana (blanco).

Para el segundo experimento (sin placas de SS-304 y con tanque de D<sub>2</sub>O en el reflector), la sección eficaz que se tomó para el agua lejana en PUMA fue la misma que para el primer experimento, es decir, la que se obtuvo de los modelos de celda unidimensionales sin considerar el agua pesada (núcleo, agua cercana y agua lejana). Se corroboró que esta aproximación no implicó error apreciable.

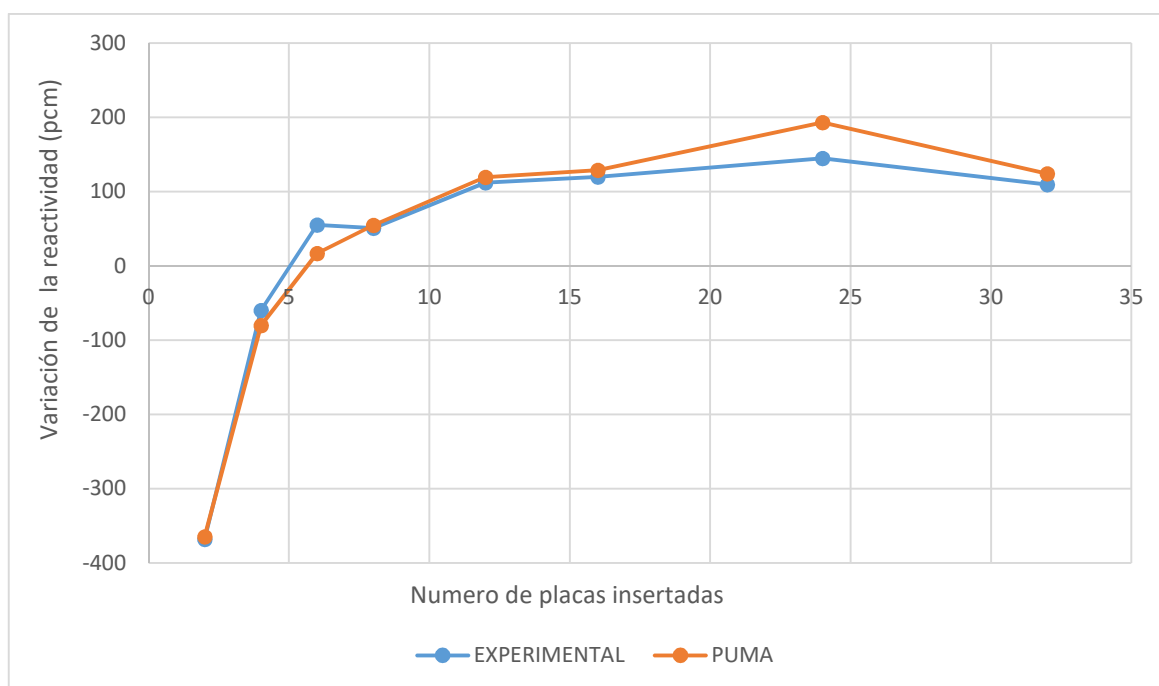
En el anexo 5 y 6 se muestran los archivos de entrada de PUMA de modelado geométrico y materiales del reactor. Estos corresponden al caso de menor mallado, el primero que se tomó cuando se comenzó a hacer el análisis de convergencia. Se eligió referenciar estos *inputs* ya que los correspondientes a los modelos finales (Figura 7) son demasiado extensos y no se consideró apropiado agregarlos en el anexo. Sin embargo, al igual que el resto de los *inputs* utilizados en el trabajo, estos se encuentran en la base de datos correspondiente [11].

## 2.2.4 Resultados

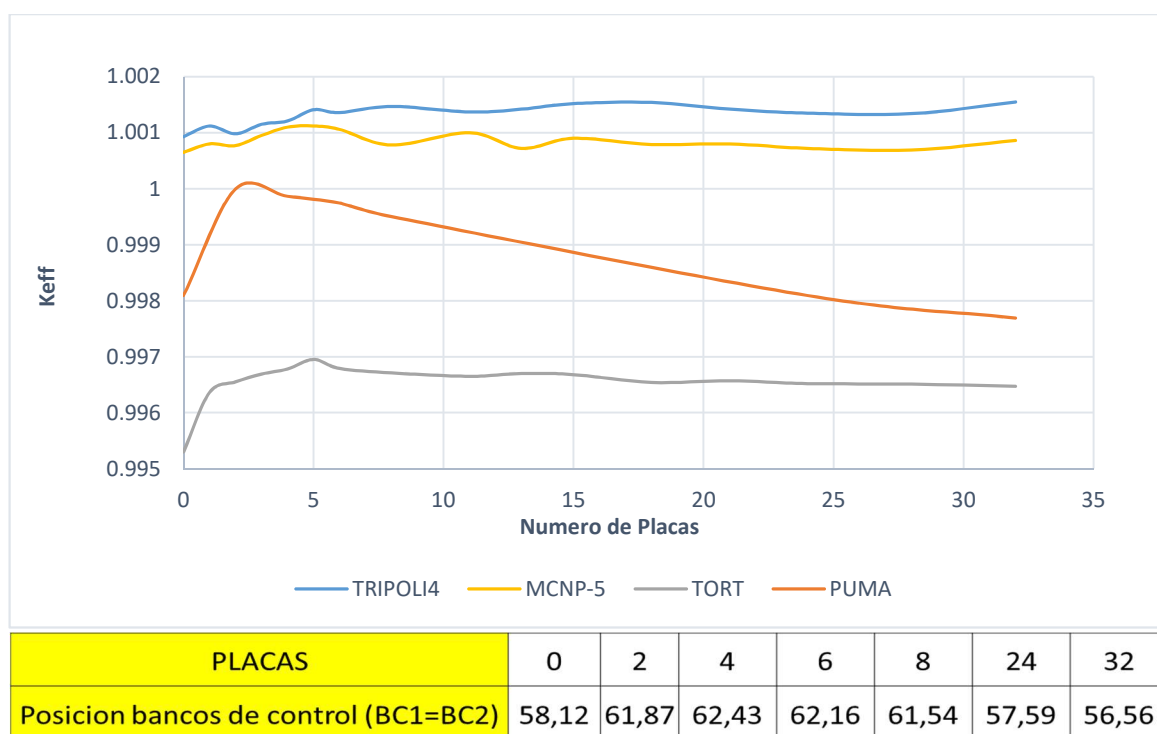
### 2.2.4.1 Placas reflectoras SS-304

Para representar el agregado de las placas en el modelo de PUMA se realizó una cobertura de regiones con un canal al que se le asignó la tabla de sección eficaz de SS-304. La cobertura se fue modificando acorde a cada dimensión a medida que estas iban siendo insertadas.

En las figuras 28 y 29 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 28.** Comparación de los resultados obtenidos con PUMA y experimentalmente Para la experiencia con placas reflectoras. Variación en reactividad respecto a las placas insertadas.



**Figura 29.** Valor de  $K_{eff}$  calculado por los códigos para cada posición crítica experimental en función del número de placas. Se realizó la misma extracción para ambos bancos. Los valores experimentales de la posición crítica en función de las placas es la que se observa en la tabla.

#### 2.2.4.2 Tanque de agua pesada

Utilizando el modelo de PUMA, se realizó una cobertura con las dimensiones correspondiente al tanque de  $D_2O$  y se le asignó al canal la sección eficaz de  $D_2O$ .

Los resultados se muestran en la tabla 2.

|                  | Exceso de reactividad     |                                 |                                |
|------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                  | Resultados experimentales | Resultados calculados con MCNP4 | Resultados calculados con PUMA |
| Con $D_2O$ (pcm) | 3400                      | 3300                            | 3000                           |
| Sin $D_2O$ (pcm) | 2400                      | 2400                            | 2100                           |

**Tabla 2.** Resultado de los excesos de reactividad calculados experimentalmente, con MCNP4 y PUMA.

#### 2.2.4.3 Discusión de resultados

Se observó que para el primer experimento el valor de reactividad calculado con PUMA para el caso sin placas presentó una diferencia del orden de 190 pcm respecto al resultado experimental. Sin embargo, se observa que la curva mantiene una diferencia de este orden durante todo el experimento, por lo que los resultados obtenidos con PUMA del efecto de las placas reflectoras en el núcleo es similar al obtenido experimentalmente. En la figura 28 se muestran los resultados normalizados a la reactividad inicial.

Cuando se modeló el reactor en PUMA, se realizó una discretización hasta observar una variación de reactividad menor a 200 pcm. Teniendo en cuenta esto se

observa que la diferencia notada anteriormente está dentro del margen de error considerado.

En los cálculos de la posición crítica en función de las placas insertadas representada en la figura 29 se observa que los resultados obtenidos con PUMA, presentan diferencias respecto al estado crítico del orden de 200 pcm, estando este valor dentro del orden de los obtenidos por los otros códigos .

En el segundo experimento, los resultados obtenidos con PUMA presentan una diferencia del orden de 350 pcm respecto al cálculo experimental, por lo que se pueden considerar válidos.

## **Capítulo 3: Diseño**

### **3.1 Propuesta**

En la propuesta que se detalla a continuación se propuso generar una caja central de irradiación en el núcleo de reactor para obtener el mayor flujo térmico posible. El objetivo fue realizar la misma manteniendo ciertos parámetros relevantes para la seguridad del reactor tales como exceso de reactividad, margen de apagado, falla única y coeficientes de reactividad. El espacio de la caja de irradiación contendría agua y los cálculos se realizaron con una potencia total de 100 W, que es la máxima a la que puede operar el reactor. Al generar la caja de irradiación se extrajeron pines del núcleo del reactor, por lo que si se mantenía constante esta potencia total, la potencia lineal aumentaría, sin embargo era una consideración que excedía el alcance de este trabajo.

Para realizar esto se comenzó utilizando los modelos de HUEMUL y PUMA realizados en el punto 2.2.2.1, y se fue modificando el modelo de PUMA. En caso de encontrar una configuración que cumpliera con lo mencionado, se realizarían los nuevos modelos de HUEMUL cuando fuese pertinente y se recalcularían los parámetros en PUMA.

### **3.2 Consideraciones para el diseño**

Se realizó el diseño teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- El reactor permite quitar y agregar pines, pero la distancia entre barras combustibles no se modifica.
- La posición y cantidad de barras de control no se modifican.
- Las dimensiones del tanque reflector no se modifican.
- La potencia total se mantiene constante.
- Se tomó como referencia un valor mínimo de exceso de reactividad de 1000 pcm, un valor mínimo de margen de apagado de 3000 pcm y un valor mínimo de falla única de 1000 pcm.
- El coeficiente de reactividad por temperatura del combustible y de refrigerante debía ser negativo.
- El tamaño de la caja sería el que garantice el mayor flujo térmico posible.

### **3.3 Caso 1: Combustible original ( $\text{UO}_2$ 4% enriquecido)**

Dado que se debían comparar los resultados obtenidos con los del núcleo original, se determinaron para este último los valores de margen de apagado, falla única, exceso de reactividad y coeficientes de reactividad

Los coeficientes de reactividad por temperatura se obtuvieron corriendo PUMA con tablas reacopladas con temperatura para dos valores distintos. Para calcular el coeficiente de temperatura de refrigerante se consideraron las contribuciones por la temperatura del isótopo y por la densidad del material, es decir, a cada temperatura de agua se le asignó su valor de densidad.

La Tabla 3 muestra los resultados mencionados anteriormente.

| Caso                             | Reactividad (pcm) | Flujo térmico en caja central | Margen de apagado (pcm) | Falla única | Peso de las Barras (pcm) | $\alpha_{tcombustible}$ | $\alpha_{trefriger.}$ |
|----------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Núcleo original (sin caja y U4%) | 2100              | 7,93E+08                      | -16000                  | 9300        | 18000                    | -2.35                   | -9.3                  |

**Tabla 3.** Parámetros relevantes a considerar para el diseño evaluados en el núcleo original.

Una vez obtenidos estos resultados, se procedió a evaluar el tamaño de la caja. Se comenzó extrayendo pines del centro del reactor y midiendo la reactividad y el flujo térmico en la zona central en función de los pines extraídos. El proceso se realizó con las barras de control y seguridad 100 % extraídas, por lo tanto lo que se midió fue el exceso de reactividad. A medida que se extrajeron los pines, la reactividad fue decayendo (ya que se está extrayendo combustible del reactor), el tamaño de la caja fue aumentando, y el valor del flujo térmico aumentó, ya que aumentó la moderación, hasta llegar a un cierto tamaño donde el mismo comenzó a decaer debido a que comenzaron a tomar mayor importancia las absorciones. El tamaño óptimo de la caja debía ser el que dé un flujo térmico máximo en su centro. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4, en la misma se observa la reactividad, el flujo térmico y el tamaño de la caja en función de los pines extraídos.

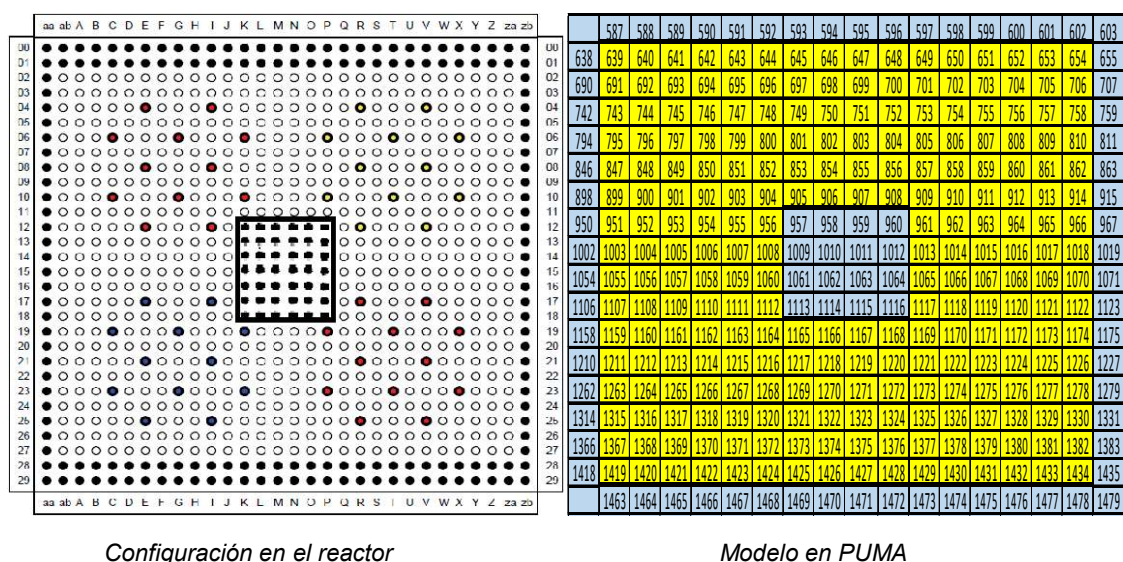
| Pines que se extraen del centro | U 4% ENRIQUECIDO     |                                                      |                   |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------|-------------------|
|                                 | Area facilidad (cm2) | Flujo térmico en el centro de la caja de irradiación | Reactividad (pcm) |
| 0 (núcleo original, sin caja)   | 0                    | 7,93E+08                                             | 2100              |
| 11                              | 25                   | 1,42E+09                                             | 1200              |
| 42                              | 102                  | 3,10E+09                                             | -3500             |
| 96                              | 230                  | 3,20E+09                                             | -11000            |
| 170                             | 410                  | 2,67E+09                                             | -21300            |

**Tabla 4.** Variación de reactividad y flujo central en función de pines extraídos del centro.

Como se observa en la tabla 4, el flujo máximo se presenta para una cantidad de 96 pines extraídos, si se continúa extrayendo pines el flujo comienza a decaer

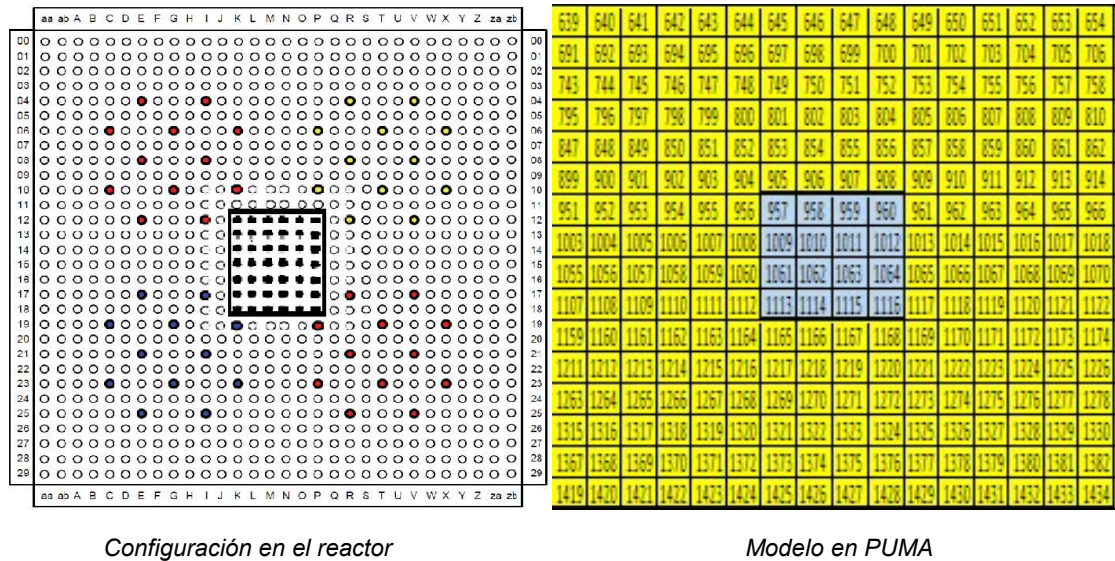
por lo expresado anteriormente. Sin embargo existen dos problemas para esta configuración: La reactividad decae demasiado debido a la cantidad de pines extraídos, por lo que no sería posible llevar el exceso de reactividad al valor preestablecido anteriormente, y no es físicamente posible extraer dicha cantidad de pines del reactor sin modificar los bancos de control, por lo que la configuración no es posible. Teniendo en cuenta esto se decidió probar con la configuración de 42 pines extraídos, ya que el flujo térmico no varía demasiado respecto a la configuración de 96 pines, la reactividad no presenta valores tan bajos, y dicha configuración se puede llevar a cabo en el reactor sin modificar los bancos de control.

En la figura 30 se observa esta configuración en el reactor y el modelo de núcleo empleado en PUMA. Para la configuración del reactor, la caja presenta una pequeña asimetría respecto del eje “y” que no está representada en el modelo. Esto se debe a que este es un cálculo preliminar hasta encontrar la configuración adecuada y esta simplificación no introduce un error de relevancia.



**Figura 30.** Configuración del núcleo con 43 pines extraídos del centro. Esquema del núcleo y el modelo realizado en PUMA.

Con el tamaño de caja seleccionado, se probó modificar la configuración de la figura 30 para obtener un valor de exceso de reactividad del orden del que se impuso como condición (1000 pcm). Para esto se contaba con los espacios periféricos disponibles del núcleo para introducir nuevos pines. El procedimiento consistió en ir agregando nuevos pines combustible en dichas zonas, y midiendo el valor del exceso de reactividad a medida que fueron siendo insertados los pines. La configuración final, tanto del reactor como del modelo tomado en PUMA, colocando pines en todos los espacios disponibles es la que se observa en la figura 31. En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 31.** Configuración del núcleo con 43 pines extraídos del centro y 172 insertados en la periferia. Esquema del núcleo y el modelo realizado en PUMA.

| Pines extraídos/insertados                                | U 4% ENRRIQUECIDO    |                                                      |                   |
|-----------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------|-------------------|
|                                                           | Area facilidad (cm2) | Flujo térmico en el centro de la caja de irradiación | Reactividad (pcm) |
| 42 extraídos del centro<br>172 insertados en la periferia | 100                  | 2.57E+09                                             | 450               |

**Tabla 5.** Valor del flujo central, reactividad y área de la caja para la configuración de 42 pines extraídos del centro y 172 insertados en la periferia.

### 3.3.1 Resultados

Con el propósito de poder operar el reactor con una muestra en la caja, en las consideraciones de diseño se estableció como condición un mínimo de 1000 pcm. Dado que el valor de exceso de reactividad de esta configuración es del orden de 450 pcm, se concluyó que no es posible llevar a cabo el diseño con el combustible actual.

Cabe notar para este caso, que la reactividad aportada por los 172 pines que se insertaron en la periferia fue mucho menor que la que se quitó cuando se extrajeron 42 pines del centro. Esto demuestra la importancia que tienen los pines del centro respecto de los de la periferia para la reactividad del núcleo.

### 3.4 Caso 2: $UO_2$ 8% de enriquecimiento

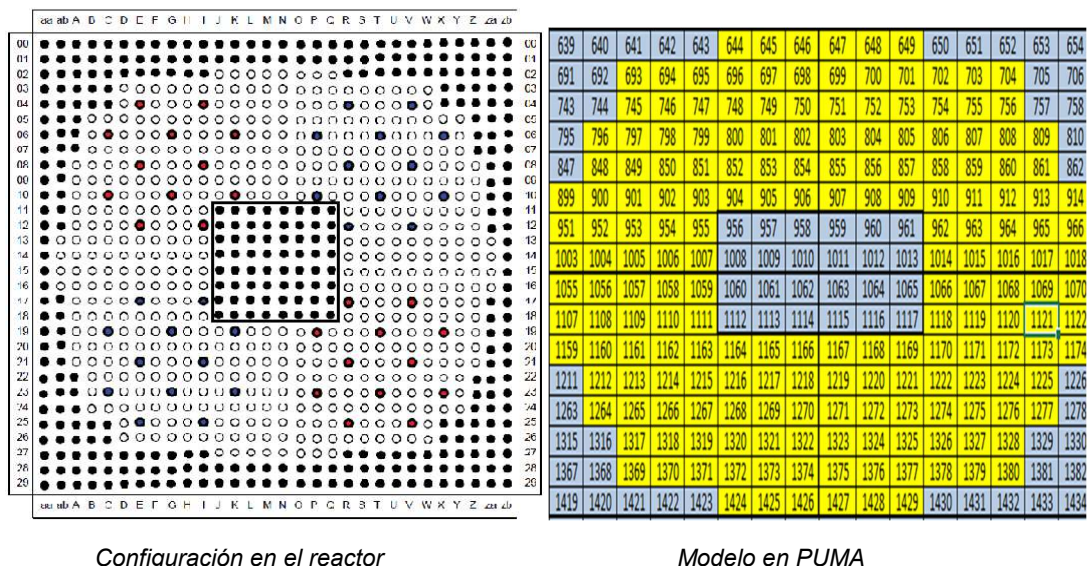
Como una posible solución, se probó remplazar el combustible original ( $UO_2$  4% enriquecido) por  $UO_2$  con un 8% de enriquecimiento y se procedió de forma similar a la anterior. Se utilizaron los mismos modelos de celda que los casos anteriores (núcleo sin caja), con la diferencia de que en este caso el Uranio enriquecido al 8%. Si se lograba obtener una configuración cuyos parámetros fueran próximos a los del núcleo original, se realizarían los modelos en HUEMUL del nuevo núcleo y se recalcularían los parámetros. Las concentraciones del combustible para este caso se encuentran en el anexo 9.

En la tabla 6 se observan los valores de exceso de reactividad, flujo térmico y dimensiones de la caja en función de los pines extraídos. En la misma se observa que para el caso de 42 pines extraídos la reactividad era aún muy alta, por lo que se continuó extrayendo pines, siendo 64 pines la mayor cantidad posible de extraer en el centro del reactor sin modificar los bancos de control. El exceso de reactividad para este caso (64 pines extraídos) seguía siendo alto, con lo que se decidió continuar extrayendo pines para disminuir el mismo, al no ser posible extraerlos del centro del núcleo (siendo que ya se habían extraído la mayor cantidad posible), estos se extrajeron de las esquinas, ya que estos son los que menos influencia tienen sobre la forma del flujo.

La configuración obtenida es la que se muestra en la figura 32.

| Pines que se extraen                           | U 8% ENRIQUECIDO     |                                  |                   |
|------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------|
|                                                | Area facilidad (cm2) | Flujo térmico en la caja central | Reactividad (pcm) |
| 11                                             | 25                   | 1.02E+09                         | 11900             |
| 42                                             | 102                  | 2.59E+09                         | 8000              |
| 64                                             | 153                  | 2.72E+09                         | 5500              |
| 64 pines del centro y 29 pines de cada esquina | 153                  | 3.31E+09                         | 4800              |
| 96                                             | 230                  | 2.77E+09                         | 1700              |
| 170                                            | 410                  | 2.34E+09                         | -7100             |

**Tabla 6.** Variación de reactividad y flujo central en función de pines extraídos del centro.



**Figura 32.** Configuración del núcleo con 64 pines extraídos del centro y 29 de cada esquina. Esquema del núcleo y el modelo realizado en PUMA.

Para este caso (64 pines extraídos del centro y 29 de cada esquina) el exceso de reactividad fue de 4800 pcm. Si bien este valor era alto comparado con el núcleo original, solo era un valor preliminar ya que todavía se debían realizar los modelos en HUEMUL y recalculer los parámetros en PUMA.

Dado que para llegar a esta configuración solo se extrajeron pines combustibles, la relación entre combustible y barras de control del núcleo disminuyó, por lo que al calcular los nuevos modelos de HUEMUL se esperaba que la reactividad del núcleo baje. Por ello este valor de reactividad a pesar de ser alto no se lo consideró hasta entonces como un inconveniente.

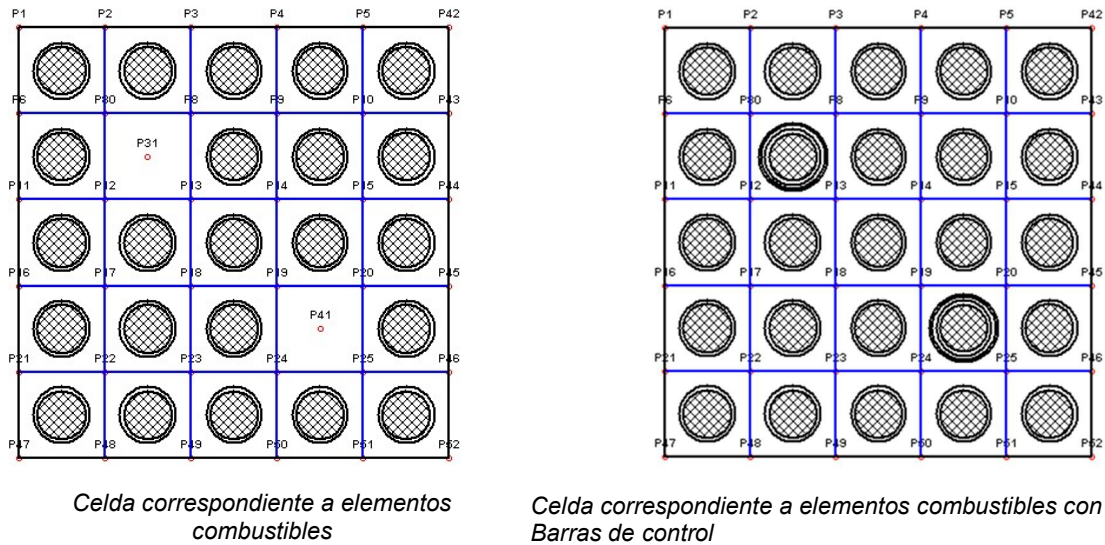
Teniendo en cuenta esto y que los valores de flujo no variaron mucho de los máximos, se pudo optar por este como un modelo válido para continuar con el diseño.

Seguido a esto, se realizaron los modelos de celda en HUEMUL para el nuevo núcleo (tal como se había mencionado), y se realizaron nuevamente los cálculos en PUMA para obtener parámetros más representativos del nuevo núcleo y compararlos con los del núcleo original.

### 3.4.1 Modelos en HUEMUL para núcleo con 64 pines extraídos en el centro y 29 en cada esquina

#### 3.4.1.1 Modelo de celda “combustible” y celda “combustible con barras de control”

Las celdas de la figura 33 corresponden a la última configuración. Estas se evaluaron en PUMA y se corroboró si dicha configuración era válida.



**Figura 33:** Modelos de celdas utilizadas

El combustible utilizado para este caso fue  $\text{UO}_2$  8% enriquecido. El modelo en PUMA de la figura 32 se dividió en 4 cuadrantes al igual que los casos anteriores, de los cuales 2 cuadrantes correspondían solo a elementos combustibles y los otros dos a elementos combustibles con barras de control.

Estos modelos se realizaron siguiendo los mismos pasos que se siguieron para obtener las celdas en los experimentos realizados anteriormente.

La celda de la izquierda de la figura 33 representa a la zona del reactor con elementos combustibles, los espacios sin pines combustibles corresponden a los tubos guías de las barras de seguridad, debido a que el reactor opera con estas 100% extraídas, los mismos se encuentran llenos de agua. La celda de la derecha de la figura 4 corresponde a la zona de elemento combustible y barras de control. Se tomaron estos modelos como representativos de dicha zona, ya que aproxima a la relación que existe entre la cantidad de pines combustibles y tubos guías llenos de agua, y pines combustibles y barras de control respectivamente.

Se realizaron las correcciones de densidades necesarias para que coincidan con el cuadrante representado.

### **3.4.1.2 Agua Lejana y Agua Cercana**

En este caso se utilizaron los modelos anteriores pero se recalculó el núcleo homogenizado con la nueva configuración, ya que cambió el enriquecimiento del combustible como así también la cantidad de pines y de agua moderadora. Al igual que los casos anteriores se obtuvieron las nuevas tablas de secciones eficaces para agua lejana y agua cercana.

### 3.4.1.3 Cálculos PUMA

Utilizando las secciones eficaces de los nuevos modelos de HUEMUL, se recalculó la configuración del reactor representado en la figura 3.

Los parámetros calculados en PUMA fueron los mencionados anteriormente: exceso de reactividad; margen de apagado; falla única y coeficientes por temperatura. Estos se obtuvieron de forma analoga a la mencionada para el núcleo original.

Los resultados se compararon con los valores del núcleo original (sin caja y UO<sub>2</sub> al 4%) para corroborar si el modelo es válido. Dichos resultados se observan en la tabla 5.

| Caso                                                                              | Reactividad (pcm) | Flujo térmico en caja central | Margen de apagado (pcm) | Falla única | Peso de las Barras (pcm) | $\alpha_{\text{combustible}}$ | $\alpha_{\text{refriger.}}$ |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Núcleo original (sin caja y U4%)                                                  | 2100              | 7.93E+08                      | -15800                  | -9300       | 17800                    | -2.35                         | -9.30                       |
| Utilizando celdas HUEMUL para nuevo núcleo modeladas sin H <sub>2</sub> O central | 2600              | 3.21E+09                      | -15000                  | -8000       | 17500                    | -1.86                         | -7.64                       |

**Tabla 7.** Parámetros relevantes a considerar para el diseño evaluados en el nuevo modelo de núcleo.

### 3.4.1.1 Resultados

Como se indica en la tabla 7, el flujo térmico en la caja central para la nueva configuración fue considerablemente mayor que para el caso original, y los demás parámetros calculados concordaron con los del núcleo original.

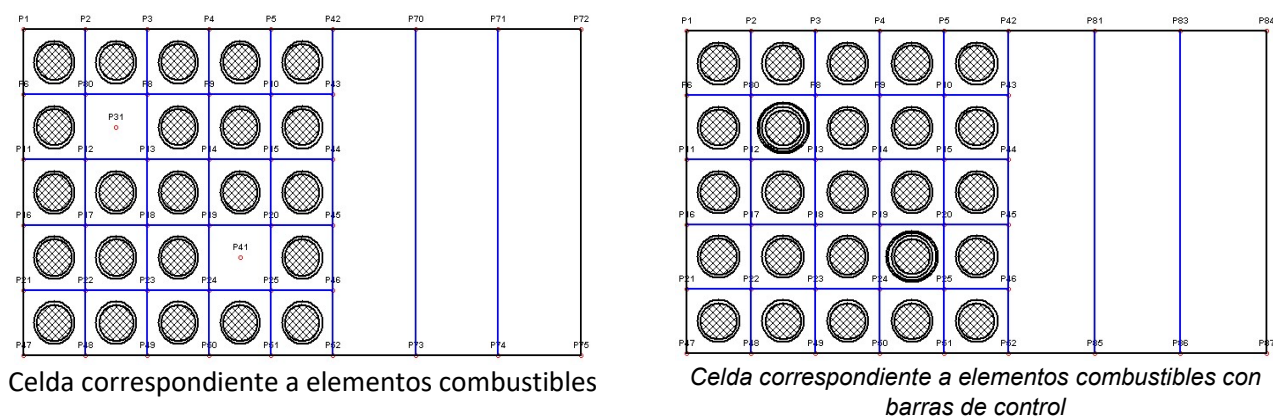
A pesar de la conformidad con los criterios de los resultados mencionados, la celda realizada en este último caso podía no representar adecuadamente el nuevo núcleo, ya que no se tuvo en cuenta el agua de la caja central. Para corroborar esto se realizó un modelo de celda más detallado para verificar si la nueva configuración era válida.

El nuevo modelo se realizó considerando el agua de la caja en las celdas, y se condensó la sección eficaz de la misma para agregarla a PUMA como un nuevo canal.

### 3.4.2 Modelos en HUEMUL con agua de caja central en las celdas

#### 3.4.2.1 Modelos de celda

Las celdas realizadas son las que se indican en la figura 35.



**Figura 34.** Celdas modeladas con agua de la caja central.

La primera celda corresponde a elemento combustible y la segunda a elemento combustible con barras de control. Estos modelos son similares a los anteriores con la diferencia del agregado del agua correspondiente a la caja central, la cual se modeló con una distancia de 6 cm y se dividió en tres regiones con el objetivo de discretizar el espectro y obtener secciones eficaces más representativas.

Debido a que el agua de la caja central no se homogeneizó con el resto de la celda, no hizo falta realizar corrección de densidades para este caso, es decir, se obtuvieron las secciones eficaces de la zona de pines homogeneizada y las secciones eficaces del agua de la caja por separado, para luego introducir esta última en PUMA como un nuevo canal.

El input correspondiente a este caso se observa en el anexo 7.

#### 3.4.2.2 Agua Cercana Y Agua Lejana

Las secciones eficaces del agua lejana y agua cercana son las mismas que el caso anterior.

#### 3.4.2.3 Cálculos En PUMA

Con estos nuevos modelos de celda se recalcularon los parámetros en PUMA. En la tabla 8 se observan los resultados obtenidos y se los compara con los resultados anteriores y los del núcleo original (sin caja)

| Caso                                                                 | Reactividad (pcm) | Flujo térmico en segmentos centrales | Antirreactividad (pcm) | Falla única | Peso de las Barras (pcm) | $\alpha_{\text{combustible}}$ | $\alpha_{\text{refriger.}}$ |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Núcleo original (sin caja y U4%)                                     | 2100              | 7.93E+08                             | -15800                 | -9300       | 17800                    | -2.35                         | -9.30                       |
| Utilizando celdas HUEMUL para nuevo núcleo modeladas sin H2O central | 2600              | 3.21E+09                             | -15000                 | -8000       | 17500                    | -1.86                         | -7.64                       |
| Utilizando celdas HUEMUL para nuevo núcleo modeladas con H2O central | 1700              | 3.31E+09                             | -14800                 | -8300       | 16400                    | -1.83                         | 6.43                        |

**Tabla 8.** Comparación de parámetros relevantes para el diseño de los tres casos analizados.

### 3.4.2.4 Resultados

De los resultados obtenidos en la tabla 8, se observa que el coeficiente por temperatura del refrigerante arroja un valor positivo. Esto indica que la presencia de la caja de irradiación hace que el nuevo núcleo quede sobre moderado, por lo que se puede concluir que la propuesta no es realizable.

Para corregir esto, se podrían tener en cuenta otras consideraciones de diseño para introducir modificaciones con el objetivo de disminuir la relación moderador/combustible, como por ejemplo achicar la distancia entre combustibles o quitar barras de control para ocupar los espacios correspondientes con barras combustibles.

Dado que estas modificaciones escapan a las consideraciones de diseño propuestas, no se realizaron en el presente trabajo.

### 3.5 Conclusiones del diseño

Se estudió la factibilidad de una posición de irradiación *incore* de agua liviana y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Se determinó que con los combustibles actuales no es posible su implementación.
- Se obtuvo una configuración posible con uranio enriquecido al 8% que cumplió satisfactoriamente con la mayoría de los parámetros evaluados. Dicha configuración presentó problemas con el coeficiente de temperatura de refrigerante por lo que no sería operable si no se realizan cambios adicionales en el núcleo.

- Las modificaciones a realizar escapan a las consideraciones de diseño impuestas en el trabajo, algunas de estas pueden ser:
  - Achicar la distancia entre pines combustibles.
  - Quitar barras de control para ocupar los espacios correspondientes con barras combustibles.
- Se comprobó que las prestaciones que ofrece la línea de cálculo son adecuadas para trabajos de diseño
- Se generaron datos del modelado con la línea huemul-puma en relación a la adición de una facilidad incorpore, que podrán ser utilizados como base de un futuro *benchmark* interno

## Conclusiones

Con el objetivo de corroborar la validez de la línea de cálculo HUEMUL-PUMA, se realizaron una serie de benchmarks correspondientes a una celda de un reactor BWR y a la facilidad crítica IPEN/MB-01. Por otro lado se estudió la factibilidad de instalar una caja central de irradiación en este último.

En el caso del benchmark correspondiente al arreglo de barras del reactor BWR, se obtuvieron resultados que se encontraban dentro de la dispersión de los otros códigos, por lo que se observó el adecuado comportamiento del código en presencia de Gd y éste tipo de combustible.

En el *benchmark* del reactor IPEN/MB-01, para el caso del experimento de las placas reflectoras, se observó que la variación de la reactividad en función del número de placas insertadas se ajustó satisfactoriamente al resultado experimental. Mientras que los cálculos de la posición crítica arrojaron valores consistentes con los otros códigos.

El experimento correspondiente al tanque de agua pesada, presento una leve diferencia del orden de 400 pcm respecto al resultado experimental. Esta diferencia no representa un error considerable, por lo que se puede concluir la validez del resultado obtenido.

Con respecto al estudio para evaluar la factibilidad de instalar una posición de irradiación en el núcleo del reactor IPEN/MB-01, se obtuvo como resultado que con el combustible original no es posible realizar la misma. Se probó una alternativa utilizando uranio 8% enriquecido, pero debido a problemas con el coeficiente de reactividad por temperatura, solo sería operable realizando modificaciones que escapan a las consideraciones de diseño que se impusieron para este trabajo. Sin embargo se pudo comprobar que las prestaciones que ofrece la línea de cálculo son adecuadas para trabajos de diseño. Por otro lado se pudieron generar datos del modelado con la línea huemul-puma en relación a la adición de una facilidad incore que podrán ser utilizados como base de un futuro *benchmark* interno.

## **Referencias bibliográficas**

- [1]. Grant , “ MANUAL DEL SISTEMA HUEMUL, VERSIÓN 4”, CNEA,MCO-06-REC-1 Rev. 0, 2013.
- [2]. <https://www-nds.iaea.org/wimsd/>
- [3]. Grant , “MANUAL DEL SISTEMA PUMA”, VERSIÓN 6, CNEA, MCO-06REC-2 Rev. 0,2010
- [4]. Ramos. Notari, “Apuntes Introducción a la Física de Reactores Nucleares. Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson. CNEA.
- [5]. Guía AR 4. Rev. 0, “Diseño de reactores nucleares de investigación” . Autoridad Regulatoria Nuclear.
- [6]. Guía AR 7. Rev. 0, “Diseño de conjuntos críticos”. Autoridad Regulatoria Nuclear.
- [7]. Lamarsh. Baratta, “Introduction to Nuclear Engineering”. Third Edition. Prentice Hall. 2001.
- [8]. Maeder. Wydler. “International Comparison Calculations for a BWR Lattice with Adjacent Gadolinium Pins”. Switzerland, 1984.
- [9]. Adimir dos Santos. “Heavy reflector experiment in the IPEN/MB-01 reactor”. International Conference on the Physics of Reactors “Switzerland.2008.
- [10]. Adimir dos Santos, “Reactivity effect of a heavy water tank as reflector in the IPEN/MB-01 reactor”, 2013 International Nuclear Atlantic Conference. Brazil. Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN.
- [11]. Repositorio del grupo de cálculo y análisis de centrales. CNEA  
<https://owncloud.dcap.cnea.gov.ar/index.php/s/kw8xbEDimHeJ7AB?path=%2FBenchmarks>
- [12]. Rudi . Stamm’ler, M. J. Abbate , “Methods of steady-state reactor physics in nuclear design”., 1983.
- [13]. Adimir dos Santos “Reactor Physics Experiments In The IPEN/MB-01 Research Reactor Facility”, 2006.

## ANEXOS

### Anexo 1: *input* Materiales HUEMUL Correspondiente a celda con veneno BWR

```
*****
*****      Funciones para la definicion de materiales      *****
*****
+ PROC carga_mat :L ;
+ LOCAL "elem LOCAL "p ;

+ MIENTRAS (cuenta :L) > 0 :

+   asigna "elemprimero :L;
+   asigna "p primero sp :L ;
+   transf [asignar valores al parametro ']' || :elem || [' *] ;
+   transf [canales :n1 al :n2 constante :p ,] ;

+   asigna "L spsp :L ;
+   FINMIENTRAS;

+ FIN ;
*****
+ PROC material :n1 :n2 :L ;
+ LOCAL "dens LOCAL "temp ;

+ escribe "material || :n1 || :n2 || :L :

+ asigna "densprimero :L ;
+ asigna "temp primero sp :L ;

asignar valores al parametro 'DENSIDAD' *
canales :n1 al :n2 constante :dens ,
asignar valores al parametro 'TEMPERATURA' *
canales :n1 al :n2 constante :temp ,

+ carga_matspsp :L ;

+ FIN ;

*****

+ PROC definir_microceldas ;

+ hacer "n 1;
+ hacer "Pines 1;
+ hacer "n1 81;
+ hacer "n2 97;
+ hacer "PinFinal :Pines + 15 ;
+ hacer "ZonasPorPin 5;
+ hacer "FraccionPin 1/ZonasPorPin;
+ MIENTRAS :Pines<= :PinFinal :
+   hacer "iter1 ;
+   MIENTRAS :iter<= :ZonasPorPin:
microcelda :n :FraccionPin barritas interna *
      2 contornos :n1 :n2 fracciones :FraccionPin :FraccionPin ,
+     hacer "iter :iter +1;
+     hacer "n :n +1;
+   FINMIENTRAS;
+   hacer "Pines :Pines + 1;
+   hacer "n1 :n1 + 1;
+   hacer "n2 :n2 + 1;
+ FINMIENTRAS ;

+ FIN ;definir_microceldas
```

```

*****
***** Funciones para agrupar Titulos de HUEMUL *****
*****
*** Funcion para identificar la red y el reticulado
+ PROC archivos ;

* DEFINIR ARCHIVOS
usar archivo 'MAESTRO_BWRQCV4' nombre 'MAESTRO_BWRQCV4' ,
identificar red 'BWR_CV4',
identificar reticulado 'BWR_CV4' ;

+ FIN ; archivos
*****
*** Funcion para definir los materiales
+ PROC def_mat ;

+ asigna "combustible [10 873]
+ || [[U 234] 0.0201 [U 235] 2.644 [U 238] 85.479 [O 16] 11.855] ;
+ asigna "quemable [10 873]
+ || [[U 234] 0.01957 [U 235] 2.5649 [U 238] 82.9151 ]
+ || [[Gd 152] 0.0052 [Gd 154] 0.05674 [Gd 155] 0.3852]
+ || [[Gd 156] 0.5327 [Gd 157] 0.4073 [Gd 158] 0.6465 [Gd 160] 0.5689]
+ || [[O 16] 11.897] ;
+ asigna "vaina [6.55 573]
+ || [[Zr 91] 98.250 [Sn 119] 1.450 [Cr 52] 0.100 [Fe 56] 0.135 [Ni 58] 0.055 [Hf 178]
0.010 ] ;
+ asigna "moderador [0.74 559 [H 1] 11.11 [O 16] 88.88] ;

* ESTADO DEL REACTOR
+ material 1 70 :combustible ;
+ material 71 80 :quemable ;
+ material 81 96 :vaina ;
+ material 97 112 :moderador ;

+ FIN; def_mat
*****
+ PROC biblio ;

* SECCIONES EFICACES DE BIBLIOTECA

182 isotopos 12 especificaciones :
'Gd 154 ' RESONANTE , 'Gd 155 ' RESONANTE , 'Gd 156 ' RESONANTE ,
'Gd 157 ' RESONANTE , 'Gd 158 ' RESONANTE ,
'U 235 ' RESONANTE , 'U 238 ' RESONANTE , 'Pu 239 ' RESONANTE ,
'Ag 107 ' RESONANTE , 'Ag 109 A' RESONANTE ,
'In 115 E' RESONANTE , 'Gd 160 ' RESONANTE ,

archivo de la biblioteca 'WC69E72.LIB' ,
69 grupos de biblioteca ,
incluir hasta 112 materiales ,

definir 80 microceldas de 2 contornos en geometriaccluster de 16 barritas,
+ definir_microceldas ;

+ FIN ;biblio
*****

+ PROC flujos :POT ;

* PROBABILIDADES DE COLISION
distancias del archivo 'DGEOMCAR',*** comprobar,

```

```

* FLUJOS
precision 1.0e-6 ,
imprimir iteraciones espaciales ;

* POTENCIAS

* CONDENSAR
condensar y calcular fugas y reevaluar flujos regiones 1 a 112 ,
normalizar a potencia :POT grabar ,

+ LINEA LINEA escribe [TODO EL ELEMENTO:] ;

condensar a 2 grupos con estructura 45 69 imprimir secciones eficaces *
para PUMA regiones 1 a 112 ,

+ SI no convergencia:
+   escribe [NO convergio el k];
* FIN DEL PROCESO
+ FINCOND;

* imprimir

+ FIN ; flujos

*****

+ PROC evolucionar :DELTAT :graba ;

* QUEMADO
  182 isotopos 14 especificaciones :
  'Gd 154 ' RESONANTE , 'Gd 155 ' RESONANTE , 'Gd 156 ' RESONANTE ,
  'Gd 157 ' RESONANTE , 'Gd 158 ' RESONANTE ,
  'U 235 ' RESONANTE , 'U 238 ' RESONANTE , 'Pu 239 ' RESONANTE ,
  'Ag 107 ' RESONANTE , 'Ag 109 A' RESONANTE ,
  'In 115 E' RESONANTE , 'Gd 160 ' RESONANTE ,
  'I 135 ' ESTACIONARIO ,
  'Xe 135 ' ESTACIONARIO ,

archivo de biblioteca 'WC69E72.LIB' ,
  69 grupos de biblioteca ,

* imprimir concentraciones por peso ,
imprimir quemado ,
densidad inicial :DENSIDAD ,
paso :DELTAT dias ,

+ SI :graba ENTONCES :
  grabar ,
+ FINCOND ;

definir 80 microceldas de 2 contornos en geometriaccluster de 16 barritas,

+ definir_microceldas ;

+ FIN ; evolucionar

*****
*****
*****
*** Funcion que evoluciona el quemado en :P
+ PROC calculo :P :SIGUE ;
  /* */ ,

```

```

+ LINEA escribe [ Potencia para 1 cm de espesor =] || :POT ;

+ hacer "DELTAT :P/20.052 ;
+ LINEA escribe [ DELTAT =] || :DELTAT ;

+ evolucionar :DELTAT :SIGUE ;

+ SI :SIGUE ENTONCES :
+   biblio ;
+   flujos :POT ;
+   FINCOND ;

+ LINEA LINEA ;
+ hacer "QM :QM + :P ;
+ tipear [Procesado hasta:] || :QM ;

* IMPRIMIR
parametros globales,

Parametro 'Gd 155' valores por canal ,
Parametro 'Gd 157' valores por canal ,
Parametro 'U 235' valores por canal ,
Parametro 'Pu 239' valores por canal ,
Parametro 'Pu 240' valores por canal ,

potencia especifica ;

+ escribe [*****] ;
+ escribe [*****] ;
+ escribe [*****] ;
+ FIN ;
*****
+ PROC leer_bib;

* LEER BIBLIOTECA
cargar archivo 'WC69E72.LIB' -informar,
cargar archivo 'W173.BIB' -informar,

+ FIN;
*****
+ hacer "DENSIDAD 8.7705
+ hacer "POT 0.000020*110.213;
+ hacer "QM 0.0 ;
+ archivos;

+ def_mat;

+ biblio ;

+ flujos :POT ;

+ calculo 0 "VERDAD ;

+ calculo 100 "VERDAD ;
+ calculo 100 "VERDAD ;
+ calculo 100 "VERDAD ;
+ calculo 100 "VERDAD ;
+ calculo 100 "VERDAD ;
+ calculo 100 "VERDAD ;
+ (se sigue repitiendo hasta llegar a 100)

```

## Anexo 2: *Input* materiales HUÉMUL para reactor IPEN/MB-01 correspondiente a celda de elementos combustibles.

```
+ PROC carga_mat :L ;
+ LOCAL "elem LOCAL "p ;

+ MIENTRAS (cuenta :L) > 0 :

+   asigna "elemprimero :L;
+   asigna "p primero sp :L ;
+   transf [asignar valores al parametro ']' || :elem || [' *] ;
+   transf [canales :n1 al :n2 constante :p ,] ;

+   asigna "L spsp :L ;
+   FINMIENTRAS;

+ FIN ;

*****
+ PROC material :n1 :n2 :L ;
+ LOCAL "dens LOCAL "temp ;

+ escribe "material || :n1 || :n2 || :L :

+ asigna "TRdensprimero :L ;
+ asigna "temp primero sp :L ;

asignar valores al parametro 'DENSIDAD' *
canales :n1 al :n2 constante :TRdens ,
asignar valores al parametro 'TEMPERATURA' *
canales :n1 al :n2 constante :temp ,

+ carga_matspsp :L ;

+ FIN ;

*****

* DEFINIR ARCHIVOS
usar archivo 'MAESTRO_ECIPEN' nombre 'MAESTRO_ECIPEN' ,
identificar red 'EC_IPEN',
identificar reticulado 'EC_IPEN' ;

+ asigna "combustible [10.142 293]
+ || [[U 234] 0.03 [U 235] 3.832 [U 238] 84.260 [O 16] 11.878] ;
+ asigna "vaina [7.445 293]
+ || [[Fe 56] 69.08 [Ni 59] 10.044 [Cr 52] 18.339 [Mn 55] 1.687]
+ || [[Si 28] 0.4 [P 31] 0.026 [C 12] 0.028 [S 32] 0.01]
+ || [[Co 59] 0.215 [Mo 96] 0.170] ;
+ asigna "moderador [0.994 293 [H 1] 11.111 [O 16] 88.889] ;

* ESTADO DEL REACTOR
+ material 1 15 :combustible ;
+ material 16 30 :vaina ;
+ material 31 46 :moderador ;

* SECCIONES EFICACES DE BIBLIOTECA

182 isotopos 12 especificaciones :
'Gd 154 ' RESONANTE , 'Gd 155 ' RESONANTE , 'Gd 156 ' RESONANTE ,
'Gd 157 ' RESONANTE , 'Gd 158 ' RESONANTE ,
'U 235 ' RESONANTE , 'U 238 ' RESONANTE , 'Pu 239 ' RESONANTE ,
'Ag 107 ' RESONANTE , 'Ag 109 A' RESONANTE ,
'In 115 E' RESONANTE , 'Gd 160 ' RESONANTE ,
```

archivo de la biblioteca 'WC69E72.LIB' ,  
69 grupos de biblioteca ,  
incluir hasta 46 materiales ,  
  
imprimir concentraciones,

definir 15 microceldas de 2 contornos en geometriacuster de 15 barras,

microcelda 1 1 barra interna 2 contornos 16 31 ;  
microcelda 2 1 barra interna 2 contornos 17 32 ;  
microcelda 3 1 barra interna 2 contornos 18 33 ;  
microcelda 4 1 barra interna 2 contornos 19 34 ;  
microcelda 5 1 barra interna 2 contornos 20 35 ;  
microcelda 6 1 barra interna 2 contornos 21 36 ;  
microcelda 7 1 barra interna 2 contornos 22 37 ;  
microcelda 8 1 barra interna 2 contornos 23 38 ;  
microcelda 9 1 barra interna 2 contornos 24 39 ;  
microcelda 10 1 barra interna 2 contornos 25 40 ;  
microcelda 11 1 barra interna 2 contornos 26 41 ;  
microcelda 12 1 barra interna 2 contornos 27 42 ;  
microcelda 13 1 barra interna 2 contornos 28 43 ;  
microcelda 14 1 barra interna 2 contornos 29 44 ;  
microcelda 15 1 barra interna 2 contornos 30 45 ;

\* PROBABILIDADES DE COLISION  
distancias del archivo 'DGEOMCAR',

\* FLUJOS  
precision 1.0e-6 ,  
imprimir iteraciones espaciales ,

\* POTENCIAS

\* CONDENSAR  
calcular fugas regiones 1 a 46,

+ LINEA LINEA escribe [TODO EL ELEMENTO:] ;

condensar a 2 grupos con estructura 45 69 imprimir secciones eficaces \*  
para PUMA regiones 1 a 46 ,

\* IMPRIMIR  
flujos grupo 69 para todo el reactor ;

\* FIN DEL PROCESO

## Anexo 3: *Input* materiales HUEMUL para reactor IPEN/MB-01 correspondiente a celda de elementos combustibles con barras de control

```
+ PROC carga_mat :L ;
+ LOCAL "elem LOCAL "p ;

+ MIENTRAS (cuenta :L) > 0 :

+   asigna "elemprimero :L;
+   asigna "p primero sp :L ;
+   transf [asignar valores al parametro ''] || :elem || [' *] ;
+   transf [canales :n1 al :n2 constante :p ,] ;

+   asigna "L spsp :L ;
+   FINMIENTRAS;

+ FIN ;

*****
+ PROC material :n1 :n2 :L ;
+ LOCAL "dens LOCAL "temp ;

+ escribe "material || :n1 || :n2 || :L :

+ asigna "TRdensprimero :L ;
+ asigna "temp primero sp :L ;

asignar valores al parametro 'DENSIDAD' *
canales :n1 al :n2 constante :TRdens ,
asignar valores al parametro 'TEMPERATURA' *
canales :n1 al :n2 constante :temp ,

+ carga_matspsp :L ;

+ FIN ;

*****

* DEFINIR ARCHIVOS
usar archivo 'MAESTRO_BCIPEN1' nombre 'MAESTRO_BCIPEN1' ,
identificar red 'BC_IPEN1',
identificar reticulado 'BC_IPEN1' ;

+ asigna "combustible [10.143 293]
+ || [[U 234] 0.03 [U 235] 3.832 [U 238] 84.260 [O 16] 11.878] ;
+ asigna "absorbente [10.57 293]
+ || [[Ag 108] 79.340 [In 115] 14.96 [Cd 112] 4.83 [C 12] 0.3 [S 32] 0.1 [O 16] 0.47]
;
+ asigna "vaina [7.445 293]
+ || [[Fe 56] 69.08 [Ni 59] 10.044 [Cr 52] 18.339 [Mn 55] 1.687]
+ || [[Si 28] 0.4 [P 31] 0.026 [C 12] 0.028 [S 32] 0.01]
+ || [[Co 59] 0.215 [Mo 96] 0.170] ;
+ asigna "guia [7.717 293]
+ || [[Fe 56] 68.446 [C 12] 0.023 [Cr 52] 18.240 [Ni 59] 11.501]
+ || [[Mn 55] 1.360 [P 31] 0.03 [Si 28] 0.4] ;
+ asigna "moderador [0.998 293 [H 1] 11.111 [O 16] 88.889] ;

* ESTADO DEL REACTOR
+ material 1 15 :combustible ;
+ material 16 16 :absorbente ;
+ material 17 32 :vaina ;
+ material 33 33 :guia ;
```

```

+ material 34 50 :moderador ;

* SECCIONES EFICACES DE BIBLIOTECA

182 isotopos 12 especificaciones :
'Gd 154 ' RESONANTE , 'Gd 155 ' RESONANTE , 'Gd 156 ' RESONANTE ,
'Gd 157 ' RESONANTE , 'Gd 158 ' RESONANTE ,
'U 235 ' RESONANTE , 'U 238 ' RESONANTE , 'Pu 239 ' RESONANTE ,
'Ag 107 ' RESONANTE , 'Ag 109 A' RESONANTE ,
'In 115 E' RESONANTE , 'Gd 160 ' RESONANTE ,

archivo de la biblioteca 'WC69E72.LIB' ,
69 grupos de biblioteca ,
incluir hasta 50 materiales ,

imprimir concentraciones,

*** imprimir integrales de resonancia ,

definir 16 microceldas de 3 contornos en geometriacuster de 16 barras,

microcelda 1 1 barra interna 2 contornos 17 34 ;
microcelda 2 1 barra interna 2 contornos 18 35 ;
microcelda 3 1 barra interna 2 contornos 19 36 ;
microcelda 4 1 barra interna 2 contornos 20 37 ;
microcelda 5 1 barra interna 2 contornos 21 38 ;
microcelda 6 1 barra interna 2 contornos 22 39 ;
microcelda 7 1 barra interna 2 contornos 23 40 ;
microcelda 8 1 barra interna 2 contornos 24 41 ;
microcelda 9 1 barra interna 2 contornos 25 42 ;
microcelda 10 1 barra interna 2 contornos 26 43 ;
microcelda 11 1 barra interna 3 contornos 27 44 45 ;
microcelda 12 1 barra interna 2 contornos 28 46 ;
microcelda 13 1 barra interna 2 contornos 29 47 ;
microcelda 14 1 barra interna 2 contornos 30 48 ;
microcelda 15 1 barra interna 2 contornos 31 49 ;
microcelda 16 1 barra interna 2 contornos 32 50 ;

* PROBABILIDADES DE COLISION
distancias del archivo 'DGEOMCAR',

* FLUJOS
precision 1.0e-6 ,
imprimir iteraciones espaciales ,

* POTENCIAS

* CONDENSAR
calcular fugas regiones 1 a 50,

+ LINEA LINEA escribe [TODO EL ELEMENTO:] ;

condensar a 2 grupos con estructura 45 69 imprimir secciones eficaces *
para PUMA regiones 1 a 50 ,

* IMPRIMIR
flujos grupo 69 para todo el reactor ;

* FIN DEL PROCESO

```

## **Anexo 5: *Input* de datos geométricos PUMA correspondiente al reactor IPEN/MB-01-Caso de baja discretización utilizado para iniciar análisis de convergencia.**

RETICULADO DE CALCULO :

DELTA X 29.01 3 4.8 5 21.0 7 23.6 8 44 9 ,  
DELTA Y 44.51 2 23.6 3 19.5 5 23.6 6 44.51 7 ,  
DELTA Z 30.0 2 11.0 3 15.0 5 12.3 7 14.0 8 50.0 9 ,

TROZOS AXIALES 30.0 2 11.0 3 30.0 4 24.6 5 14.0 6 50.0 7 ;

DEFINICION DE REGIONES :

\*\*\*region 1 a 14  
7 por 2 (X-Y) \*  
1 2 3 5 6 7 8 9 \*  
1 2 3 ,  
\*\*\*region 15 a 30  
8 por 2 (X-Y) \*  
1 2 3 4 5 6 7 8 9 \*  
3 4 5 ,  
\*\*\*region 31 a 44  
7 por 2 (X-Y) \*  
1 2 3 5 6 7 8 9 \*  
5 6 7 ,

DEFINICION DE CANALES:

por coberturas:

\*\*\*nucleo(elemento combustible)  
1 19 1.0 28 1.0 \* ,  
\*\*\*nucleo( con barras de control)  
2 20 1.0 27 1.0 \* ,  
\*\*\*acero inoxidable  
3 17 1.0 18 1.0 25 1.0 26 1.0 \* ,  
\*\*\*agua cercana  
4 9 1.0 10 1.0 11 1.0 12 1.0 13 1.0 16 1.0 21 1.0 24 1.0 29 1.0 \*  
32 1.0 33 1.0 34 1.0 35 1.0 36 1.0 \* ,  
\*\*\*agua lejana  
5 1 1.0 2 1.0 3 1.0 4 1.0 5 1.0 6 1.0 7 1.0 8 1.0 14 1.0 15 1.0 \*  
22 1.0 23 1.0 30 1.0 31 1.0 37 1.0 38 1.0 39 1.0 40 1.0 41 1.0 \*  
42 1.0 43 1.0 44 1.0 \* ,

\* IMPRIMIR PARA LA RED  
mapa de regiones , coberturas ,

\* FIN DEL PROCESO

**Anexo 6: Input de datos materiales PUMA correspondiente al reactor IPEN/MB-01-Caso de baja discretización utilizado para iniciar análisis de convergencia.**

```
+ PROC defarch ;
* DEFINIR ARCHIVOS
usar archivo 'MAESTRO.SS1' ,
identificar red 'SS1' ,
identificar reticulado 'SS1' ,
identificar perturbaciones 'SS1' ,
identificar tablas 'SS1';
+ FIN ;

*****

+ PROC DefinoMat;
* ESTADO DEL REACTOR
+ hacer "TablaInfNuc1 5;
+ hacer "TablaInfNuc2 4;
+ hacer "TablaNuc1 1;
+ hacer "TablaNuc2 2;
+ hacer "TablaSupNuc1 4;
+ hacer "TablaSupNuc2 5;
+ hacer "TablaRefl1 3;
+ hacer "TablaRefl2 4;
+ hacer "TablaRefl3 5;
asignar valores a los materiales para el canal 1 para todo el reactor :
+ hacer "DATOS frase :TablaInfNuc1 :TablaInfNuc2 ;
+ hacer "i 0 ;
+ MIENTRAS :i< 2:
+   hacer "DATOS frase :DATOS :TablaNuc1;
+   hacer "i :i + 1;
+ FINMIENTRAS;
+ hacer "DATOS frase :DATOS frase :TablaSupNuc1 :TablaSupNuc2 ;
```

```

+ transf :DATOS;

asignar valores a los materiales para el canal 2 para todo el reactor :

+ hacer "DATOS [:TablaInfNuc1 :TablaInfNuc2 :TablaNuc1 :TablaNuc2] ;
+ hacer "DATOS frase :DATOS frase :TablaSupNuc1 :TablaSupNuc2
+ transf :DATOS;

asignar valores a los materiales para el canal 3 para todo el reactor :

+ hacer "DATOS frase :TablaInfNuc1 :TablaInfNuc2 ;
+ hacer "i 0;
+ MIENTRAS :i< 2:
+   hacer "DATOS frase :DATOS :TablaRef1 ;
+   hacer "i :i + 1;
+ FINMIENTRAS;
+ hacer "DATOS frase :DATOS frase :TablaSupNuc1 :TablaSupNuc2 ;
+ transf :DATOS;

asignar valores a los materiales para el canal 4 para todo el reactor :

+ hacer "DATOS :TablaInfNuc1 ;
+ hacer "i 0;
+ MIENTRAS :i< 4:
+   hacer "DATOS frase :DATOS :TablaRef2 ;
+   hacer "i :i + 1;
+ FINMIENTRAS;
+ hacer "DATOS frase :DATOS :TablaSupNuc2 ;
+ transf :DATOS;

asignar valores a los materiales para el canal 5 para todo el reactor :

+ hacer "i 0;
+ hacer "DATOS [];
+ MIENTRAS i < (6):
+   hacer "DATOS frase :DATOS :TablaRef3;
+   hacer "i :i + 1;
+ FINMIENTRAS;
+ AMBAS :DATOS;

```

```

+ FIN; DefinoMat
*****

+ PROC AMBAS :s ;

+ transf :s;

***+ ESCRIBE :s;

+ fin ;

*****

***+ PROC Celda_h2o ;

+ hacer "n 1;

+ hacer "nfinal :n + 1559

+ hacer "m 1.0;

+ MIENTRAS :n<= 1600 :

:n :m ,

+ hacer "n :n + 1 ;

+ FINMIENTRAS ;

+ FIN ; Celda_h2o

*****

+ defarch ;

+ DefinoMat;

* SECCIONES EFICACES

* SECCIONES EFICACES PARA LA RED

* CONSTANTES DE MALLA

* FLUJOS

250 ITERACIONES, BETA 1.60 ,

PRECISION KEFECTIVO 1.0e-05 , PRECISION FLUJO 1.0e-05 ,

imprimir iteraciones espaciales ;

* POTENCIAS

*****

* FIN DEL PROCESO

```

## Anexo 7: *input* Materiales HUEMUL correspondiente a celda de combustible con barra de control modelada con H<sub>2</sub>O de caja central- para diseño.

```
+ PROC carga_mat :L ;
+ LOCAL "elem LOCAL "p ;
+ MIENTRAS (cuenta :L) > 0 :
+   asigna "elemprimero :L;
+   asigna "p primero sp :L ;
+   transf [asignar valores al parametro ''] || :elem || [' *'] ;
+   transf [canales :n1 al :n2 constante :p ,] ;
+   asigna "L spsp :L ;
+   FINMIENTRAS;
+ FIN ;

*****
+ PROC material :n1 :n2 :L ;
+ LOCAL "dens LOCAL "temp ;
+ escribe "material || :n1 || :n2 || :L :
+ asigna "TRdensprimero :L ;
+ asigna "temp primero sp :L ;
+ asignar valores al parametro 'DENSIDAD' *
+ canales :n1 al :n2 constante :TRdens ,
+ asignar valores al parametro 'TEMPERATURA' *
+ canales :n1 al :n2 constante :temp ,
+ carga_matpsp :L ;
+ FIN ;

*****
* DEFINIR ARCHIVOS
+ usar archivo 'MAESTRO_BCIPENCAJA' nombre 'MAESTRO_BCIPENCAJA' ,
+ identificar red 'BC_IPENCAJA',
+ identificar reticulado 'BC_IPENCAJA' ;
+ asigna "combustible [10.093 293]
+ || [[U 234] 0.00448 [U 235] 7.04 [U 238] 80.955 [O 16] 11.851] ;
+ asigna "absorbente [10.962 293]
+ || [[Ag 108] 79.340 [In 115] 14.96 [Cd 112] 4.83 [C 12] 0.3 [S 32] 0.1 [O 16] 0.47] ;
+ asigna "vaina [7.445 293]
+ || [[Fe 56] 69.08 [Ni 59] 10.044 [Cr 52] 18.339 [Mn 55] 1.687]
+ || [[Si 28] 0.4 [P 31] 0.026 [C 12] 0.028 [S 32] 0.01]
+ || [[Co 59] 0.215 [Mo 96] 0.170] ;
+ asigna "guia [7.717 293]
+ || [[Fe 56] 68.446 [C 12] 0.023 [Cr 52] 18.240 [Ni 59] 11.501]
+ || [[Mn 55] 1.360 [P 31] 0.03 [Si 28] 0.4] ;
+ asigna "moderador [0.998 293 [H 1] 11.111 [O 16] 88.889] ;

* ESTADO DEL REACTOR
+ material 1 23 :combustible ;
+ material 24 25 :absorbente ;
+ material 26 50 :vaina ;
+ material 51 52 :guia ;
+ material 53 82 :moderador ;

* SECCIONES EFICACES DE BIBLIOTECA

182 isotopos 12 especificaciones :
'Gd 154 ' RESONANTE , 'Gd 155 ' RESONANTE , 'Gd 156 ' RESONANTE ,
'Gd 157 ' RESONANTE , 'Gd 158 ' RESONANTE ,
'U 235 ' RESONANTE , 'U 238 ' RESONANTE , 'Pu 239 ' RESONANTE ,
'Ag 107 ' RESONANTE , 'Ag 109 A' RESONANTE ,
```

```

'In 115 E' RESONANTE , 'Gd 160 ' RESONANTE ,

archivo de la biblioteca 'WC69E72.LIB' ,
  69 grupos de biblioteca ,
incluir hasta 82 materiales ,

imprimir concentraciones,

***  imprimir integrales de resonancia ,

definir 25  microceldas de 4 contornos en geometriaccluster de 25 barritas,

microcelda 1 1 barrita interna 2 contornos 26 53 ;
microcelda 2 1 barrita interna 2 contornos 27 54 ;
microcelda 3 1 barrita interna 2 contornos 28 55 ;
microcelda 4 1 barrita interna 2 contornos 29 56 ;
microcelda 5 1 barrita interna 2 contornos 30 57 ;
microcelda 6 1 barrita interna 2 contornos 31 58 ;
microcelda 7 1 barrita interna 4 contornos 32 59 60 52 ;
microcelda 8 1 barrita interna 2 contornos 33 61 ;
microcelda 9 1 barrita interna 2 contornos 34 62 ;
microcelda 10 1 barrita interna 2 contornos 35 63 ;
microcelda 11 1 barrita interna 2 contornos 36 64 ;
microcelda 12 1 barrita interna 2 contornos 37 65 ;
microcelda 13 1 barrita interna 2 contornos 38 66 ;
microcelda 14 1 barrita interna 2 contornos 39 67 ;
microcelda 15 1 barrita interna 2 contornos 40 68 ;
microcelda 16 1 barrita interna 2 contornos 41 69 ;
microcelda 17 1 barrita interna 2 contornos 42 70 ;
microcelda 18 1 barrita interna 2 contornos 43 71 ;
microcelda 19 1 barrita interna 4 contornos 44 72 73 51 ;
microcelda 20 1 barrita interna 2 contornos 45 74 ;
microcelda 21 1 barrita interna 2 contornos 46 75 ;
microcelda 22 1 barrita interna 2 contornos 47 76 ;
microcelda 23 1 barrita interna 2 contornos 48 77 ;
microcelda 24 1 barrita interna 2 contornos 49 78 ;
microcelda 25 1 barrita interna 2 contornos 50 79 ;

* PROBABILIDADES DE COLISION
distancias del archivo 'DGEOMCAR',

* FLUJOS
precision 1.0e-6 ,
imprimir iteraciones espaciales ,

* POTENCIAS

* CONDENSAR
calcular fugas regiones 1 a 82,

+ LINEA LINEA escribe [TODO EL ELEMENTO:] ;

condensar a 2 grupos con estructura 45 69 imprimir secciones eficaces *
para PUMA regiones 1 a 79 ,

```

\* IMPRIMIR  
flujos grupo 69 para todo el reactor ;

\* FIN DEL PROCESO

## Anexo 8: Materiales, concentraciones y densidades IPEN/MB-01 con uranio 4% enriquecido (sin corrección de densidades).

| Combustible       | Masa Atomica | Porcentaje en peso | Densidad Fuel (g/cm3) (D)      |
|-------------------|--------------|--------------------|--------------------------------|
| 234U              | 234          | 0,03               | 10,18                          |
| 235U              | 235          | 3,83               |                                |
| 238U              | 238          | 84,26              |                                |
| O                 | 16           | 11,88              |                                |
| Barras de control | Masa Atomica | Porcentaje en peso | Densidad CR (g/cm3)            |
| Ag                | 107,9        | 79,34              | 10,01                          |
| In                | 114,8        | 14,96              |                                |
| Cd                | 112,4        | 4,83               |                                |
| C                 | 12           | 0,3                |                                |
| S                 | 32,06        | 0,1                |                                |
| O                 | 16           | 0,47               |                                |
| H2O               | Masa Atomica | Porcentaje en peso | Densidad H2O(g/cm3)            |
| H                 | 1            | 11,11              | 0,998                          |
| O                 | 16           | 88,89              |                                |
| Vaina             | Masa Atomica | Porcentaje en peso | Densidad vaina con Gap (g/cm3) |
| Fe                | 55,84        | 69,08              | 7,92                           |
| Ni                | 58,69        | 10,04              |                                |
| Cr                | 51,99        | 18,34              |                                |
| Mn                | 54,93        | 1,69               |                                |
| Si                | 28,08        | 0,4                |                                |
| P                 | 30,97        | 0,026              |                                |
| C                 | 12           | 0,03               |                                |
| S                 | 32,06        | 0,01               |                                |
| Co                | 58,93        | 0,21               |                                |
| Mo                | 95,96        | 0,17               |                                |

**Anexo 9: Materiales, concentraciones y densidades  
IPEN/MB-01 con uranio 8% enriquecido (sin  
corrección de densidades),**

| Isotopos U | Masa Atomica | Porcentaje en peso | Densidad Fuel (g/cm3) (D) |
|------------|--------------|--------------------|---------------------------|
| U234       | 234          | 0,0045             | 10,18                     |
| U235       | 235          | 7,04               |                           |
| U238       | 238          | 80,95              |                           |
| O          | 16           | 0,12               |                           |