

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

**VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LÍNEA DE
CÁLCULO CONDOR-CITVAP CON LOS DATOS
EXPERIMENTALES DEL REACTOR RA-6**

**Ing. Yousef I. AlZaben
Maestrando**

**Dr. Eduardo A. Villarino
Director**

**Ing. Carlos A. Lecot
Co-director**

**Miembros del Jurado
Dr. Edmundo Lopasso (Instituto Balseiro)
Mgter. José Ignacio Márquez Damián (Instituto Balseiro)
Ing. Felipe Albornoz (INVAP S.E.)**

Noviembre de 2013

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

*A todos
quienes
creyeron en mí
para la
concreción de
esta meta, en
especial a mi
familia.*

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, me encuentro en deuda con Alá, el Todopoderoso, por brindarme la oportunidad y habilidad de llevar adelante esta investigación para mi tesis de maestría.

Es con inmensa gratitud que reconozco la guía brindada por el Dr. Eduardo Villarino como director y el ingeniero Carlos Lecot como codirector en la concreción de este trabajo.

No logro encontrar palabras para expresar mi agradecimiento hacia mis padres, quienes me alentaron y oraron por mí a lo largo de todo este viaje de estudio. Que Dios bendiga a ambos por creer en mí.

Vaya mi agradecimiento al King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST) por su apoyo económico durante mi época de estudios.

Por último, deseo agradecer al ingeniero Herman Blaumann por su autorización para la obtención de los datos experimentales para la puesta en marcha del RA-6, y al personal del reactor RA-6 que llevó a cabo la medición experimental durante la puesta en marcha.

RESUMEN

La línea de cálculo determinística CONDOR-CITVAP fue ampliamente verificada y validada. En esta investigación, se verifica CONDOR-CITVAP contra Benchmarks numéricos de OIEA: OIEA-Benchmark-233 y OIEA-Benchmark-643. Tales benchmarks guardan relación con un estudio de factibilidad y lineamientos para la conversión segura de núcleos de combustible de Uranio de Alto Enriquecimiento (HEU) a de Uranio de Bajo Enriquecimiento (LEU). Se llevaron a cabo cálculos de benchmark con el fin de comparar los métodos computacionales de diversas organizaciones. En estos dos benchmarks, diez organizaciones de diferentes partes del mundo participaron en el cálculo de ciertos parámetros de interés común, a saber: (a) K_{∞} como función de quemado, (b) contenido de Pu^{239} a 50% de quemado, (c) K_{eff} en tres estados de núcleo: Fresco (sin Xe), Comienzo de Vida (BOL) y Final de Vida (EOL), (d) relación de flujo rápido y térmico en estado BOL a lo largo del eje X, (e) Peso de Elemento de Control (CEW), y (f) coeficientes de realimentación. Se obtuvieron resultados de la línea de cálculo CONDOR-CITVAP para todos estos parámetros y se los comparó con los resultados de los otros participantes. Los resultados obtenidos estuvieron en concordancia con los valores promedio obtenidos por los participantes.

Luego se validó la línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP contra los datos experimentales del RA-6. El RA-6 (Reactor Argentino – 6) es un Reactor de Ensayo de Materiales (MTR) ubicado en el Centro Atómico Bariloche y brinda apoyo a actividades de capacitación e investigación llevadas a cabo en el Instituto Balseiro. En el año 2008, enmarcado en el programa de Reactores de Ensayos e Investigación de Bajo Enriquecimiento (RERTR), se modificó el combustible del RA-6 de alto enriquecimiento de uranio a bajo enriquecimiento de uranio y se realizaron mediciones durante la puesta en marcha del nuevo núcleo. Esta investigación apunta a estudiar las siguientes mediciones: (a) aproximación a la criticidad por medio de elementos de control, (b) calibración de elementos de control, (c) reactividad en exceso, (d) Margen de Antirreactividad (MA), (e) MA con falla única de elemento de control, (f) coeficiente de realimentación isotérmica, (g) coeficiente de realimentación de vacío, (h) coeficiente de realimentación de potencia y (i) parámetro α -cinético. Se calcularon éstos parámetros usando la línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP y se validaron contra los datos medidos observando buena concordancia entre ambos.

ABSTRACT

The deterministic calculation line CONDOR-CITVAP has been extensively verified and validated. In this research, CONDOR-CITVAP is verified against IAEA numerical benchmarks: IAEA-Benchmark-233 and IAEA-Benchmark-643. These benchmarks were about a feasibility study and guidelines for a safe core conversion from the use of Highly Enriched Uranium (HEU) fuel to the use of Low Enriched Uranium (LEU) fuel. Benchmark calculations were performed to compare the computational methods of various organizations. In these two benchmarks, there were 10 organizations participating from all the world to calculate certain parameters of common of interest. These parameters are: (a) K_{∞} as a function of burnup, (b) Pu^{239} content at 50% burnup, (c) K_{eff} in three core states: Fresh (without Xe), Beginning of Life (BOL) and End of Life (EOL), (d) thermal and fast flux ratio in BOL state along the X-axis, (e) Control Element Worth (CEW), and (f) feedback coefficients. Results of the calculation line CONDOR-CITVAP for all these parameters were obtained and compared with other participants' results. The results' obtained using CONDOR-CITVAP were within other participants' results and close to the average values of participants' results.

The deterministic calculation line CONDOR-CITVAP is, then, validated against the experimental data of RA-6. RA-6 (Spanish acronym for Argentinean Reactor – Number 6) is a Material Testing Reactor (MTR) located in Centro Atómico, Bariloche, Argentina, to support training and research activities of Balseiro Institute. In the framework of Reduced Enrichment Research and Test Reactors (RERTR) program, RA-6 core was converted in 2008 from High Enriched Uranium (HEU) to Low Enriched Uranium (LEU) fuel. During the commissioning of the new core, a series of measurements took place. This research is focused on the following measurement: (a) approach to criticality by control elements, (b) control elements calibration, measurement of (c) excess reactivity, (d) total Shutdown Margin (MA), (e) MA with a single failure of a control element, (f) isothermal feedback coefficient, (g) void feedback coefficient, (h) power feedback coefficient and (i) α -kinetic parameter. All the previous measurements were simulated per the experimental procedures by using the deterministic calculation line CONDOR-CITVAP and validated against the measured data. A good agreement between the measured data and the calculated values were found.

Contenido

AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	9
Lista de Abreviaturas	14
Lista de Figuras.....	15
Lista de Tablas	17
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	20
1.1. Motivación y Objetivo.	20
1.2. Descripción de La Línea de Cálculo.....	20
1.3. Publicación En El Congreso ISMTR-6.	23
1.4. Estructura de Trabajo.....	23
CAPITULO 2: BENCHMARK NUMERICOS DE OIEA	24
2.1. Introducción.	24
2.2. Resultados y Comparaciones.	25
CAPITULO 3: BENCHMARK EXPERIMENTAL DEL RA-6	41
3.1. Introducción.	41
3.2. Especificaciones del RA-6.....	42
3.3. Modelos de Cálculo.	53
3.4. Resultados y Análisis.	60
3.5. Comparación con MCNP5.	87

CAPITULO 4: CONCLUSIONES	92
4.1. Resumen.....	92
4.2. Recomendaciones.	94
REFERENCIAS	95
ANEXO A: BENCHMARK NUMÉRICOS DE OIEA: ESPECIFICACIONES, REQUISITOS Y MODELOS DE CÁLCULO.....	98
ANEXO B: CÁLCULO EXPERIMENTAL DEL MA CON FALLA ÚNICA DE UN ELEMENTO DE CONTROL EMPLEANDO EL MÉTODO DE CAÍDA DE BARRA INTEGRAL	112

Lista de abreviaturas

MTR: Material Test Reactor (traducido al español como: reactor de ensayo de materiales)

RA-6: Reactor Argentino – 6

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

HEU: High Enriched Uranium (traducido al español como: uranio de alto enriquecimiento)

LEU: Low Enriched Uranium (traducido al español como: uranio de bajo enriquecimiento)

BOL: Beginning of Life (traducido al español como: comienzo de vida)

EOL: End of Life (traducido al español como: fin de vida)

CEW: Control Element Worth (traducido al español como: peso de elemento de control)

ECN: Elemento Combustible Normal

ECC: Elemento Combustible de Control

CM: Conservación del Meat

CP: Conservación del Paso

EC: Elemento de Control

MA: Margen de Antirreactividad

CIC: Cámara de Ionización Compensada

PC: Posición Crítica

Lista de Figuras

Fig. 1.1: Esquema de la línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP	22
Fig. 2.1: K_{∞} como función de quemado [%] para HEU	25
Fig. 2.2: K_{∞} como función de quemado [%] para LEU	26
Fig. 2.3: Relación de flujo térmico [LEU/HEU] versus distancia al núcleo X [cm] [11]. La línea punteada en rojo indica el resultado del autor	30
Fig. 2.4: Relación de flujo rápido [LEU/HEU] versus distancia al núcleo X [cm] [11]. La línea punteada en rojo indica el resultado del autor	30
Fig. 2.5: Cambio de reactividad debido sólo al incremento en la temperatura del agua para HEU y LEU	34
Fig. 2.6: Cambio de reactividad debido a la creciente densidad del agua sólo para combustible HEU y LEU	36
Fig. 2.7: Cambio de reactividad debido a la creciente temperatura del agua sólo para combustible LEU	38
Fig. 2.8: Cambio de reactividad debido a la creciente temperatura del agua sólo para combustible HEU	38
Fig. 2.9: Cambio de reactividad debido solamente a un creciente contenido de vacío en agua para HEU y LEU	40
Fig. 3.1: Primera configuración crítica del núcleo (Núcleo número 7) [16]	52
Fig. 3.2: Primera configuración operativa del núcleo (Núcleo número 11) [16]	52
Fig. 3.3: Modelo de ECN 2D, con aproximación al alambre de cadmio a la derecha	54
Fig. 3.4: Modelo de celda de ECN (a la izquierda) y modelo homogeneizado (a la derecha)	54
Fig. 3.5: Modelo de celdas de ECC con la placa de AgInCd insertado y con el alambre de cadmio. A la derecha se ve una aproximación al ECC.	55
Fig. 3.6: Aproximación al modelo de celdas del ECC (a la izquierda) y modelo homogéneo (a la derecha)	56
Fig. 3.7: Modelo de celdas de caja de grafito, caja de irradiación y reflector de agua para la configuración de núcleo número 11	57
Fig. 3.8: Detalles axiales del modelo de núcleo, meat del elemento combustible (izquierda) y elemento de control (derecha). Todas las dimensiones en cm.	58
Fig. 3.9: Primer modelo de núcleo crítico, 16 ECN y 4 ECC (32,5 Kg de U)	59
Fig. 3.10: Primer modelo de núcleo operativo, 15 ECN y 5 ECC (32,1 Kg de U)	59
Fig. 3.11: Reactividad calculada para cada punto crítico experimental	62
Fig. 3.12: Datos experimentales y valores calculados de la calibración del EC 1, 3 y 5	63
Fig. 3.13: Datos experimentales y valores calculados de la calibración del EC 2 y 4	63
Fig. 3.14: Medición de los coeficientes de realimentación isotérmica	73
Fig. 3.15: Cálculos de coeficiente de realimentación isotérmica	74
Fig. 3.16: Ubicación de la hoja de Al en el modelo ECN: (a) usando el código MCNP5 [20], (b) usando el código CONDOR	76
Fig. 3.17: Ilustración esquemática del método de interpolación de secciones eficaces macroscópicas del CITVAP	80
Fig. 3.18: Secciones eficaces microscópicas de absorción para Ag-107 y Ag-109 empleando cálculos ESIN 2001 y MCNP5.1.6	88

Fig. 3.19: Secciones eficaces microscópicas de absorción para Cd-113 empleando cálculos ESIN 2001 y MCNP5.1.6	89
Fig. 3.20: Secciones eficaces microscópicas de absorción para iridio natural empleando cálculos ESIN 2001 y MCNP5.1.6	89
Fig. 3.21: Cálculo de criticidad para los puntos críticos registrados de EC 2 empleando MCNP5.1.6 y CONDOR-CITVAP	91

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Información de la biblioteca de secciones eficaces microscópicas ESIN 2001	21
Tabla 2.1: Lista de participantes del benchmark de OIEA	24
Tabla 2.2: K_{∞} como función de quemado [%] para HEU y LEU	27
Tabla 2.3: Resultados de los participantes para contenido de Pu^{239} a 50% de quemado (g/ECN)	28
Tabla 2.4: Resultados del autor para contenido de Pu^{239} a 50% de quemado (g/ECN), diferencias porcentuales entre los resultados del autor y los resultados de los participantes (máximo, mínimo, promedio) (<i>Mostrados entre paréntesis, [%]</i>)	28
Tabla 2.5: Valores K_{eff} para los resultados del autor y el promedio de los participantes, las diferencias de reactividad entre ellos (entre paréntesis, [<i>pcm</i>]) para ambos secciones eficaces macroscópicas del modelos 2D y 1D	29
Tabla 2.6: Comparación de reactividad perdida de BOL a EOL	29
Tabla 2.7: CEW para HEU (fresco y BOL) y LEU (fresco y BOL)	31
Tabla 2.8: Comparación de resultados del autor y de los participantes (máx, mín, promedio) para CEW	32
Tabla 2.9: Coeficiente de realimentación de reactividad debido solo al cambio de temperatura del agua, núcleo LEU y BOL, ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	33
Tabla 2.10: Coeficiente de realimentación de reactividad debido solo al cambio de temperatura del agua, núcleo HEU y BOL, ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	34
Tabla 2.11: Coeficiente de realimentación de reactividad debido sólo al cambio de densidad del agua, núcleo LEU y BOL, ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	35
Tabla 2.12: Coeficiente de realimentación de reactividad debido sólo al cambio de densidad del agua, núcleo HEU y BOL, ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	35
Tabla 2.13: Coeficiente de realimentación de reactividad debido sólo al cambio de temperatura del combustible, núcleo LEU y BOL, ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	37
Tabla 2.14: Coeficiente de realimentación de reactividad debido sólo al cambio de temperatura del combustible, núcleo HEU y BOL, ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	37
Tabla 2.15: Coeficiente de realimentación de reactividad debida al cambio de vacío de agua solamente, núcleo LEU y BOL ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	39
Tabla 2.16: Coeficiente de realimentación de reactividad debida al cambio de vacío de agua solamente, núcleo HEU y BOL ($\Delta\rho - \text{pcm}$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes	39
Tabla 3.1: Composición del meat de combustible	42
Tabla 3.2: Composición isotópica del uranio	42
Tabla 3.3: Contenido de impurezas en el meat	42
Tabla 3.4: Composición homogénea del meat	43

Tabla 3.5: Composición del Al-6061	43
Tabla 3.6: Impureza en el material de la vaina de Al-6061	44
Tabla 3.7: Impurezas en el veneno quemable (cadmio)	44
Tabla 3.8: Composición de AgInCd	45
Tabla 3.9: Composición del acero inoxidable tipo AISI 304L	45
Tabla 3.10: Impurezas en el agua de la pileta del reactor	46
Tabla 3.11: Datos geométricos medidos para ECN	47
Tabla 3.12: Datos geométricos medidos para ECC	48
Tabla 3.13: Datos geométricos medidos para elemento de control	49
Tabla 3.14: Datos geométricos medidos para la caja de irradiación	50
Tabla 3.15: Datos geométricos medidos para el bloque de grafito	50
Tabla 3.16: Datos geométricos medidos para el filtro BNCT	51
Tabla 3.17: Constantes cinéticas empleadas para procesar los datos experimentales del RA-6, [14]	60
Tabla 3.18: Configuración de los elementos de control durante la aproximación a criticidad por elementos de control [16]	61
Tabla 3.19: Simulación de cálculo de criticidad para todos los puntos críticos registrados	62
Tabla 3.20: Peso de elemento de control calculado y medido	64
Tabla 3.21: Configuración crítica de elementos de control durante la medición de reactividad en exceso y MA [15]	65
Tabla 3.22: Datos medidos y valores calculados de reactividad en exceso y MA	65
Tabla 3.23: Configuración crítica de elementos de control durante la medición del MA con falla única de un elemento de control. Los espacios sombreados indican que este elemento de control fue excluido del procedimiento de falla secuencial [18].	67
Tabla 3.24: Datos experimentales del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de período estable”	68
Tabla 3.25: Datos experimentales del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de caída de barra integral”	68
Tabla 3.26: Comparación entre el método de período estable y el método de caída de barra integral para la medición experimental del MA con falla única de un elemento de control	69
Tabla 3.27: Valores calculados del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de período estable”	70
Tabla 3.28: Valores calculados del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de caída de barra integral”	70
Tabla 3.29: Comparación entre valores calculados y experimentalmente medidos del MA con falla única de un elemento de control empleando el “Método de período estable”	71
Tabla 3.30: Comparación entre valores calculados y experimentalmente medidos del MA con falla única de un elemento de control empleando el “Método de caída de barra integral”	71
Tabla 3.31: Coeficiente de realimentación isotérmica calculado y medido	74
Tabla 3.32: Configuración crítica de elementos de control durante la medición del coeficiente de realimentación de vacío [21]	75
Tabla 3.33: Coeficiente de realimentación de vacío calculado y medido	77
Tabla 3.34: Información termohidráulica sobre el cálculo del coeficiente de realimentación de potencia	80
Tabla 3.35: Coeficiente de realimentación de potencia calculado y medido	81
Tabla 3.36: Actualización del valor de coeficiente de realimentación de potencia calculado	82

Tabla 3.37: Espectro de neutrones retardados [26]	85
Tabla 3.38: Estructura de grupo energético utilizada para el cálculo del parámetro cinético	85
Tabla 3.39: Valores de cálculo de la fracción de neutrones retardados, vida media de los neutrones instantáneos, tiempo entre reproducciones de neutrones instantáneos y parámetro α -cinético	86
Tabla 3.40: Parámetro α -cinético calculado y medido	86
Tabla 3.41: Comparación entre CONDOR2.62 y MCNP5.1.6 para K_{∞}	87
Tabla 3.42: Comparación en la sección eficaz macroscópica de absorción de AgInCd	88
Tabla 3.43: Comparación K_{∞} entre MCNP5.1.6 y CONDOR2.62 para ambos modelos de celdas ECC (sin y con alambres de Cd) y con el EC insertado	90
Tabla 4.1: Resumen de las diferencias obtenidas entre los resultados del autor y el promedio de los participantes del benchmark OIEA en el caso del combustible LEU empleando CONDOR2.62-CITVAP3.8	93
Tabla 4.2: Resumen de las diferencias obtenidas entre los datos medidos y los valores calculados del benchmark experimental del RA-6 usando CONDOR2.62-CITVAP3.8	93

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y Objetivo.

La línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP [1] ha sido ampliamente validada. En esta tesis, la línea de cálculo se valida contra benchmarks numéricos y datos experimentales del RA-6. Los benchmarks de OIEA [8] y [9] fueron empleado como benchmarks numéricos. Los datos experimentales del RA-6 fueron medidos durante la puesta en marcha del núcleo convertido a combustible LEU.

Este trabajo se realizó con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:

- Familiarizarse con la línea de cálculo a través del uso de un benchmark bien definido (benchmark numérico de OIEA).
- Expandir la validación base de la línea de cálculo empleando un benchmark experimental del RA-6.
- Desarrollar un modelo de diseño para predecir el comportamiento del reactor RA-6 empleando la línea de cálculo, para luego validar este modelo contra los datos medidos durante la puesta en marcha del RA-6.
- Intentar mejorar la comparación cálculo – experimento para examinar los detalles experimentales no medidos hasta el momento.
- De ser posible, emplear la herramienta de cálculo Monte Carlo en caso de discrepancia entre la línea de cálculo y los datos experimentales.

1.2. Descripción de La Línea de Cálculo.

Se emplea la línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP para alcanzar el objetivo de esta tesis. CONDOR [2] es un código de cálculo de celdas desarrollado por el Departamento de Ingeniería Nuclear de INVAP. El método que se aplica para la obtención del flujo neutrónico (en un esquema multigrupal) puede ser:

- Probabilidad de colisión en geometría cilíndrica bidimensional general.
- Probabilidad de colisión en geometría de placa unidimensional.
- Método de respuesta heterogénea (HRM) en geometría general bidimensional.

El HRM, también conocido como método de probabilidad de colisión de acople de corriente (CCCP) [3] hace uso de corrientes de acople dependientes angulares para calcular la distribución de flujo a lo largo de los componentes del elemento combustible. En los reactores de investigación, la optimización de los elementos combustibles es aún un desafío, y este método representa una alternativa rápida y precisa al método de probabilidad de colisión más común para un elemento combustible complejo de grandes dimensiones. Haciendo uso del HRM, puede

construirse el modelo final repitiendo o combinando diferentes bloques de celdas. Estos bloques luego se calculan individualmente por medio del método de probabilidad de colisión, y se acoplan por medio de las corrientes dependientes angulares entrante y saliente (acople de corrientes blanco) de los límites de conexión de cada bloque de celdas. Este método resulta adecuado para la mayoría de los cálculos, y brinda una definición geométrica más compacta del problema y un período de cálculo más corto [1].

La biblioteca de datos de secciones eficaces microscópicas fue provista a CONDOR como estructura de 69 grupos de energía. Esta biblioteca se conoce como ESIN 2001. La biblioteca ESIN 2001 surge originalmente de ENDF/B-IV, y su información se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Información de la biblioteca de secciones eficaces microscópicas ESIN 2001

Número de grupos de energía	69
Número de grupos térmicos	42
Número de grupos epitérmicos	13
Número de grupos rápidos	14
Grupos con espectros de fisión	17
Número de elementos	99
Número de elementos resonantes	5
Número de elementos físis	7
Número de productos de fisión	35
Número de elementos P1	4

En el cálculo del núcleo se aplicó una condensación de 69 grupos de energía a 3 grupos de energía. En este trabajo se hace uso de la versión CONDOR 2.62.

Se utilizó el programa POSCON versión 3.0 [1] de post-procesamiento gráfico para mejorar la interacción entre el usuario y el código CONDOR. El programa permite al usuario examinar la entrada geométrica, el factor de multiplicación infinito versus quemado, la forma de flujo en una o dos dimensiones de la entrada geométrica, etc.

Se utilizó un programa auxiliar para extraer secciones eficaces macroscópicas generadas por medio de CONDOR. Este programa se conoce como HXS [1] y tiene la capacidad de fusionar todas las secciones eficaces macroscópicas en una sola biblioteca. Por otro lado, el programa posee diferentes opciones de modificación sobre la biblioteca obtenida, tales como la mezcla de diferentes secciones eficaces macroscópicas y su almacenamiento como una sección eficaz nueva. En este trabajo se utilizó la versión 5.0b de HXS.

Se hizo uso de un programa auxiliar para tratar las secciones eficaces microscópicas de salida de CONDOR para reutilizarlas en el código CITVAP y así calcular los parámetros cinéticos. Este programa se conoce como POS_LIB, [4]. El archivo de entrada del programa POS_LIB requiere: (a) el archivo de salida de CONDOR de secciones eficaces microscópicas en formato CITATION y (b) el archivo de salida de la base de datos de CITVAP. Los archivos de salida del programa POS_LIB son: sección 000, sección 012 y sección 020. Estas secciones se utilizarían luego en el archivo de entrada de CITVAP. En este trabajo se utilizó POS_LIB versión 2.0.

CITVAP [5] es una versión nueva del código de cálculo de núcleo CITATION II [6]. CITVAP fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería Nuclear de INVAP. Utiliza la representación de diferencia finita para resolver la ecuación de difusión neutrónica. Puede emplearse para resolver una ecuación de difusión multigrupal unidimensional, bidimensional y tridimensional en geometría rectangular, cilíndrica, triangular y hexagonal. En CITVAP, los datos nucleares se proveen como bibliotecas de secciones eficaces microscópicas o macroscópicas. CITVAP realiza cálculos de flujo y flujo adjunto para calcular la vida media de los neutrones instantáneos y la fracción de neutrones retardados. CITVAP puede realizar cálculos termohidráulicos, ya sea en convección natural o forzada, en condición de estado estacionario. El código acoplado internamente para el cálculo de convección forzada se denomina TERMIC, mientras que el código que efectúa el cálculo de convección natural se conoce como CONVEC. Se empleó CITVAP versión 3.8 para realizar este trabajo. La Fig. 1.1 muestra un cuadro de interacción de la línea de cálculo CONDOR-CITVAP dentro de cada uno.

Se utilizó un programa de pos-procesamiento gráfico para mejorar la interacción del usuario con el código de cálculo de núcleo CITVAP. Este programa se denomina FLUX [7]. Se empleó FLUX versión 2.8 para este trabajo. El programa FLUX permite al usuario ver y exportar información y gráficos para la geometría del núcleo y las variables calculadas a partir de la base de datos del código CITVAP.

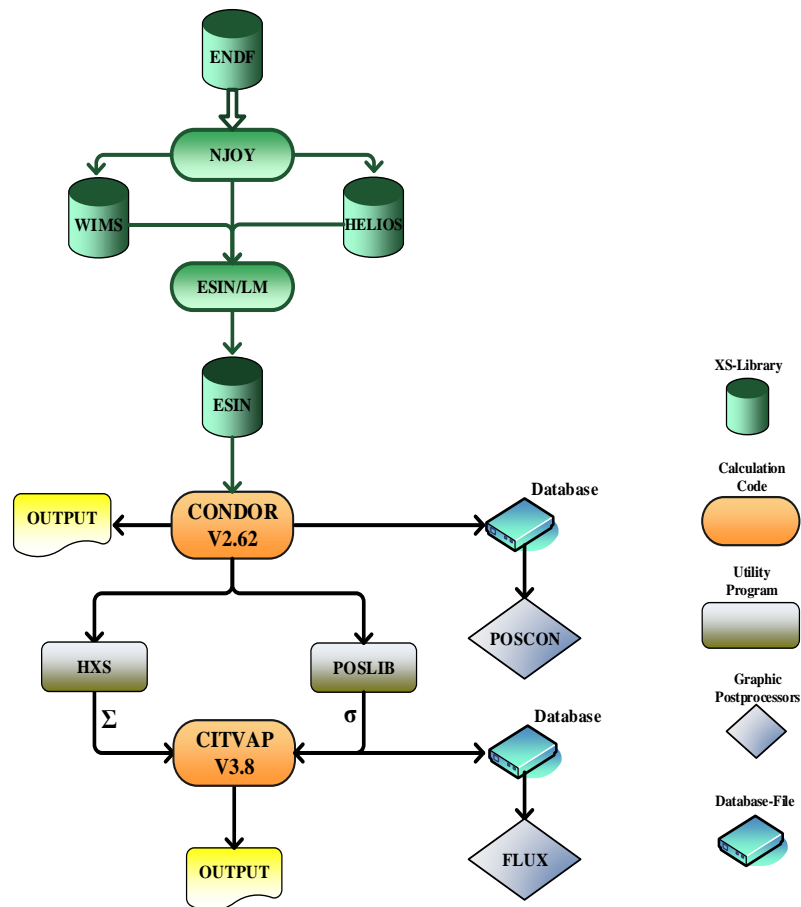


Fig. 1.1: Esquema de la línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP

1.3. Publicación En El Congreso ISMTR-6.

Un trabajo que surge de esta tesis de maestría fue publicado y presentado en el Sexto Simposio Internacional sobre Reactores de Ensayos de Materiales (ISMTR-6), bajo el título de “SAFETY PARAMETERS VALIDATION AFTER THE COMMISSIONING OF RA6 CORE CONVERSION TO LEU FUEL” [8].

1.4. Estructura de Trabajo.

La presente tesis de maestría está organizada del siguiente modo:

- El **Capítulo 1** presenta el objetivo y la motivación de la tesis de maestría. En segundo lugar, se describe la línea de cálculo empleada para el trabajo de investigación.
- El **Capítulo 2** presenta la verificación preliminar contra el benchmark numérico de OIEA. El objetivo principal de este capítulo es el de conocer la línea de cálculo con un benchmark bien definido y comparar los resultados obtenidos con los de las organizaciones de 10 participantes internacionales. Se logró la verificación en dos etapas: verificación de cálculos de celdas y verificación de cálculos de núcleo. Se emplearon dos parámetros para la verificación de los cálculos de celdas: K_{∞} como función de quemado y contenido de Pu^{239} al 50% de quemado. Por otro lado, se utilizaron cuatro parámetros para la verificación de los cálculos del núcleo: K_{eff} en tres estados de núcleo: fresco (sin Xe), BOL y EOL, coeficiente de flujo térmico y rápido en estado BOL a lo largo del eje X, peso de elementos de control, y coeficientes de realimentación.
- El **Capítulo 3** presenta el alma de esta tesis de maestría. El objetivo principal de este capítulo es el de demostrar la validación de la línea de cálculo contra datos experimentales del reactor RA-6. La validación tuvo lugar para los siguientes experimentos: aproximación a la criticidad por medio de elementos de control, calibración de elementos de control, medición de reactividad en exceso, Margen de Antirreactividad (MA), MA con falla única de un elemento de control, coeficiente de realimentación isotérmica, coeficiente de realimentación de vacío, coeficiente de realimentación de potencia y parámetro α -cinético.
- El **Capítulo 4** es un resumen de los resultados del benchmark numéricos de OIEA y benchmark experimentales del RA-6, luego del cual se brinda una recomendación relativa a trabajos futuros.

CAPITULO 2: BENCHMARK NUMERICOS DE OIEA

2.1. Introducción.

En este capítulo, hay dos benchmark numéricos de OIEA que se emplean en el proceso de aprendizaje para producir un adecuado modelado para los códigos de cálculo de celda y núcleo. Estos dos benchmark son el 233 [8] y el 643 [9]. El benchmark de OIEA 233 trata de un estudio de factibilidad para convertir el núcleo de un reactor de investigación de uso de combustible de Uranio de Alto Enriquecimiento (HEU) al uso de combustible de Uranio de Bajo Enriquecimiento (LEU). El problema del benchmark posee un núcleo idealizado de elementos combustible de 6 x 5, de tipo placa, con una potencia de 10 MW reflejada por una única fila de grafito en dos lados y rodeado de agua liviana.

El benchmark de OIEA 643 es un estudio de continuación del benchmark 233. Trata de la conversión de núcleo de seguridad de uso de combustible HEU a uso de combustible LEU. Las especificaciones del reactor y de la carga de combustible son idénticas a las del benchmark 233, con excepción de la trampa de flujo central.

Estos dos benchmark fueron efectuados por 10 participantes, ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Lista de participantes del benchmark de OIEA

Organización	Abreviatura	País
Argonne National Laboratory	ANL	EEUU
Australian Atomic Energy Commission	AAEC	Australia
Comisión Nacional de Energía Atómica	CNEA	Argentina
Commissariat a l' Energie Atomique	CEA	Francia
Eldg. Institut fur Reaktorforshung	EIR	Suiza
Internationale Atomreaktorbau GmbH	INTERATOM	Alemania
Japan Atomic Energy Research Institute	JAERI	Japón
Junta de Energía Nuclear	JEN	España
Kyoto University Research Reactor Ins.	KURRI	Japón
Riso National Laboratory	RISO	Dinamarca

Las especificaciones, requerimientos y modelos de cálculo de los benchmark se listan en el anexo A. Los resultados del autor se muestran en la sección subsiguiente.

2.2. Resultados y Comparaciones.

En esta sección se demuestran los resultados de los dos benchmark: 233 y 643. En primer lugar, se muestran los resultados del cálculo de celdas. En segundo lugar, se presentan los resultados del cálculo de núcleo. En cada etapa, los resultados del autor se comparan con los de otros participantes.

2.2.1. Resultados de Cálculo de Celdas.

2.2.1.1. K_{∞} como función de quemado (pérdida de porcentaje de U^{235}) para tanto HEU como LEU.

El factor de multiplicación infinita (K_{∞}) de ECN se comparó con uno de los participantes que usó el código WIMS-D1¹ como código de celdas. Ambos resultados (CONDOR & WIMS) se resumen en la Tabla 2.2. Las siguientes dos figuras muestran K_{∞} como función de quemado para el modelo unidimensional ECN (CM y CP) de ambos códigos.

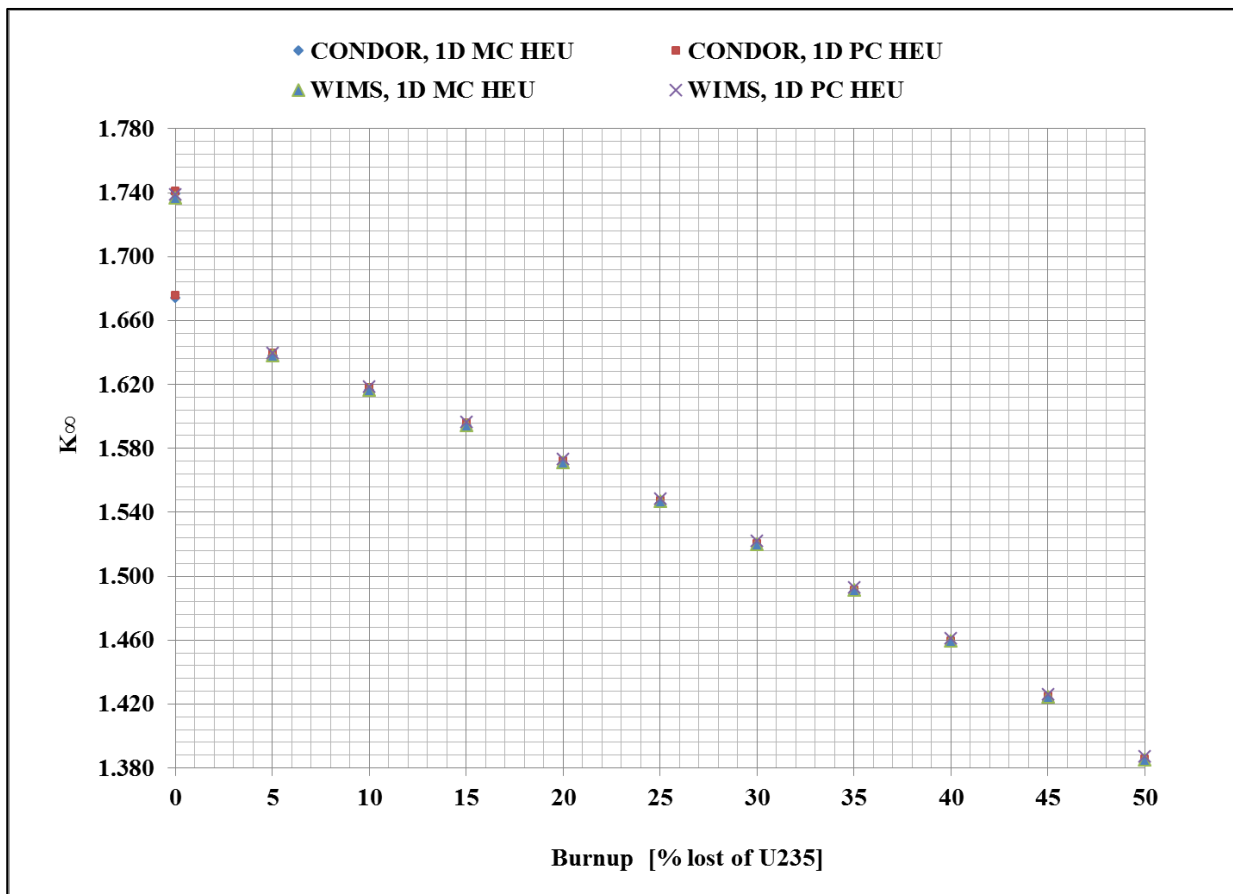


Fig. 2.1: K_{∞} como función de quemado [%] para HEU

¹ Realizado por EIR, Suiza.

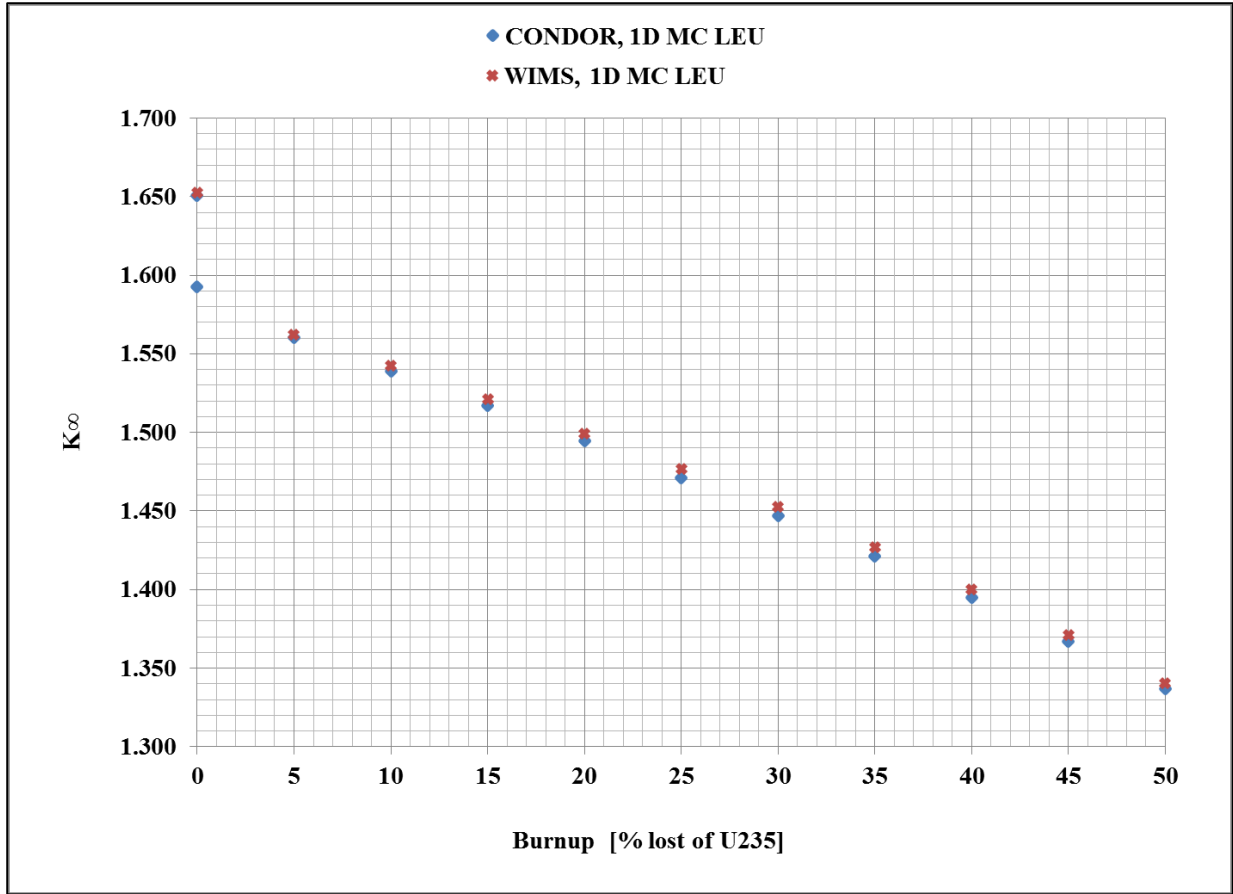


Fig. 2.2: K_{∞} como función de quemado [%] para LEU

La Fig. 2.2 presenta sólo los resultados del CM-ECN unidimensional, ya que los resultados del CP-ECN unidimensional no fueron informados por el participante que hizo uso del código WIMS.

Puede observarse a partir de las figuras 2.1 y 2.2 una diferencia insignificante entre los resultados del modelo ECN de CONDOR y el modelo ECN de WIMS.

La Tabla 2.2 muestra los resultados del ECN bidimensional del autor a través del empleo de CONDOR para combustibles HEU y LEU. Además, muestra la diferencia de reactividad entre CONDOR y WIMS in HEU-CM, así como también en los casos de HEU-CP y LEU-CM. Finalmente, la Tabla 2.2 presenta la diferencia de reactividad entre el modelo del autor bidimensional y unidimensional. Todas las diferencias de reactividad se encuadraron dentro del límite aceptable.

Tabla 2.2: K_{∞} como función de quemado [%] para HEU y LEU

Resultados del cálculo de celdas del benchmark OIEA para ECN K_{∞} unidimensional				Resultados del autor para ECN K_{∞} unidimensional, $\Delta\rho$ (pcm) entre WIMS y CONDOR (entre paréntesis)				Resultados del autor para ECN K_{∞} bidimensional $\Delta\rho$ (pcm) entre CONDOR 1D-CM y 2D (entre paréntesis)	
Quemado [%]	HEU [CM] WIMS	HEU [CP] WIMS	LEU [CM] WIMS	HEU [CM] CONDOR	HEU [CP] CONDOR	LEU [CM] CONDOR	LEU [CP] CONDOR	HEU 2D CONDOR	LEU 2D CONDOR
0 (sin Xe)	1,736777	1,738854	1,652470	1,739356 (85)	1,740981 (70)	1,650466 (73)	1,648580	1,734121 (174)	1,648296 (80)
0 (con Xe)	Estos datos no fueron informados			1,674355 -	1,675917 -	1,592366 -	1,590550	1,669254 (183)	1,590230 (84)
5	1,637918	1,639875	1,562400	1,638242 (12)	1,639792 (3)	1,560184 (91)	1,558393	1,633235 (187)	1,558025 (89)
10	1,616634	1,618590	1,542274	1,616528 (4)	1,618076 (20)	1,538862 (144)	1,537100	1,611573 (190)	1,536725 (90)
15	1,594637	1,596586	1,521404	1,594227 (16)	1,595774 (32)	1,517080 (187)	1,515352	1,589361 (192)	1,515001 (90)
20	1,571440	1,573389	1,499518	1,570801 (26)	1,572345 (42)	1,494546 (222)	1,492849	1,566020 (194)	1,492492 (92)
25	1,546763	1,548677	1,476540	1,545869 (37)	1,547408 (53)	1,471166 (247)	1,469506	1,541191 (196)	1,469138 (94)
30	1,520066	1,522037	1,452472	1,519083 (43)	1,520593 (62)	1,446833 (268)	1,445232	1,514520 (198)	1,444818 (96)
35	1,491110	1,493078	1,427035	1,490045 (48)	1,491546 (69)	1,421452 (275)	1,419919	1,485623 (200)	1,419417 (101)
40	1,459410	1,461355	1,400062	1,458311 (52)	1,459803 (73)	1,394845 (267)	1,393416	1,454049 (201)	1,392788 (106)
45	1,424412	1,426328	1,371219	1,423326 (54)	1,424787 (76)	1,366819 (235)	1,365512	1,419245 (202)	1,364712 (113)
50	1,385223	1,387140	1,340245	1,384374 (44)	1,385816 (69)	1,337096 (176)	1,335958	1,380513 (202)	1,334934 (121)

2.2.1.2. Contenido de Pu²³⁹ a un 50% de quemado para ECN para HEU y LEU.

La Tabla 2.3 muestra el contenido de Pu²³⁹ para ECN a 50% de quemado para los diferentes participantes. La tabla 2.4 muestra los resultados del autor con los resultados de los participantes máximo, mínimo y promedio.

Tabla 2.3: Resultados de los participantes para contenido de Pu²³⁹ a 50% de quemado (g/ECN)

ECN	Ösgae	ANL	Interatom	EIR	JAERI	CNEA	INVAP ESIN2001	INVAP Helios190
HEU	0,42	0,44	0,42	0,45	0,37	0,43	0,42	0,42
LEU	12,30	12,17	11,92	14,80	9,13	12,71	12,93	12,66

Tabla 2.4: Resultados del autor para contenido de Pu²³⁹ a 50% de quemado (g/ECN), diferencias porcentuales entre los resultados del autor y los resultados de los participantes (máximo, mínimo, promedio) (*Mostrados entre paréntesis, [%]*)

ECN	Resultados del autor. Entre paréntesis muestran la diferencia porcentual entre los resultados del autor y los resultados de los participantes (máximo, mínimo, promedio)						Resultados de participantes		
	Modelo 2D		Modelo 1D-CM		Modelo 1D-CP		Máx.	Min.	Prom.
HEU	0,43	(4, 16, 2)	0,43	(4, 16, 2)	0,43	(4, 16, 2)	0,45	0,37	0,42
LEU	12,77	(14,40,4)	13,01	(12,42,6)	13,30	(10,46,8)	14,80	9,13	12,33

La Tabla 2.4 muestra que el modelo 2D ECN tiene los resultados más cercanos a los del promedio de los participantes en comparación con el modelo 1D ECN.

2.2.2. Resultados de Cálculo de Núcleo.

Luego de generar todas las secciones eficaces macroscópicas para los modelos 1D y 2D, el programa HXS se utilizó para transferir las secciones eficaces macroscópicas generadas a una biblioteca. Esta biblioteca se usa para preparar el archivo de entrada de CITVAP.

Si recordamos que había dos benchmark (233 & 643), los resultados del cálculo de núcleo se dividirían en cuatro resultados principales: los dos primeros corresponden al benchmark 233, mientras que el tercero y el cuarto corresponden al benchmark 643.

2.2.2.1. Cálculo de K_{eff} para núcleos HEU y LEU en tres estados: fresco (sin Xe), BOL y EOL.

El factor de multiplicación efectivo (K_{eff}) se obtuvo tanto para núcleos HEU y LEU. La Tabla 2.5 muestra los valores K_{eff} para tres estados: fresco (sin Xe), BOL y EOL, así como la diferencia de reactividad ($\Delta\rho$) entre los resultados del autor y el promedio de los participantes están entre paréntesis.

Tabla 2.5: Valores K_{eff} para los resultados del autor y el promedio de los participantes, las diferencias de reactividad entre ellos (entre paréntesis, [pcm]) para ambas secciones eficaces macroscópicas del modelos 2D y 1D

Estado de núcleo	Promedio de los resultados de los participantes	Resultados 2D del autor (diferencia en pcm)		Resultados 1D del autor (diferencia en pcm)	
		HEU			
Fresco	1,1941	1,1982	(285)	1,2032	(633)
BOL	1,0353	1,0357	(40)	1,0387	(318)
EOL	1,0122	1,0126	(38)	1,0150	(277)
LEU					
Fresco	1,1755	1,1797	(303)	1,1822	(480)
BOL	1,0322	1,0317	(44)	1,0331	(83)
EOL	1,0131	1,0129	(16)	1,0141	(94)

Luego se efectuó una comparación respecto de la reactividad perdida de BOL a EOL entre los resultados del autor y el promedio de los participantes, ver Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Comparación de reactividad perdida de BOL a EOL

Pérdida de reactividad de BOL a EOL ($\Delta\rho$ - %)							
Resultados del autor / Diferencia en % entre los resultados del autor y los participantes (Máx., Mín., Promedio) están entre paréntesis					Resultados de participantes		
Combustible	Resultados 2D del autor		Resultados 1D del autor		Máx.	Mín.	Prom.
HEU	2,20	(7, 17, 0,5)	2,24	(5, 19, 2)	2,37	1,88	2,19
LEU	1,80	(7, 19, 1,6)	1,82	(6, 20, 0,5)	1,94	1,51	1,83

Puede sacarse una conclusión de este paso: que el resultado del autor se encuadra dentro de los resultados de otros participantes, y que el modelo 2D se acerca al promedio de los resultados de los participantes.

2.2.2.2. Relación de flujo térmico y rápido (LEU/HEU) en estado BOL a lo largo de la dirección X.

La relación térmica y rápida fue graficada desde el centro del núcleo hasta el final del reflector a lo largo del eje X.

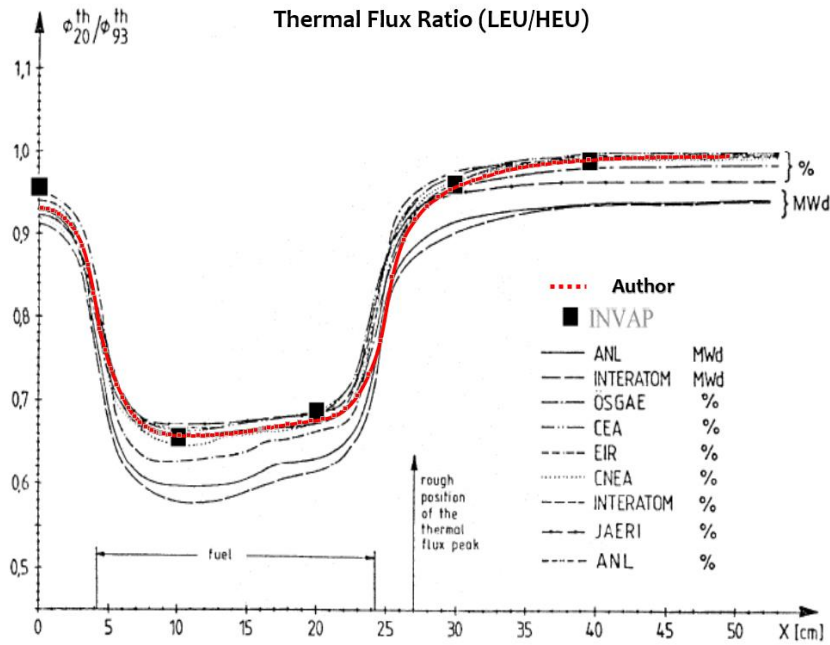


Fig. 2.3: Relación de flujo térmico [LEU/HEU] versus distancia al núcleo X [cm] [11]. La línea punteada en rojo indica el resultado del autor

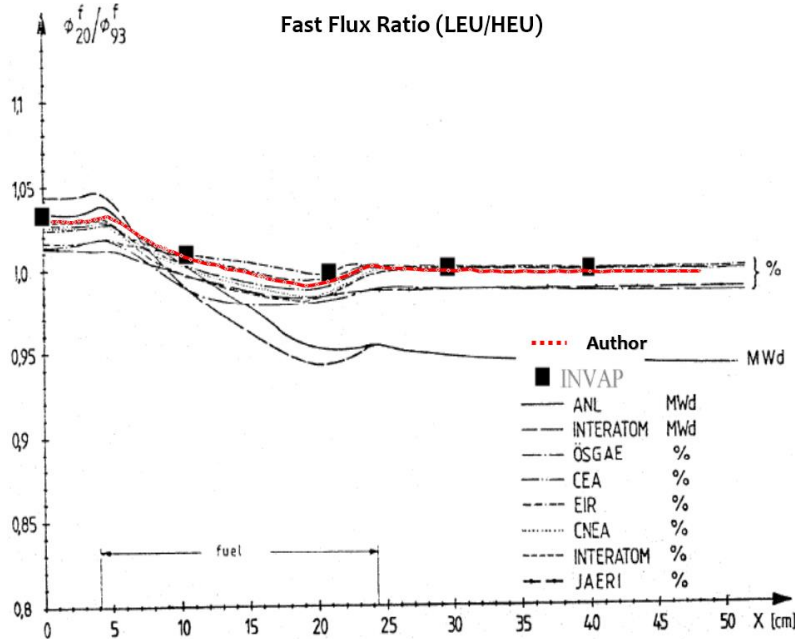


Fig. 2.4: Relación de flujo rápido [LEU/HEU] versus distancia al núcleo X [cm] [11]. La línea punteada en rojo indica el resultado del autor

De las dos figuras anteriores, se puede ver que el resultado del autor se encuadra entre los resultados de otros participantes.

2.2.2.3. Peso de elemento de control (CEW) de cuatro elementos de control insertos en los siguientes estados de núcleo: HEU (fresco y BOL) y LEU (fresco y BOL).

Los cálculos del peso del elemento de control se realizaron para tres elementos de control diferentes, a saber: Ag-In-Cd, B₄C, y Hf. La placa Ag-In-Cd es 80,5 % (en peso) Ag; 14,6 % (en peso) In y 4,9 % (en peso) Cd. La placa B₄C contiene boro natural. La placa de Hf contiene hafnio natural. Tal como se menciona en el Anexo A, hubo tres tipos diferentes de homogeneización para el Modelo ECC. La Tabla 2.7 presenta el CEW para cada modelo homogeneizado de ECC.

Tabla 2.7: CEW para HEU (fresco y BOL) y LEU (fresco y BOL)

Estado de núcleo	Participante	K _{eff}	Ag-In-Cd [pcm]	B ₄ C [pcm]	Hf [pcm]
HEU fresco No Xe	ANL	1,19372	12970	17000	12590
	INTERATOM	-	13300	17200	-
	INVAP (ESIN 2001), [12]	1,19513	13170	17100	15400
	INVAP (Helios 190G), [12]	1,18951	14100	18140	13430
	Autor (Modelo A*)	1,20253	13149	15272	16376
	Autor (Modelo B*)	-	12384	16177	-
	Autor (Modelo C*)	-	12488	16398	-
HEU BOL	ANL	1,03334	17030	21740	16390
	INTERATOM	-	16900	21300	-
	INVAP (ESIN 2001) , [12]	1,03856	16730	21260	19100
	INVAP (Helios 190G) , [12]	1,03706	17710	22350	16760
	Autor (Modelo A)	1,04040	16834	19073	20271
	Autor (Modelo B)	-	15859	20321	-
	Autor (Modelo C)	-	16036	20651	-
LEU fresco No Xe	ANL	1,16954	11530	15390	11200
	INTERATOM	-	11700	15300	-
	INVAP (ESIN 2001) , [12]	1,17334	11510	15200	13660
	INVAP (Helios 190G) , [12]	1,16973	12350	16190	11810
	Autor (Modelo A)	1,18183	11428	13559	14505
	Autor (Modelo B)	-	10757	14316	-
	Autor (Modelo C)	-	10848	14503	-
LEU BOL	ANL	1,02353	14470	18910	13970
	INTERATOM	-	14200	18300	-
	INVAP (ESIN 2001) , [12]	1,03028	13960	18140	16250
	INVAP (Helios 190G) , [12]	1,02857	14890	19240	14170
	Autor (Modelo A)	1,03439	14014	16323	17309
	Autor (Modelo B)	-	13195	17310	-
	Autor (Modelo C)	-	13328	17562	-

* La Fig. A.10 del Anexo A muestra los modelos A, B y C

La Tabla 2.8 presenta una comparación entre los resultados del autor y los de los participantes (máx, mín y promedio) para CEW en términos de diferencia porcentual.

Tabla 2.8: Comparación de resultados del autor y de los participantes (máx, mín, promedio) para CEW

Diferencia entre los resultados del autor y de los participantes (Máx., Mín., Promedio) [%]								
Estado de núcleo	Autor Modelo	Ag-In-Cd, [%]			B ₄ C, [%]			Hf, [%]
		Max.	Min.	Prom	Max.	Min.	Prom	Prom
HEU fresco No Xe	Modelo A	7	1	2	16	10	12	26
	Modelo B	12	5	7	11	5	7	-
	Modelo C	11	4	7	10	4	6	-
HEU BOL	Modelo A	5	1	2	15	10	12	22
	Modelo B	10	5	7	9	4	6	-
	Modelo C	9	4	6	8	3	5	-
LEU fresco No Xe	Modelo A	7	1	3	16	11	13	26
	Modelo B	13	7	9	12	6	8	-
	Modelo C	12	6	8	10	5	7	-
LEU BOL	Modelo A	6	0.4	3	15	10	12	23
	Modelo B	11	5	8	10	5	7	-
	Modelo C	10	5	7	9	3	6	-

A partir de la Tabla 2.8, se puede concluir que el “*Modelo A*” para AgInCd CEW brinda un resultado más cercano que los “*Modelos B y C*” en comparación con otros participantes, mientras que B₄C “*Modelo C*” muestra el resultado más cercano al de otros participantes. Hf CEW se aleja de los resultados de otros participantes con una diferencia de más del 20%, ya que no se aplicó tratamiento auto-apatallamiento al Hf en la biblioteca ESIN 2001. Por otro lado, se ve que los valores de las diferencias no variaron en demasía entre el cálculo fresco y el cálculo BOL, lo que evidencia un buen modelo matemático de quemado implementado en el código CONDOR, el que se verificó anteriormente contra cálculos WIMS.

2.2.2.4. Coeficientes de realimentación de reactividad.

En estado BOL, los cálculos de coeficientes de realimentación de reactividad para combustible HEU y LEU se obtuvieron modificando los siguientes parámetros en los ECN y los ECC:

- I) Temperatura del agua - 38, 50, 75 y 100°C.
- II) Densidad del agua – 0,993, 0,988, 0,975 y 0,958 g/cm³.
- III) Temperatura del combustible - 38, 50, 75, 100 y 200°C.
- IV) Coeficiente de vacío de núcleo – Cambio de densidad del agua - 10%, 20% vacío.

I) Cambio de temperatura del agua.

Al establecer la densidad del agua a 0,9984 g/cm³, correspondiente a 20°C, y modificando sólo la temperatura del agua en 38, 50, 75 y 100°C, la diferencia de reactividad obtenida fue comparada con una temperatura de agua de referencia a 20°C.

La división de la realimentación del agua en efecto de la densidad y efecto de la temperatura significa que el efecto físico considerado sólo bajo la temperatura del agua es debido al movimiento de los átomos de hidrógeno a diferentes temperaturas.

Tabla 2.9: Coeficiente de realimentación de reactividad debido al cambio de temperatura del agua, núcleo LEU y BOL, ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Temperatura [°C]	Autor (diferencia)	INVAP (ESIN 2001), [12]	ANL	EIR	INTERATOM
	1,034386	1,03068	1,01823	1,02639	-
20	PR*	PR	PR	PR	-
38	-129	-124	-148	-153	-
50	-214	-204	-245	-251	-
75	-387	-372	-443	-451	-
100	-550	-535	-636	-640	-
Coeficiente de realimentación [pcm/°C]	-6,90 (9%)	-6,69	-7,95	-8,00	-7,72

*PR: Pauta de Referencia

Tabla 2.10: Coeficiente de realimentación de reactividad debido solo al cambio de temperatura del agua, núcleo HEU y BOL, ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Temperatura [°C]	Autor (diferencia)	INVAP (ESIN 2001) , [12]	ANL	EIR	INTERATOM
	1,040399	1,03864	1,02878	1,02692	-
20	PR*	PR	PR	PR	-
38	-180	-168	-215	-216	-
50	-303	-280	-357	-356	-
75	-553	-510	-652	-642	-
100	-789	-731	-939	-918	-
Coeficiente de realimentación [pcm/°C]	-9,90 (8%)	-9,13	-11,74	-11,48	-10,78

*PR: Pauta de Referencia

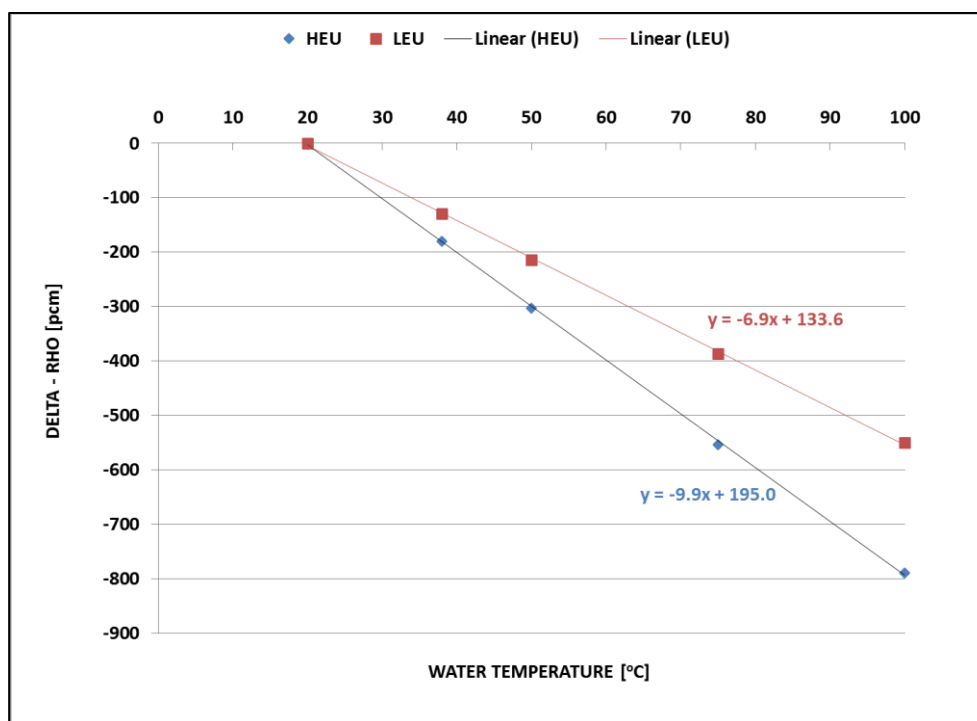


Fig. 2.5: Cambio de reactividad debido sólo al incremento en la temperatura del agua para HEU y LEU

De las tablas 2.9 y 2.10, se observa que los resultados del autor se encuadran dentro de los resultados de otros participantes, cercanos al promedio de los resultados de los participantes por menos del 10%.

II) Cambio en la densidad del agua solamente.

Al fijar la temperatura del agua a 20°C y variar solo la densidad del agua en 0,993; 0,988; 0,975 y 0,958 g/cm³, la diferencia de reactividad se comparó con una densidad de agua de referencia fija de 0,993 g/cm³.

Tabla 2.11: Coeficiente de realimentación de reactividad debido al cambio de densidad del agua, núcleo LEU y BOL, ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Densidad [g/cm ³]	Autor (diferencia)	INVAP (ESIN 2001) , [12]	ANL	EIR	INTERATOM
	1,034376	1,029180	1,015850	-	-
0,993	PR*	PR	PR	PR	-
0,988	-137	-133	-148	-140	-
0,975	-505	-488	-543	-526	-
0,958	-999	-964	-1076	-1046	-
Coeficiente de realimentación [pcm/(g/cm³)]	28559 (2%)	27536	30743	29886	27996

*PR: Pauta de Referencia

Tabla 2.12: Coeficiente de realimentación de reactividad debido al cambio de densidad del agua, núcleo HEU y BOL, ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Densidad [g/cm ³]	Autor (diferencia)	INVAP (ESIN 2001) , [12]	ANL	EIR	INTERATOM
	1,040399	1,037320	1,026590	-	-
0,993	PR*	PR	PR	PR	-
0,988	-118	-116	-125	-125	-
0,975	-430	-425	-457	-462	-
0,958	-855	-842	-910	-918	-
Coeficiente de realimentación [pcm/(g/cm³)]	24439 (3%)	24066	26000	26229	24128

*PR: Pauta de Referencia

Puede observarse que en el caso de combustible LEU, la diferencia entre los resultados del autor y el promedio de los participantes fue del 2%, mientras que para el caso de combustible HEU la diferencia obtenida fue del 3%. Por otro lado, los resultados del autor estuvieron encuadrados dentro de los resultados de otros participantes.

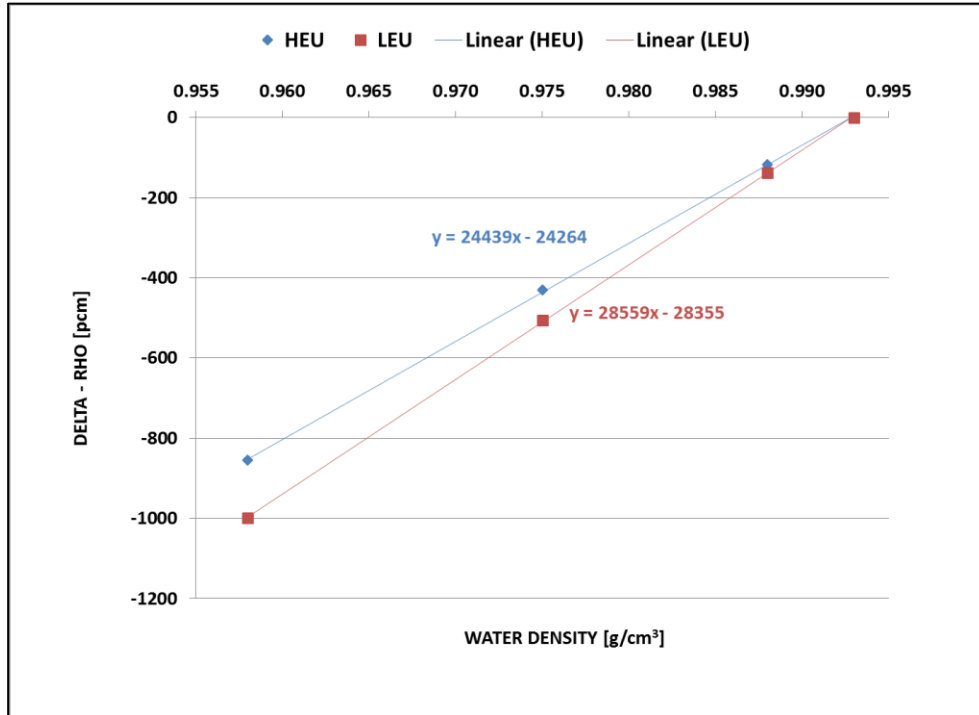


Fig. 2.6: Cambio de reactividad debido a la creciente densidad del agua sólo para combustible HEU y LEU

III) Cambio de temperatura de combustible.

Estos cálculos se realizaron para una temperatura y densidad de agua fijas a 20°C y 0,9984 g/cm³, respectivamente. Los resultados del cambio de reactividad debido solamente al incremento en la temperatura del combustible se calcularon respecto de una temperatura de combustible fija de 38°C.

Tabla 2.13: Coeficiente de realimentación de reactividad debido al cambio de temperatura del combustible, núcleo LEU y BOL, ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Temperatura [°C]	Autor (diferencia)	INVAP (ESIN 2001), [12]	ANL	EIR	INTERATOM
	1,034386	1,030238	1,028390	1,026930	-
38	PR*	PR	PR	PR	-
50	-30	-25	-31	-26	-
75	-89	-79	-95	-81	-
100	-146	-131	-157	-135	-
200	-358	-322	-391	-336	-
Coeficiente de realimentación [pcm/°C]	-2,20 (4%)	-1,99	-2,41	-2,07	-1,98

*PR: Pauta de Referencia

Tabla 2.14: Coeficiente de realimentación de reactividad debido al cambio de temperatura del combustible, núcleo HEU y BOL, ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Temperatura [°C]	Autor (diferencia)	INVAP (ESIN 2001), [12]	ANL	EIR	INTERATOM
	1,040399	1,038620	1,028390	1,026930	-
38	PR*	PR	PR	PR	-
50	0.09	-0.46	-0.66	-0.20	-
75	-1.11	-1.67	-1.70	-0.70	-
100	-1.75	-2.60	-2.36	-1.30	-
200	-3.60	-6.86	-4.35	-3.50	-
Coeficiente de realimentación [pcm/°C]	-0,02 (0,01 pcm/°C)	-0,042	-0,027	-0,022	-0,036

*PR: Pauta de Referencia

Puede observarse aquí que el coeficiente de realimentación de combustible en el LEU tuvo un valor mayor que el HEU, debido a la mayor cantidad de isótopo resonante (U^{238}) en el LEU. Este valor alto tiene un efecto favorable ya que el coeficiente de realimentación del combustible es una realimentación de reactividad rápida. La diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes fue de 4% en el caso del LEU, lo que equivale a 0,09 pcm/°C respecto de los coeficientes de realimentación del combustible promedio de los participantes. Por otro lado, la diferencia en el coeficiente de realimentación del combustible entre los resultados del

autor y el promedio de los participantes fue de 0,01 pcm/°C en el caso de combustible HEU. Ambos resultados del autor se encuadran dentro del límite de diferencia aceptable.

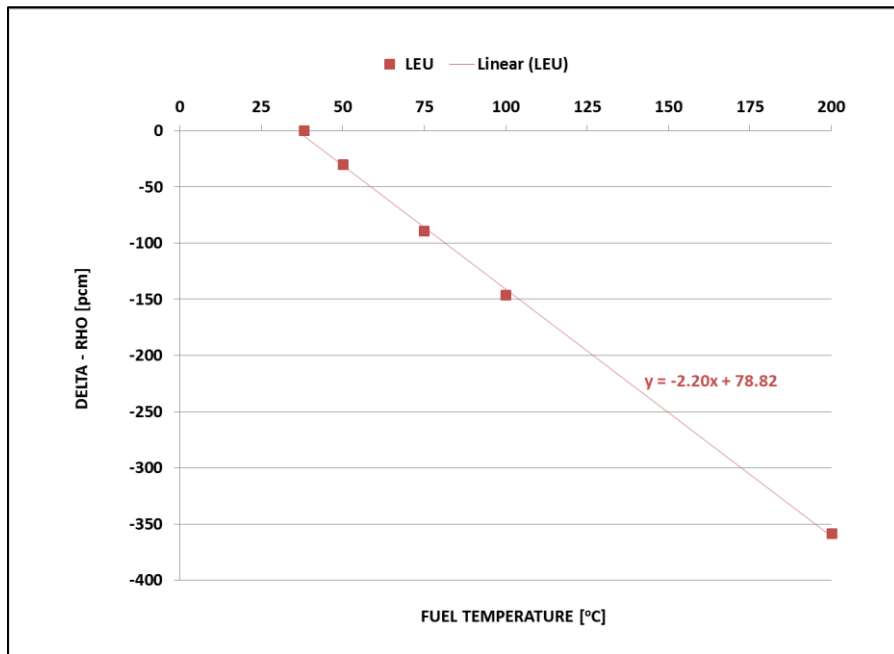


Fig. 2.7: Cambio de reactividad vs. Temperatura del agua para LEU

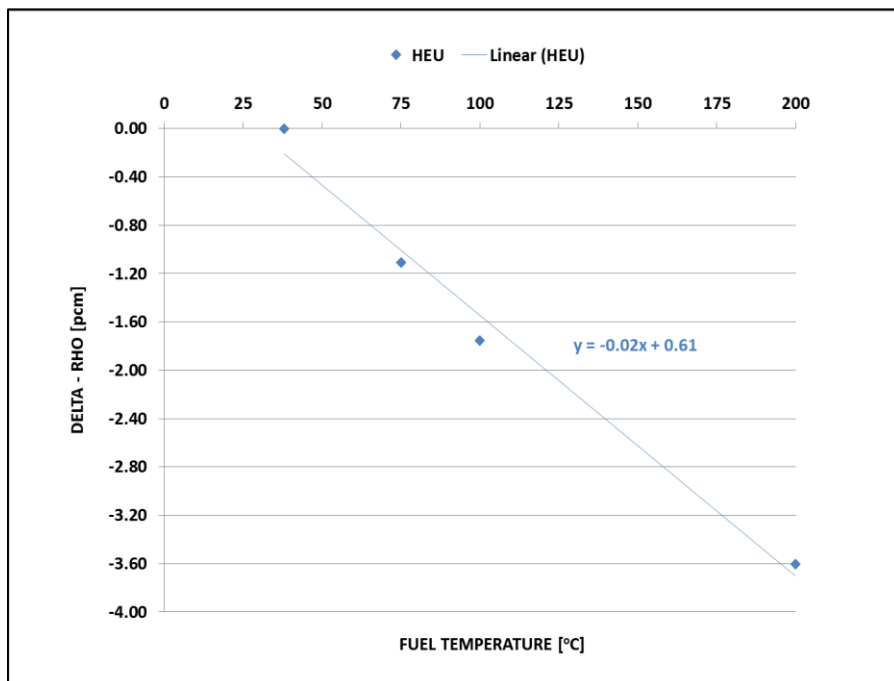


Fig. 2.8: Cambio de reactividad vs. Temperatura del agua para HEU

IV) Cambio de contenido de vacío en el agua solamente.

Estos cálculos se realizaron respecto de un contenido de vacío cero que corresponde a una temperatura y densidad de agua de 20°C y 0,9984 g/cm³, respectivamente. El contenido de vacío en agua es de 10% y 20%, lo que corresponde a una densidad de agua de 0,8986 y 0,7987 g/cm³, respectivamente.

Tabla 2.15: Coeficiente de realimentación de reactividad debida al cambio de vacío de agua, núcleo LEU y BOL ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Contenido de vacío [%]	Autor (diferencia)	ANL	EIR	INTERATOM
	1,034376	1,017400	1,015604	-
0	PR*	PR	PR	-
10	-3025	-3272	-3190	-2965
20	-6853	-7471	-7210	-6689
Coeficiente de realimentación[†] [pcm/(%)]	-383 (3%)	-412	-402	-372

*PR: Pauta de Referencia

† Valor obtenido tomando la correspondiente diferencia de reactividad a un vacío de 20% y de 10% dividido por un vacío de 10%, tal el método adoptado por otros participantes.

Tabla 2.16: Coeficiente de realimentación de reactividad debida al cambio de vacío de agua solamente, núcleo HEU y BOL ($\Delta\rho - pcm$), diferencia porcentual entre los resultados del autor y el promedio de los participantes

Contenido de vacío [%]	Autor (diferencia)	ANL	EIR	INTERATOM
	1,040399	1,02794	1,026918	-
0	PR*	PR	PR	-
10	-2615	-2796	-2818	-2580
20	-6056	-6516	-6484	-5923
Coeficiente de realimentación[†] [pcm/ (%)]	-344 (4%)	-372	-367	-334

*PR: Pauta de Referencia

† Valor obtenido tomando la correspondiente diferencia de reactividad a un vacío de 20% y de 10% dividido por un vacío de 10%, tal el método adoptado por otros participantes.

Podría concluirse a partir de las dos tablas anteriores que el coeficiente de realimentación de vacío calculado por el autor se encuadra dentro de los resultados de otros participantes. Por otro lado, la diferencia entre el valor promedio de los resultados de los participantes y los del autor fue de 4% en el caso de combustible HEU y de 3% en el caso de combustible LEU.

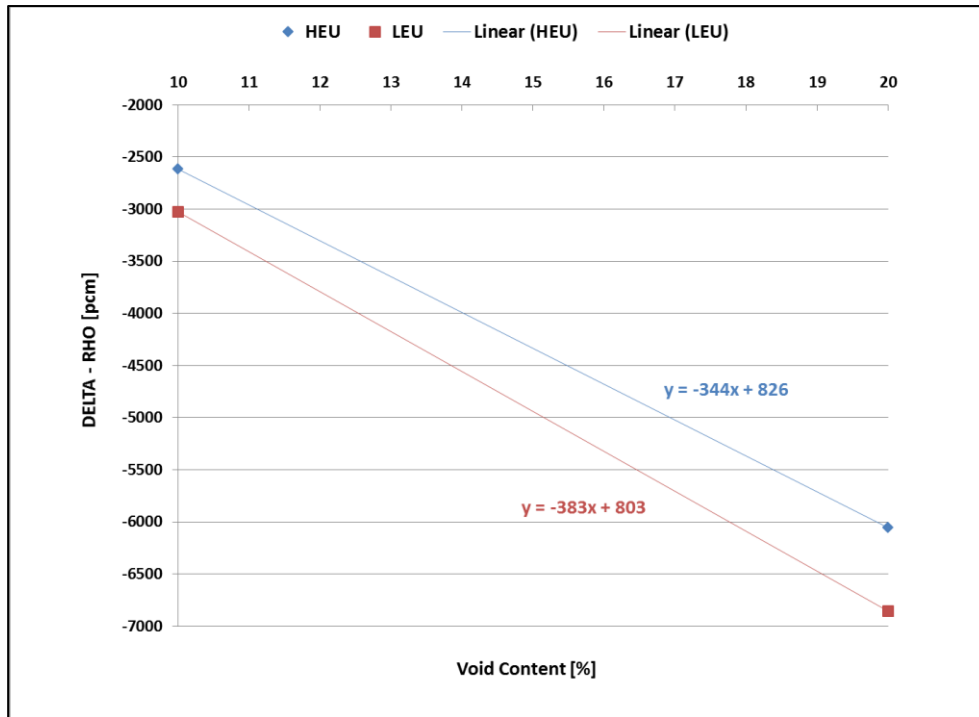


Fig. 2.9: Cambio de reactividad debido al contenido de vacío en agua para HEU y LEU

En este capítulo, la línea de cálculo CONDOR-CITVAP se verificó contra diferentes herramientas de cálculo empleadas por 10 participantes diferentes. El proceso de verificación se efectuó para las siguientes parámetros: a) K_{∞} como función de quemado, b) contenido Pu^{239} a 50% de quemado, c) K_{eff} en tres estados de núcleo: fresco (sin Xe), BOL y EOL, d) relación de flujo térmico y rápido en estado BOL a lo largo del eje X, e) CEW, f) coeficientes de realimentación de temperatura de agua, g) coeficiente de realimentación de densidad de agua, h) coeficiente de realimentación de temperatura de combustible y i) coeficiente de realimentación de vacío. Se logró buena concordancia entre los resultados del autor y el promedio de los participantes.

CAPITULO 3: BENCHMARK EXPERIMENTAL DEL RA-6

3.1. Introducción.

El RA-6 es un reactor de investigación de tipo piletta abierta que emplea combustible del tipo placa MTR. Se encuentra ubicado en el Centro Atómico de la ciudad de San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. Fue puesto en marcha en 1982 por INVAP. El núcleo en esa época utilizaba un combustible gastado de Alto Enriquecimiento de Uranio (HEU) producido por el reactor de investigación RA-3 ubicado en Ezeiza, Argentina. El combustible HEU tenía un enriquecimiento de alrededor de 90% de meat de combustible $UAl_x - Al$. La potencia del núcleo era de 0.5 MW.

En el año 2008 el núcleo cambió a combustible de Bajo Enriquecimiento de Uranio (LEU) con menos de 20% de enriquecimiento. La potencia del núcleo convertido fue mejorada a 3 MW. El nuevo elemento combustible tiene meat de $U_3Si_2 - Al$ con envainado de aluminio. Alambres de cadmio se ubican a lo largo de la dirección axial del elemento combustible con el fin de reducir la alta reactividad en la carga inicial y minimizar perturbaciones en el núcleo. El Elemento de Control (EC) es del tipo horquilla con hojas que encajan en placas guía.

Uno de los procedimientos de puesta en marcha del nuevo núcleo fue la carga de los elementos combustibles. El número mínimo de elementos combustibles en el núcleo dependió del estado crítico del núcleo, para lo cual la masa de uranio se aproximó a la criticidad. La configuración crítica inicial del núcleo se definió como la primera configuración crítica de núcleo (Núcleo número 7), mientras que la configuración crítica final del núcleo se definió como la primera configuración operativa del núcleo (Núcleo número 11).

Para la primera configuración crítica del núcleo se establecieron 16 Elementos Combustibles Normales (ECN) y 4 Elementos Combustibles de Control (ECC) y se utilizó agua liviana como reflector. El primer núcleo operativo contó con 15 ECN y 5 ECC y como reflector se utilizó grafito y agua liviana.

El experimento de aproximación a la criticidad por elementos de control fue registrado para ambas configuraciones de núcleo (El primer núcleo crítico y el primer núcleo operativo).

En la primera configuración operativa de núcleo se llevaron a cabo una serie de medidas de seguridad. Este capítulo se centra en los siguientes parámetros de seguridad: Peso de Elemento de Control (CEW), reactividad en exceso, Margen de Antirreactividad (MA), MA con falla única de un elemento de control, coeficiente de realimentación isotérmica, coeficiente de realimentación de vacío, coeficiente de realimentación de potencia y parámetro α -cinético. El CEW se obtuvo a partir del experimento de calibración en reactividad de elementos de control donde a la vez se obtuvieron los puntos críticos que luego fueron empleados luego para el cálculo de criticidad.

El propósito de este capítulo es presentar una validación de la línea de cálculo determinístico (CONDOR2.62 – CITVAP3.8) para la primera configuración de núcleo crítico y la primera configuración operativa contra las mediciones experimentales anteriormente mencionadas.

3.2. Especificaciones del RA-6

En esta sección se proveen especificaciones materiales y geométricas del RA-6 para los valores promedio medidos [13].

3.2.1. Datos de Materiales.

3.2.1.1. Composición del meat.

El meat está compuesto de siliciuro de uranio disperso en una matriz de aluminio natural. Las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 presentan la composición del meat de combustible, la composición isotópica del uranio y las impurezas del meat de combustible, respectivamente.

Tabla 3.1: Composición del meat de combustible

Meat	$U_3Si_2 - Al$
Enriquecimiento	19,77 % (en peso)
Masa de U por placa combustible	90,36 g
Masa de Al por placa combustible	25,836 g
Densidad de U	4,772 g/cm ³
Densidad de Si	0,390 g/cm ³
Densidad de Al	1,364 g/cm ³

Tabla 3.2: Composición isotópica del uranio

Isótopo	Composición (% en peso)
U-235	19,77
U-238	79,974
U-234	0,144
U-236	0,112

Tabla 3.3: Contenido de impurezas en el meat

EBC* en U_3Si_2	3,09 ppm
EBC in Al	13,7 ppm

*EBC: Contenido de boro equivalente

La Tabla 3.4 muestra la composición homogeneizada del meat, la cual se utilizó en los archivos de entrada de CONDOR como material homogéneo único que incluye todos los contenidos de subelementos en porcentaje de peso.

Tabla 3.4: Composición homogénea del meat

Densidad del meat	6,49095 g/cm ³
Contenido de U-234 en el meat	0,105866 %
Contenido de U-235 en el meat	14,5345 %
Contenido de U-236 en el meat	0,0823399 %
Contenido de U-238 en el meat	58,7951 %
Contenido de Al en el meat	20,6923 %
Contenido de Si en el meat	5,78942 %
Contenido de B en el meat	5,285508E-04 %

3.2.1.2. Composición de la vaina.

En la Tabla 3.5 se presenta la composición del Al-6061, perteneciente a la vaina del meat, mientras que la Tabla 3.6 indica su impureza.

Tabla 3.5: Composición del Al-6061

Densidad	2,7 g/cm ³
Al	97,599 % (en peso)
Cu	0,26 % (en peso)
Cr	0,11 % (en peso)
Mg	0,99 % (en peso)
Si	0,67 % (en peso)
Zn	0,001 % (en peso)
Fe	0,27 % (en peso)
Mn	0,09 % (en peso)
Ti	0,01 % (en peso)

Tabla 3.6: Impureza en el material de la vaina de Al-6061

Elemento	Valor máximo [ppm]	Valor seleccionado *[ppm]
Cadmio	30	5
Litio	40	1
Cobalto	60	60
Boro	10	10

* Valores provistos por el grupo de fabricación de combustible como mejor estimación.

3.2.1.3. Veneno quemable.

Como veneno quemable se utilizó de cadmio con 99,9 % de pureza y densidad de 8,65 g/cm³. La Tabla 3.7 presenta el contenido máximo de impurezas de cadmio.

Tabla 3.7: Impurezas en el veneno quemable (cadmio)

Elemento	Valor máximo [ppm]	Valor seleccionado* [ppm]
Boro	10	5
Cobalto	10	5
Plata	100	50

*Se asumió que las impurezas equivalen a la mitad del valor máximo.

3.2.1.4. Materiales estructurales.

Los materiales estructurales fueron las placas laterales, las vigas, las boquillas, y las placas guías de los elementos de control. Estos materiales estructurales fueron fabricados de Al 6061-T6 o 6061-T651. No se indicó su composición química ni su densidad, por lo que se asumió Al-6061 para todos los materiales estructurales.

3.2.1.5. Composición del absorbente del elemento de control.

Como material absorbente del EC se utilizó AgInCd. La Tabla 3.8 indica su composición.

Tabla 3.8: Composición de AgInCd

Densidad	10,17 g/cm ³
Cd	5,20 (% en peso)
In	14,9 (% en peso)
Ag	79,9 (% en peso)

3.2.1.6. La vaina del elemento de control, tapón inferior y soporte superior.

La vaina del elemento de control, tapón inferior y soporte superior estaban compuestas de acero inoxidable tipo AISI 304L, ver Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Composición del acero inoxidable tipo AISI 304L

	Referencia [13] (% en peso)	Valores seleccionados* (% en peso)
Densidad	-	7,99 g/cm ³
Fe	Equilibrio	69,5225 %
Ni	8 – 12 %	10 %
Cr	18 – 20 %	19 %
Si	< 0,75 %	0,375 %
Mn	< 2 %	1 %
C	< 0,03 %	0,015 %
S	< 0,03 %	0,015 %
P	< 0,045 %	0,0225 %
N	< 0,1 %	0,05 %

* Valores basados en la mitad de los valores de referencia.

3.2.1.7. Grilla de soporte de núcleo.

Para la grilla de soporte de núcleo se utilizó aluminio de 99,5% de pureza. Su composición y densidad no fueron especificadas.

3.2.1.8. Filtro de terapia por captura de boro (BNCT).

El filtro BNCT se compuso de ladrillos de aluminio y alúmina (Al_2O_3) y de hojas de cadmio, todo de pureza nuclear. Se midió la densidad de la alúmina y se obtuvo un valor de $3,96 \text{ g/cm}^3$. No se especificaron las densidades del aluminio ni del cadmio por lo que se asumió materiales puros con densidad de $2,7 \text{ g/cm}^3$ y $8,65 \text{ g/cm}^3$ respectivamente.

3.2.1.9. Agua de la pileta del reactor.

Durante las mediciones la pileta del reactor se llenó de agua liviana desmineralizada a equilibrio. Según las especificaciones, las impurezas del agua no deberían exceder los límites indicados en la Tabla 3.10. En los casos de mediciones donde no se indicaba la temperatura del agua, se asumió que ésta sería de 24°C , lo que corresponde a una densidad de $0,9972994 \text{ g/cm}^3$.

Tabla 3.10: Impurezas en el agua de la pileta del reactor

Elemento	Valor máximo [ppm]	Valor seleccionado* [ppm]
Hierro	0,01	0,005
Cobre	0,01	0,005
Cloro	0,2	0,1

*Se asumió que la impureza es igual a la mitad del valor máximo.

3.2.1.10. Bloques de grafito.

Para la primera configuración operativa del núcleo se utilizó grafito como reflector neutrónico. La densidad del grafito fue de $1,87 \text{ g/cm}^3$. Las impurezas del grafito no fueron informadas. Se asumió 1 ppm de impureza de EBC.

3.2.2. Datos Geométricos.

3.2.2.1. Elemento Combustible Normal (ECN).

La Tabla 3.11 muestra un resumen de los valores medidos promedio del ECN.

Tabla 3.11: Datos geométricos medidos para ECN

Longitud total [cm]	91,5	
Sección transversal de ECN (Ancho x Espesor), [cm]	7,6 x 8,0	
Características de las placas combustible		
	Placas internas	Placas externas
Cantidad	17	2
Dimensiones (LxAxE), [cm]	67,1 x 7,05 x 0,149	73,5 x 7,05 x 0,149
Paso de la placa combustible, [cm]	0,42	
Espacio de agua entre placas combustibles, [cm]	0,271	
Material de la vaina	Al-6061	
Meat del combustible		
Material	U ₃ Si ₂ - Al	
Dimensiones (LxAxE), [cm]	62,3 x 6,0 x 0,05066	
Venenos quemables		
Material	Alambre de cadmio	
Cantidad (por placa lateral)	10	
Longitud, [cm]	50, centrados a la altura del meat	
Diámetro, [cm]	0,0485	
Ubicación	<i>Contando a partir de las placas combustible externas, estos alambres de cadmio se ubican a ambos extremos de las placas número 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17 y 19</i>	
Placas laterales		
Material	Al-6061	
Dimensiones (LxAxE), [cm]	78 x 8,0 x 0,5	
Ranuras de placas combustible		
	Internas	Externas
Cantidad (por placa lateral)	17	2
Dimensiones (LxAxE), [cm]	73,5 x 0,16 x 0,025	78 x 0,16 x 0,025
<i>Nota: Estas ranuras de placa combustible se llenan de agua y son ranuradas en las placas laterales</i>		

Tabla 3.11 (continuación): Datos geométricos medidos para ECN

Ranuras de alambres de cadmio		
	Internas	Externas
Cantidad (por placa lateral)	8	2
Dimensiones (LxAxE), [cm]	65,5 x 0,06 x 0,05	70,0 x 0,06 x 0,05
<i>Nota: Estas ranuras de alambre de cadmio están llenas de agua y ranuradas en las placas laterales</i>		
Información general		
Espacio de agua entre elementos combustibles, [cm]	0,1	

3.2.2.2. Elemento Combustible de Control (ECC).

Los datos de los ECC y de los EC se resumen en las tablas 3.12 y 3.13, respectivamente.

Tabla 3.12: Datos geométricos medidos para ECC

Longitud total, [cm]	161,1
Sección transversal ECC (Ancho x Espesor), [cm]	7,6 x 8,0
Características de las placas combustible	
	Sólo placas internas
Cantidad	14
Dimensiones (LxAxE), [cm]	67,1 x 7,05 x 0,149
Paso de la placa combustible, [cm]	0,41
Espacio de agua entre placas combustibles, [cm]	0,261
Material de la vaina	Al-6061
Meat del combustible	
Material	U ₃ Si ₂ – Al
Dimensiones (LxAxE), [cm]	62,3 x 6,0 x 0,05066
Veneno quemable	
Material	Alambre de cadmio
Cantidad (por placa lateral)	8
Longitud, [cm]	50, centrado a la altura del meat
Diámetro, [cm]	0,0485
Ubicación	<i>Contando desde las placas combustible externas, estos alambres de cadmio se ubican a ambos lados de las placas número 1, 3, 5, 7, 8, 10, 12 y 14</i>
Placas laterales	
Material	Al-6061
Dimensiones (LxAxE) [cm]	78 x 8,0 x 0,5

Tabla 3.12 (continuación): Datos geométricos medidos para ECC

Las dimensiones de las ranuras de placas combustible y de ranuras de alambres de cadmio son las mismas para ECN y ECC		
Placas guía*		
	Interna	Externa
Cantidad	2	2
Dimensiones (LxAxE), [cm]	67,1 x 7,05 x 0,13	78 x 7,05 x 0,13
Material	Al-6061	
Ranuras de placa guía		
	Interna	Externa
Cantidad (por placa lateral)	2	2
Dimensiones (LxAxE), [cm]	73,5 x 0,025x 0,13	78 x 0,025 x 0,13
<i>Nota: Estas ranuras de placa guía se llenan con agua y ranuradas en placas laterales</i>		
Información general		
Espacio de agua entre la placa combustible y la placa guía interna, [cm]	0,2705	
Espacio de agua entre las placas guía interna y externa, [cm]	0,61	
Espacio de agua entre los elementos combustibles, [cm]	0,1	

* Las placas guía se modelaron con forma rectangular preservando su volumen

Tabla 3.13: Datos geométricos medidos para elemento de control

Geometría del elemento de control: Tipo horquilla con hojas que encajan en placas guía	
Cantidad (por ECC)	2
Placa absorbente	
Material	Aleación de AgInCd
Dimensiones (LxAxE), [cm]	63,4 x 6,18 x 0,22
<i>Nota: Posee bordes semicirculares y una muesca circular de 0,1 cm de profundidad con radio de curvatura de 0,1625 cm en su lado positivo</i>	
La vaina del elemento de control	
Material	Acero inoxidable tipo AISI 304L
Dimensiones (LxAxE), [cm]	86,7 x 6,49 x 0,43
Espacio interno en la vaina	
Dimensiones (LxAxE), [cm]	63,4 x 6,35 x 0,29
<i>Nota: este espacio interno es donde se ubica la placa AgInCd. Se observa una pequeña de vacío entre el espacio interno y la placa AgInCd.</i>	

Tabla 3.13 (continuación): Datos geométricos medidos para el elemento de control

Información general	
Recorrido del elemento de control, [cm]	63,0
<i>Nota: El elemento de control se ubica en el centro del espacio de agua entre las placas guía</i>	

3.2.2.3. Caja de irradiación.

La caja de irradiación comprende un bloque de aluminio con un agujero lleno de agua, ver Tabla 3.14.

Tabla 3.14: Datos geométricos medidos para la caja de irradiación

Características del bloque de aluminio		
	Bloque de Al externo	Bloque de Al interno
Dimensiones (LxAxE), [cm]	105,7 x 7,81 x 7,63	89,2 x 7,1 x 6,9
Material	Aluminio natural	

3.2.2.4. Bloque de grafito.

El bloque de grafito está compuesto de un bloque de aluminio con un agujero en el que se ubica un bloque de grafito, ver Tabla 3.15.

Tabla 3.15: Datos geométricos medidos para el bloque de grafito

Características del bloque de aluminio		
	Bloque de Al externo	Bloque de Al interno
Dimensiones (LxAxE), [cm]	72,9 x 7,81 x 7,63	67,6 x 7,08 x 6,9
Material	Aluminio natural	
Características del bloque de grafito		
Dimensiones (LxAxE), [cm]	67,5 x 7,0 x 6,8	
Material	Grafito	
<i>Nota: el espacio entre el bloque de Al interno y el bloque de grafito es vacío</i>		

3.2.2.5. Filtro BNCT.

El filtro BNCT está compuesto por ladrillos de aluminio, hojas de cadmio y ladrillos de alúmina, ver Tabla 3.16.

Tabla 3.16: Datos geométricos medidos para el filtro BNCT

Ladrillos de aluminio		
	Primero	Segundo
Dimensiones (LxAxE), [cm]	82,35 x 77,1 x 17	82,35 x 77,1 x 10
Ubicación	<i>El primer ladrillo de aluminio se extiende 17 cm desde la primera fila de la grilla del núcleo, a lo que sigue la primera hoja de cadmio. Luego viene el segundo ladrillo de aluminio, de 10 cm de espesor</i>	
Material	Aluminio natural	
Hojas de cadmio		
Dimensiones (LxAxE), [cm]	82,35 x 77,1 x 0,15	
Ubicación	<i>Hay dos hojas de cadmio: la primera luego del primer ladrillo de aluminio y la segunda luego del segundo ladrillo de aluminio</i>	
Material	Cadmio	
Ladrillos de alúmina		
Dimensiones (LxAxE), [cm]	82,35 x 77,1 x 60,3	
Ubicación	<i>Los ladrillos de alúmina comienzan con la segunda hoja de cadmio y terminan al final de la pileta del reactor</i>	
Material	Alúmina (Al ₂ O ₃)	

3.2.2.6. Pileta del reactor y grilla soporte de núcleo.

La pileta del reactor es cilíndrica y fabricada de acero inoxidable, de 2,4 m de diámetro y 10,4 m de altura. La grilla del núcleo se ubica a una profundidad de 9,9 m, y es de forma rectangular de 8x10 posiciones, ubicada sobre una estructura de apoyo. El espesor de la grilla es de 20 cm de aluminio de 99,5% de pureza. El centro de la grilla del núcleo coincide con el eje vertical de la pileta del reactor.

3.2.2.7. Configuración del núcleo.

Las figuras 3.1 y 3.2 presentan la primera configuración crítica y la primera configuración operativa del núcleo.

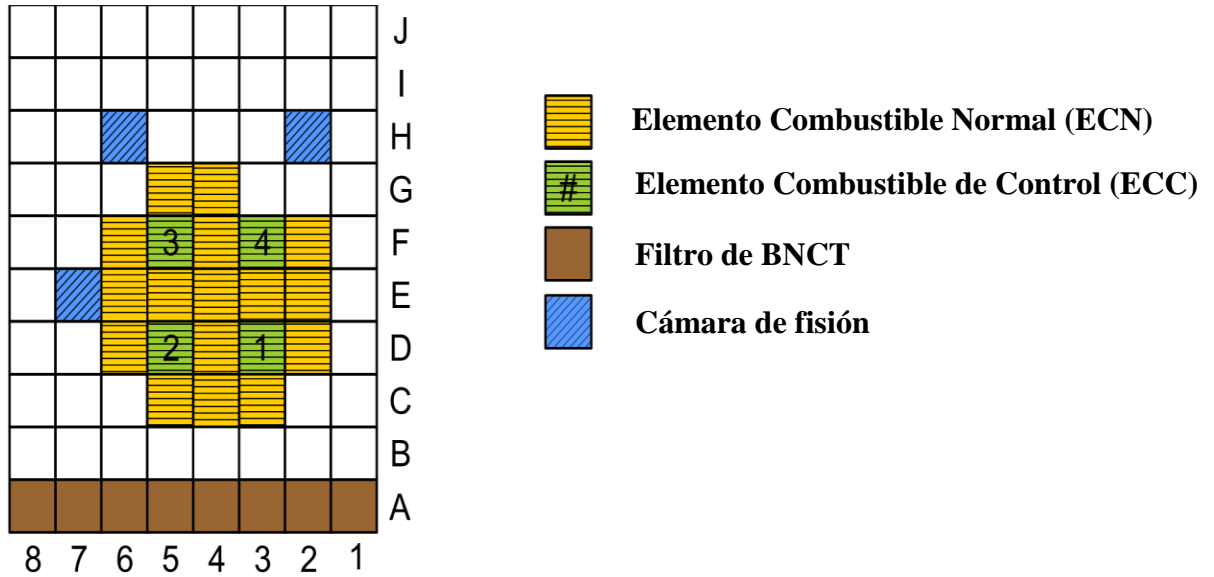


Fig. 3.1: Primera configuración crítica del núcleo (Núcleo número 7) [16]

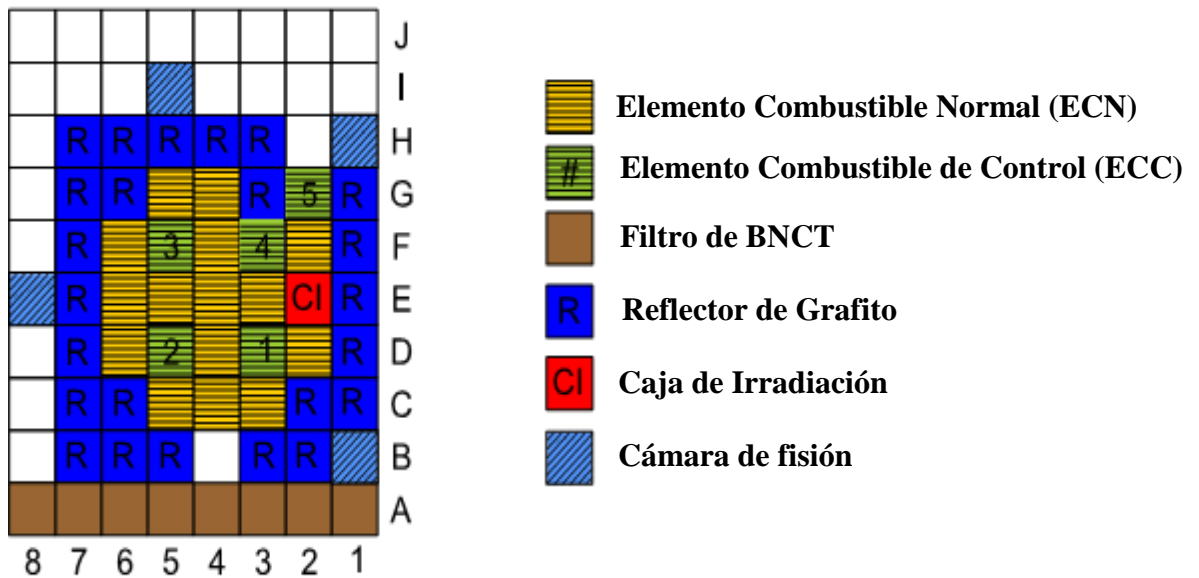


Fig. 3.2: Primera configuración operativa del núcleo (Núcleo número 11) [16]

3.3. Modelos de Cálculo.

Los modelos de cálculo involucran modelos de celda y modelos de núcleo. En el inciso “descripción del modelo” se presentan los criterios asumidos durante el modelado del núcleo. Luego se muestran los siguientes modelos de cálculo de celdas: ECN, ECC, reflector de grafito, caja de irradiación, filtro BNCT y reflector de agua. Por último, se presentan los modelos de cálculo de núcleo de ambas configuraciones de núcleo.

3.3.1. Descripción del Modelo.

Criterios asumidos durante el modelado del núcleo:

- Los isótopos que no existían en la biblioteca ESIN 2001 fueron omitidos debido a su contenido más bajo. Estos isótopos que pertenecen al material estructural Al-6061. Los isótopos omitidos y sus contenidos son: Zn (0,001 % en peso) y Li (1 ppm).
- Se emplearon los valores promedio medidos en lugar de valores nominales para las especificaciones geométricas y de materiales.
- Se consideró la mitad del contenido máximo de impurezas, a menos que dichas impurezas se especificaran.
- Se modeló el elemento de control y las placas guía como un rectángulo, manteniendo sus volúmenes.
- El vacío en el elemento de control entre la placa de AgInCd y la vaina de acero inoxidable se eliminó al fusionar el vacío a la vaina. Este proceso se llevó adelante bajo la conservación de masa de la vaina. El resultado del proceso fue la reducción de la densidad de la vaina.
- El vacío existente entre el bloque de grafito y la vaina de aluminio se fusionó con la vaina, lo que trajo aparejada la reducción de la densidad de la vaina de aluminio.
- Se decidió un cuarto de los modelos de celdas bidimensionales para ECN y ECC debido a la simetría de ECN y ECC.

3.3.2. Modelos de Cálculo de Celdas.

Los modelos de cálculo de celdas incluyen ECN, ECC, reflector de grafito, caja de irradiación, reflector de agua, y filtro BNCT.

3.3.2.1. Modelo de celda del ECN.

Teniendo en cuenta que el ECN posee alambres de cadmio a lo largo de su dirección axial, se desarrollaron dos modelos de celdas del ECN: uno con alambres de cadmio y otro sin ellos. Sólo se presenta el caso del modelo de celda del ECN con alambres de cadmio, ver Fig. 3.3.

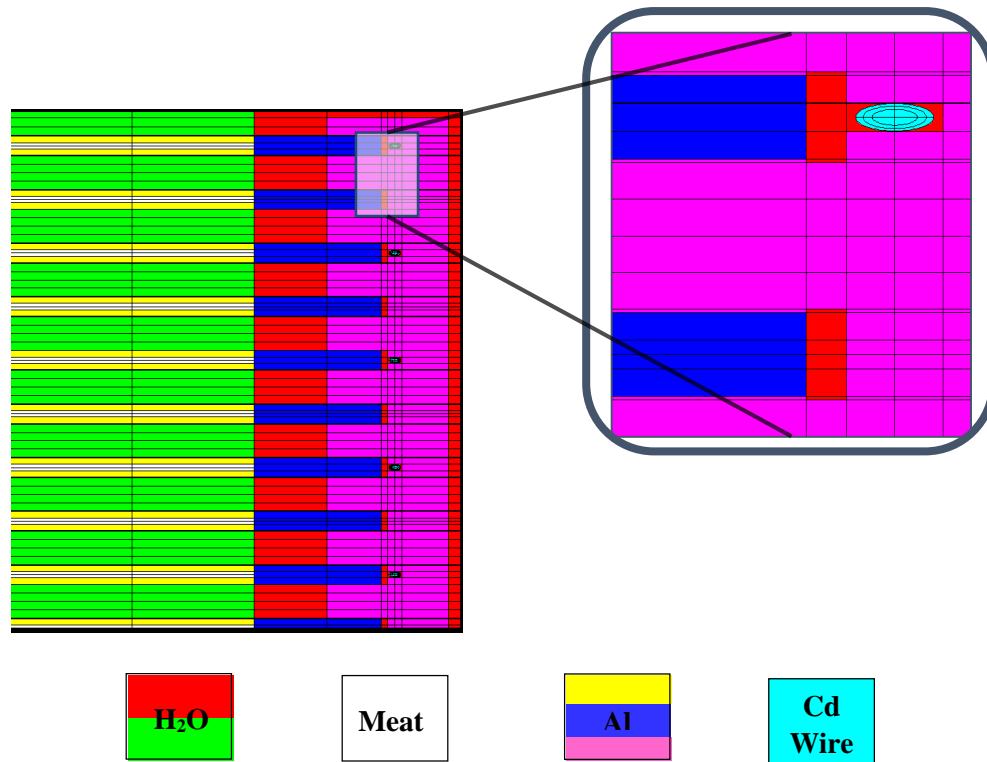


Fig. 3.3: Modelo de ECN 2D, con aproximación al alambre de cadmio a la derecha

La razón de tener diferentes colores para el mismo material obedece al proceso de homogeneización, que tuvo lugar como dos regiones para el cuarto de modelo: la primera región contiene aluminio, agua y alambre de cadmio; mientras que la segunda región posee meat, aluminio y agua, ver Fig. 3.4.

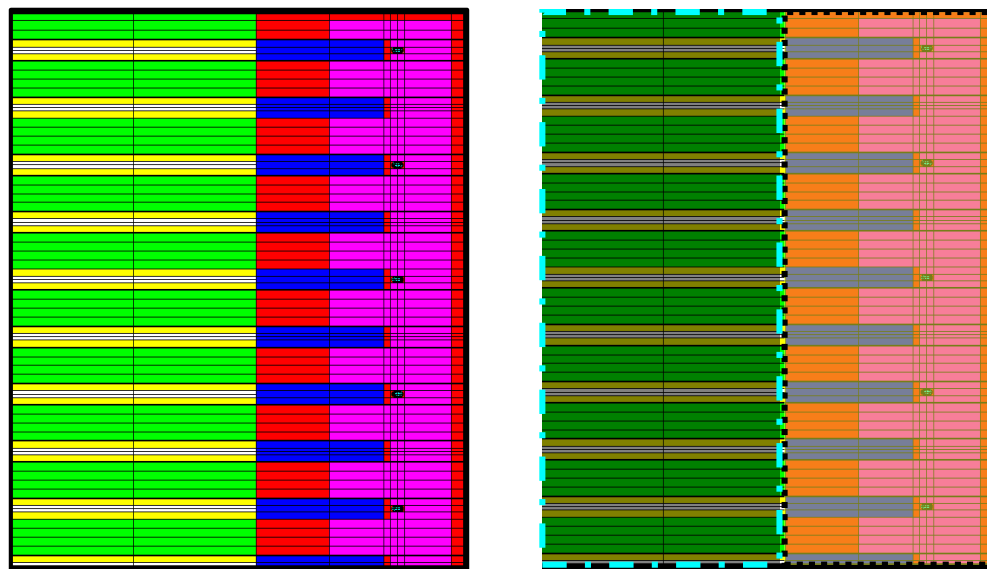


Fig. 3.4: Modelo de celda de ECN (a la izquierda) y modelo homogeneizado (a la derecha)

3.3.2.2. Modelo de celda ECC.

Se modelaron cuatro tipos de modelos de celdas de ECC. El primer modelo tenía el ECC sin los alambres de cadmio, y se extrajo el elemento de control. El segundo modelo tenía el ECC sin los alambres de cadmio pero con el elemento de control insertado. El tercer y el cuarto modelo tenían ambos los alambres de cadmio, el tercero con el elemento de control extraído y el cuarto con dicho elemento insertado.

En esta sección, el modelo de ECC con el alambre de cadmio y el elemento de control insertado se presenta con el adición de un ECN homogéneo alrededor del modelo con el fin de evitar la reflexión del elemento de control, ver Fig. 3.5.

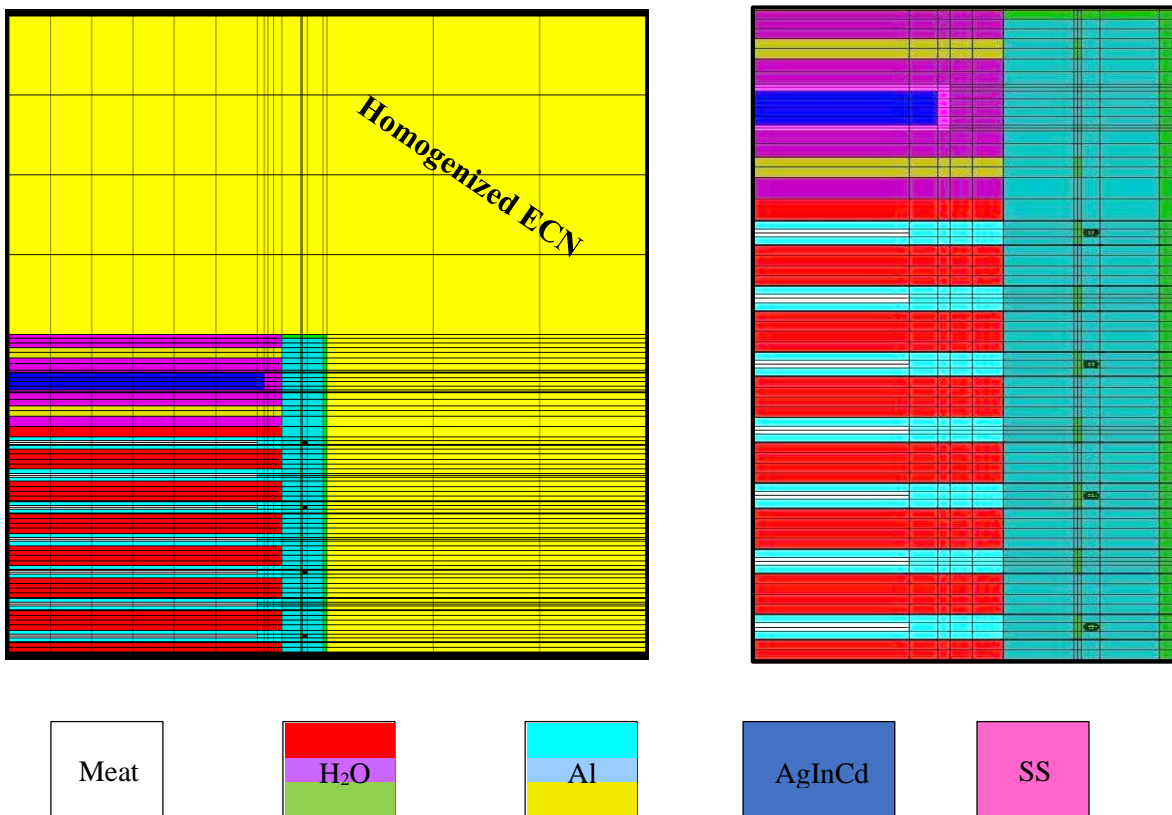


Fig. 3.5: Modelo de celdas de ECC con la placa de AgInCd insertado y con el alambre de cadmio. A la derecha se ve una aproximación al ECC.

Luego de ello, se realizó un proceso de homogeneización como tres regiones para el cuarto de modelo del ECC: la primera región incluye la placa lateral de aluminio con alambres de cadmio y marco de agua, mientras que la segunda región tenía las placas combustible y el agua entre ellas. La tercera región tenía las placas guía de aluminio, el elemento de control, y el agua entre ellas, ver Fig. 3.6.

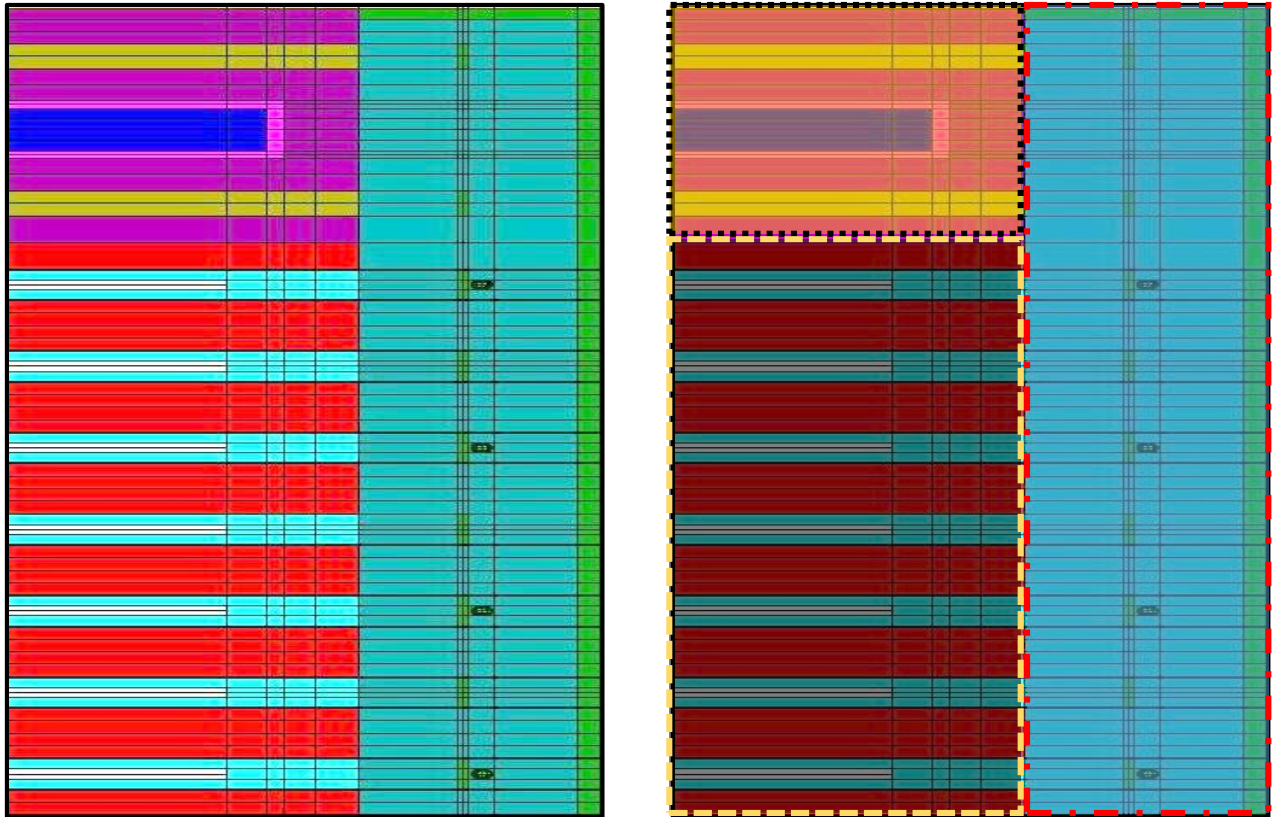


Fig. 3.6: Aproximación al modelo de celdas del ECC (a la izquierda) y modelo homogéneo (a la derecha)

3.3.2.3. Modelos de celdas de bloque de grafito, reflector de agua y caja de irradiación.

Tal como se mencionara anteriormente, hay dos configuraciones de núcleo para analizar. Los bloques de grafito y la caja de irradiación sólo existen en la primera configuración de núcleo operativa. El modelo bidimensional se desarrolló para los bloques de grafito, caja de irradiación y reflector de agua para la primera configuración de núcleo operativa, ver Fig. 3.7, mientras que para la primera configuración de núcleo crítica se desarrolló un modelo de reflector de agua unidimensional. El modelo de reflector de agua tenía 20 cm de reflector de agua: 10 cm de agua cerca del núcleo y 10 cm lejos del núcleo.

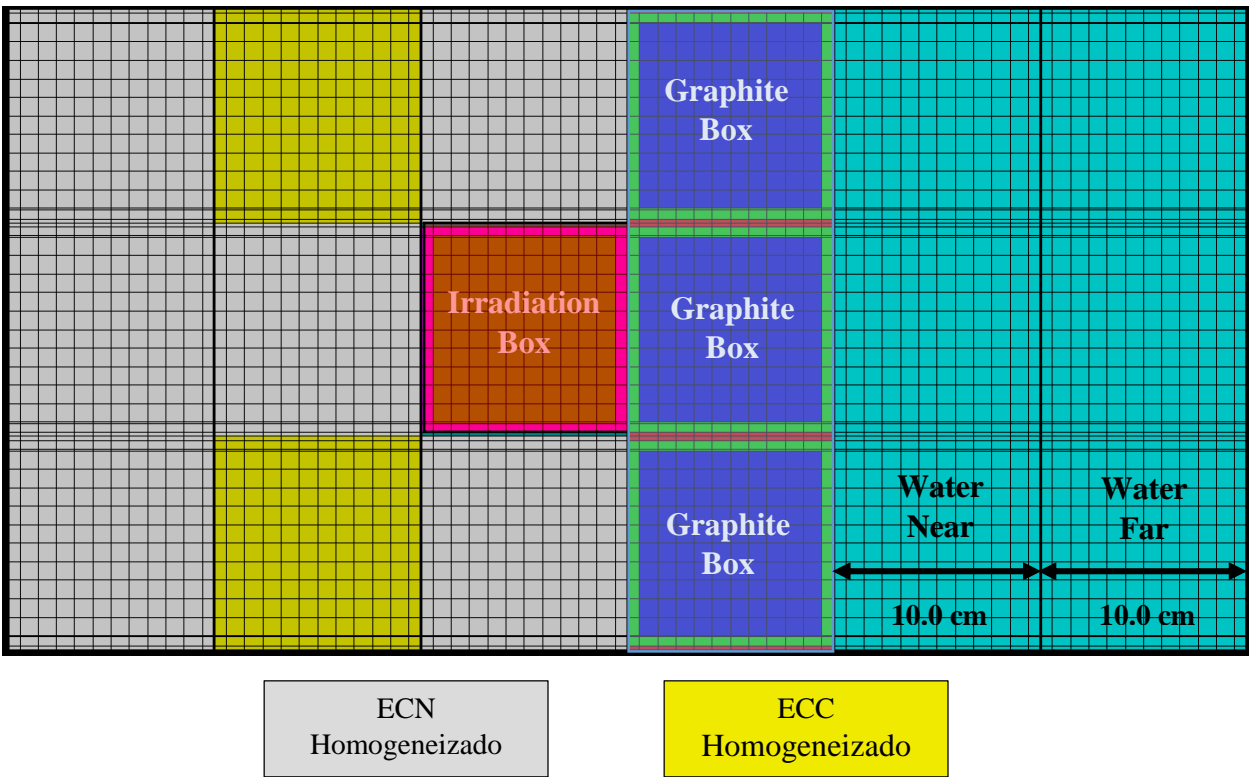


Fig. 3.7: Modelo de celdas de caja de grafito, caja de irradiación y reflector de agua para la configuración de núcleo número 11

El proceso de homogeneización se concretó homogeneizando el bloque de grafito con su caja de aluminio. La caja de irradiación se homogeneizó a través de la homogeneización de la caja de aluminio llena de agua.

3.3.2.4. Modelo de celdas de filtro BNCT.

Se seleccionó un modelo unidimensional a lo largo del eje Y de ambas configuraciones de núcleo para extraer el primer filtro de aluminio de 8,10 cm.

3.3.3. Modelos de Cálculo de Núcleo.

Tridimensionales modelos de núcleo se emplearon para ambas configuraciones de núcleo. En estos modelos se utilizaron 193 mallas a lo largo del eje X, 159 mallas a lo largo del eje Y, y 138 mallas a lo largo del eje Z. El núcleo del reactor se reflejó con agua liviana. La estructura del grupo energético fue de 3 grupos, con un límite inferior de cada grupo de 0,0; 0,625 y 0,821E6 eV. Se aplicó una excepción de una estructura de 10 grupos al calcular los parámetros cinéticos, lo que se explicará más adelante en la sección 3.4. En la dirección Z, se empleó un mapa de canal de una altura de 63 cm y 21 capas axiales, ver Fig. 3.8. Las 21 capas axiales corresponden a 2 capas sin cadmio, 16 capas con cadmio, 2 capas sin cadmio, y la última capa para el aluminio. Las 21 capas axiales no se encontraban equidistantes.

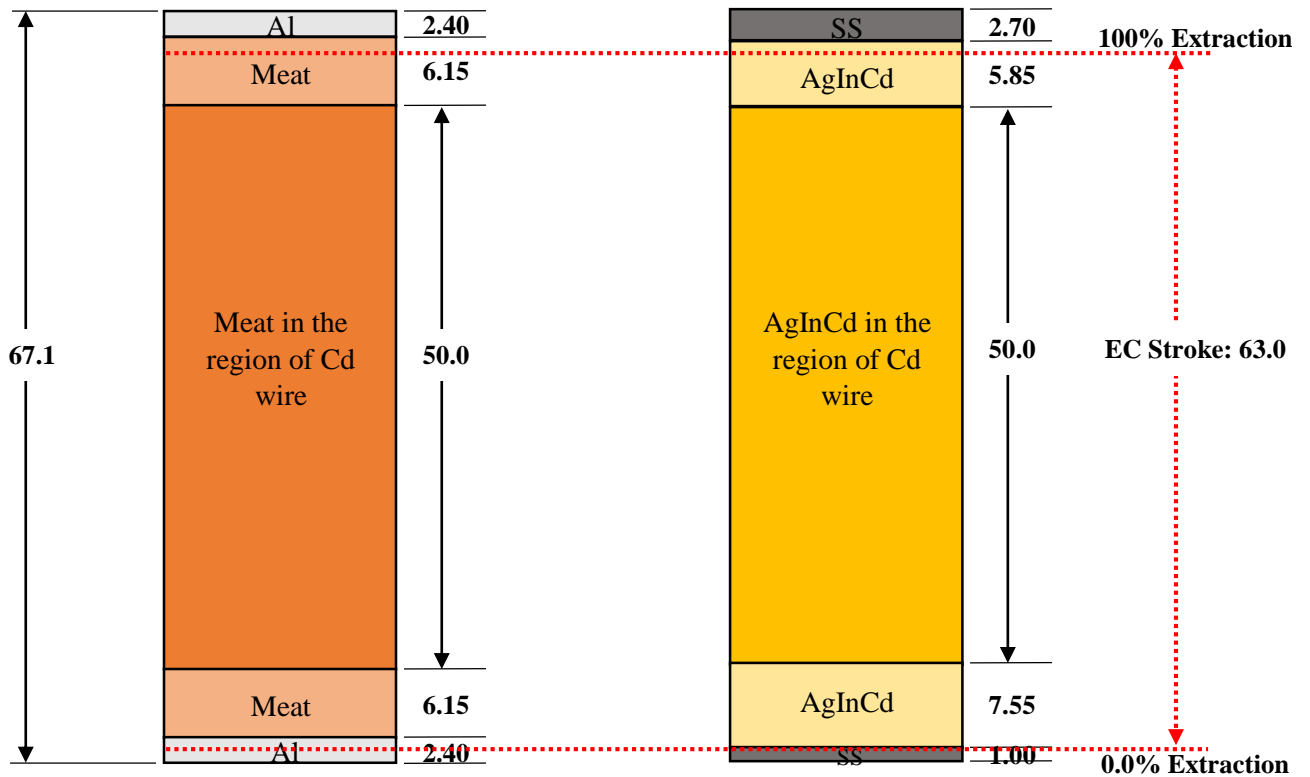


Fig. 3.8: Detalles axiales del modelo de núcleo, meat del elemento combustible (izquierda) y elemento de control (derecha). Todas las dimensiones en cm.

Las figuras 3.9 y 3.10 presentan los detalles radiales de los primeros modelos de núcleo crítico y operativo, respectivamente.

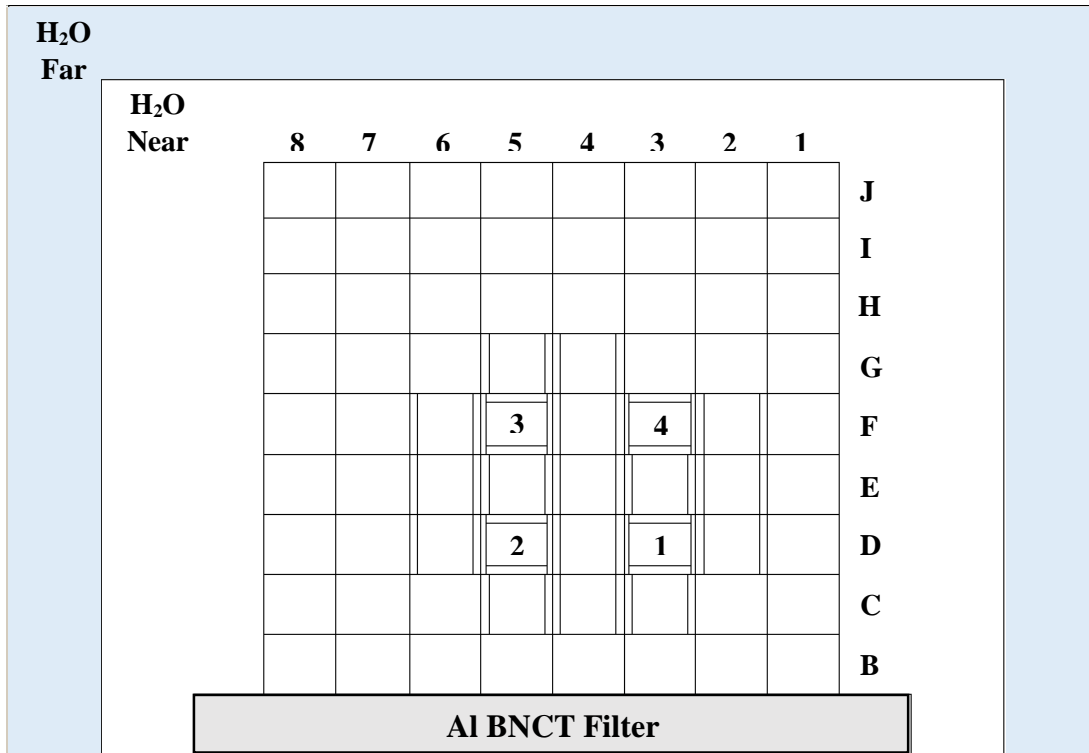


Fig. 3.9: Primer modelo de núcleo crítico, 16 ECN y 4 ECC (32,5 Kg de U)

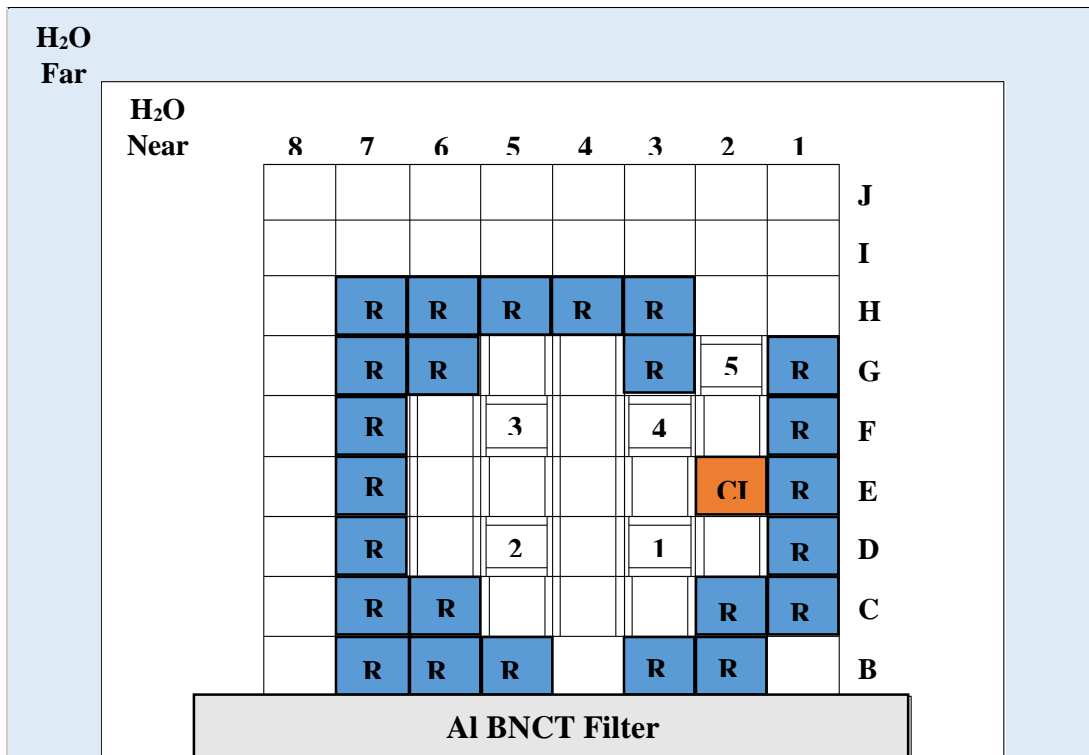


Fig. 3.10: Primer modelo de núcleo operativo, 15 ECN y 5 ECC (32,1 Kg de U)

3.4. Resultados y Análisis.

Las siguientes mediciones se analizaron en profundidad por medio de la línea de cálculo CONDOR2.62-CITVAP3.8: calibración en reactividad de elementos de control, reactividad en exceso, margen de antirreactividad, coeficiente de realimentación isotérmica, coeficiente de realimentación de vacío, coeficiente de realimentación de potencia, y parámetro α -cinético.

Respecto de los datos experimentales, se emplearon las siguientes constantes cinéticas [14] para obtener la reactividad del núcleo, ver tabla 3.17.

Tabla 3.17: Constantes cinéticas empleadas para procesar los datos experimentales del RA-6, [14]

Grupos de neutrones retardados	Fración de neutrones retardados relativa, $\beta_i/\beta_{\text{eff}}$	Constante de decaimiento, λ_i , [s ⁻¹]
1	0,038	0,0127
2	0,213	0,0317
3	0,188	0,1150
4	0,407	0,3110
5	0,128	1,4000
6	0,026	3,8700
	$\beta_{\text{eff}} = 762 \text{ pcm}$	$\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i} = 12,75 \text{ sec}$

3.4.1. Calibración de Elementos de Control.

3.4.1.1. Procedimiento experimental.

La calibración de los elementos de control se midió experimentalmente del siguiente modo: En primer lugar, extracción gradual de un elemento de control dado (EC) a un paso de cerca de un 5%, por lo que el estado del núcleo se tornaría supercrítico. Debido a esta supercriticidad, la población neutrónica se incrementó. En segundo lugar, el aumento de la población neutrónica se registró con el fin de determinar el período del reactor². A partir del período del reactor, se calculó la reactividad de la longitud extraída según la ecuación “*in-hour*” utilizando las constantes cinéticas de la tabla 3.17. En tercer lugar, se insertó otro elemento de control para compensar la reactividad insertada, por lo que el estado del núcleo se tornó crítico nuevamente. Por último, se registró el punto crítico del núcleo [15]. Se repitió el proceso hasta alcanzar la extracción completa del elemento de control.

² Período del reactor: tiempo requerido para que la población neutrónica se multiplique por e.

Los resultados de la medición experimental de la calibración de elementos de control fueron: un gráfico de la reactividad acumulada versus el porcentaje de extracción para cada elemento de control, la determinación del peso de los elementos de control (CEWs) y un registro de puntos críticos y supercríticos.

Los puntos críticos para la primera configuración de núcleo operativa se tomaron del experimento de calibración de elementos de control y un punto único desde la aproximación a la criticidad por los elementos de control. Hubo un único punto crítico registrado para el primer núcleo crítico, que fue informado a partir de la aproximación a criticidad por los elementos de control. La tabla 3.18 presenta la configuración de los elementos de control del experimento de aproximación a la criticidad por elementos de control para el primer núcleo crítico y el primer núcleo operativo.

Tabla 3.18: Configuración de los elementos de control durante la aproximación a criticidad por elementos de control [16]

Elemento de control número	% de extracción	
	Primer núcleo crítico	Primer núcleo operativo
1	100,0%	100,0%
2	100,0%	60,2%
3	100,0%	22,0%
4	59,50%	100,0%
5	-	38,9%

3.4.1.2. Procedimiento de cálculo.

Se simuló el procedimiento experimental empleando los puntos críticos y supercríticos registrados [15]. Los siguientes son los resultados esperados para este paso:

- a) Simulación de cálculo de criticidad empleando todos los puntos críticos registrados.
- b) Gráfico de la reactividad acumulada de los elementos de control versus porcentaje de extracción.
- c) Determinación del peso de cada elemento de control.

3.4.1.3. Resultados y análisis.

En virtud de su importancia, el cálculo de criticidad se presentó en primer lugar como estudio comparativo para cálculos futuros.

Hubo 142 puntos críticos registrados a partir de la calibración de los elementos de control de la primera configuración de núcleo operativa y un punto para la primera configuración de núcleo crítica. El promedio de los resultados y la desviación estándar 1σ de tales puntos críticos se resumen en la tabla 3.19.

Tabla 3.19: Simulación de cálculo de criticidad para todos los puntos críticos registrados³

	Número de puntos críticos	Reactividad [pcm]
Primer núcleo crítico	1	556
Primer núcleo operativo	142	209 ± 109 ⁴

Se graficaron los valores de reactividad de los 142 puntos críticos contra cada punto crítico.

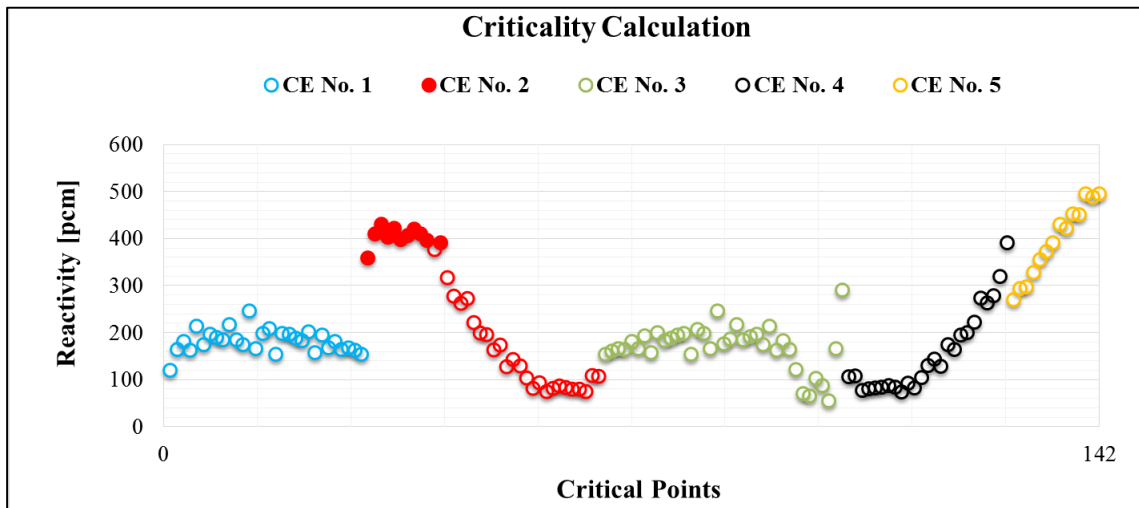


Fig. 3.11: Reactividad calculada para cada punto crítico experimental

La Fig. 3.11 muestra la simulación de criticidad para cada punto crítico registrado. Se observa la existencia de una pendiente de reactividad respecto de la reactividad calculada para los puntos críticos del elemento de control número 2, que comienza a partir del punto crítico número 42 hasta el 66 (fin de los puntos críticos del elemento de control 2). Desde el punto crítico 42 al 66, el elemento de control 2 se calibró contra el elemento de control 4, el que se encontraba muy cercano al elemento de control 5 (el elemento de control fino), ver Fig. 3.2. También se observa un incremento de reactividad para cada punto crítico del elemento de control 5, el que se encontraba al borde del núcleo, donde la fuga neutrónica es importante.

La calibración calculada de elementos de control se muestra en las figuras 3.12 y 3.13, junto con los datos experimentales.

³ Nota: Los siguientes resultados son los resultados finales obtenidos luego del proceso de verificación de la sección 3.5

⁴ Corresponde a desviación estándar 1σ .

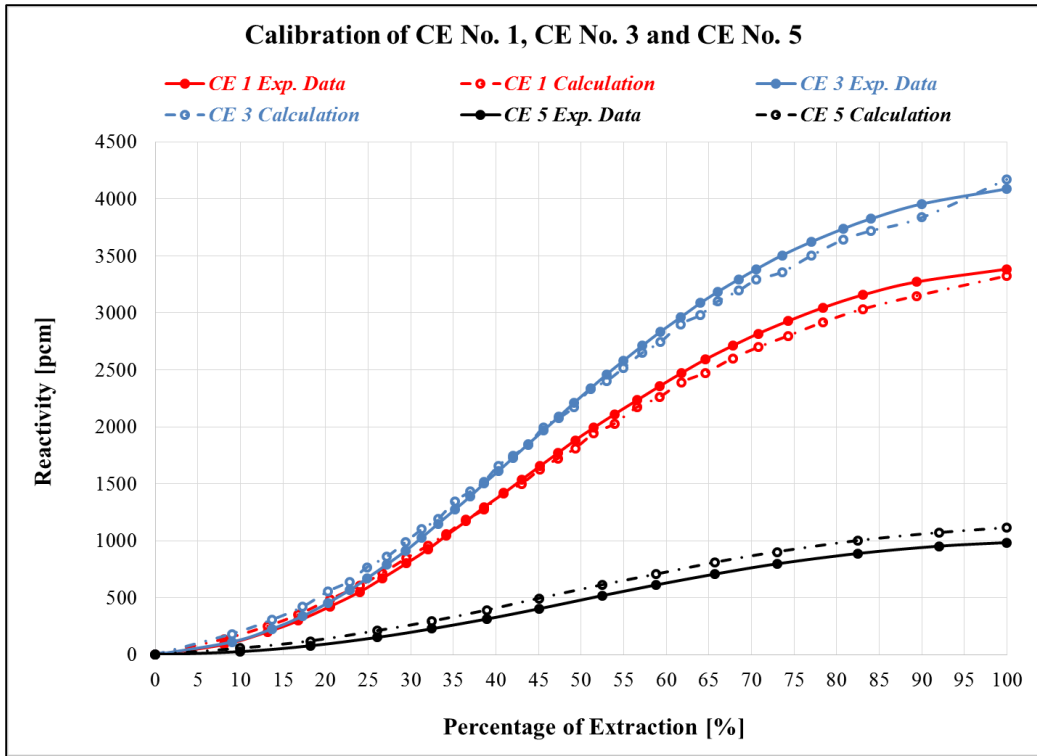


Fig. 3.12: Datos experimentales y valores calculados de la calibración del EC 1, 3 y 5

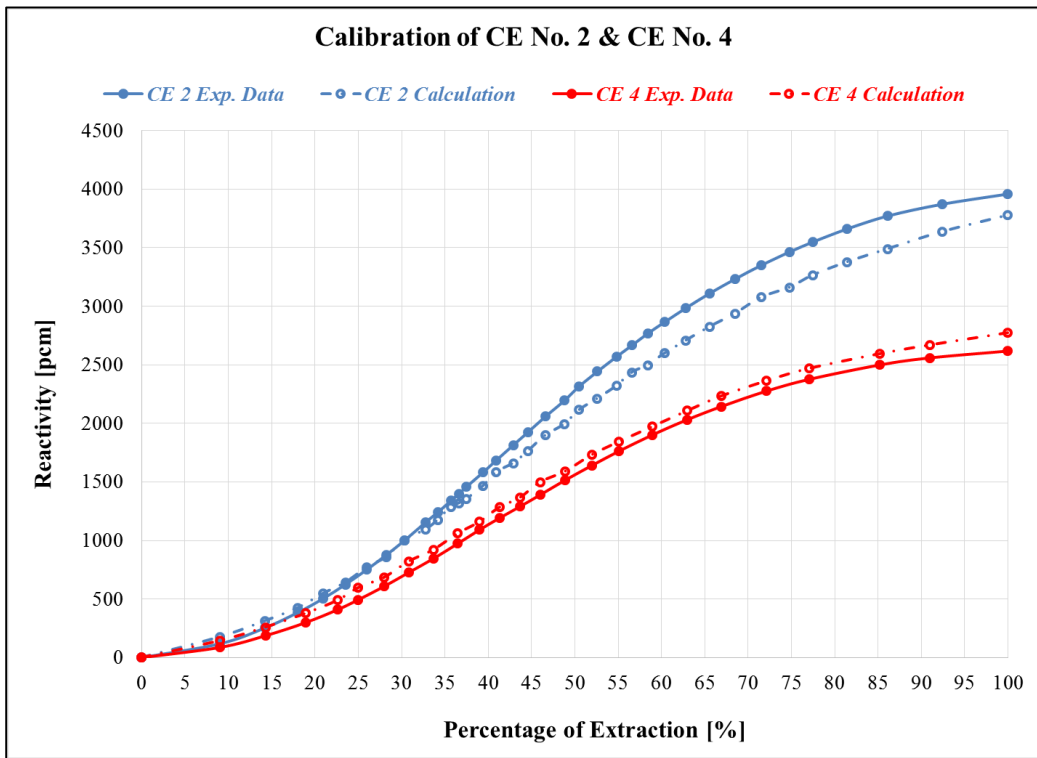


Fig. 3.13: Datos experimentales y valores calculados de la calibración del EC 2 y 4

El peso del elemento de control (CEW) se define como el valor total de reactividad de elemento de control extraída. La tabla 3.20 muestra el CEW para cada elemento de control y una comparación con los datos experimentales.

Tabla 3.20: Peso de elemento de control calculado y medido

	Valor medido, [17] [pcm]	Valor calculado [pcm]	Diferencias respecto del valor medido [%]
CEW 1	3385	3324	2%
CEW 2	3958	3775	5%
CEW 3	4089	4173	2%
CEW 4	2617	2774	6%
CEW 5	985	1115	13%

Se observa que el CEW más alto tuvo lugar en el EC 3. Todas las diferencias de CEW fueron menores al 6%, con excepción de CEW 5 cuya diferencia de valor de reactividad fue mayor. Esta diferencia podría explicarse por el hecho de que EC 5 se encuentra cercano al borde el núcleo, donde la fuga neutrónica es de mayor importancia. Por otro lado, EC 5 es muy cercano a EC 4, en el que un efecto de apantallamiento entre ellos podría estar afectando los resultados.

3.4.2. Reactividad en Exceso y Margen de Antirreactividad.

3.4.2.1. Definición.

La siguiente es una definición de reactividad en exceso y Margen de Antirreactividad (MA):

- **Reactividad en exceso:** Reactividad del núcleo cuando todos los elementos de control se encuentran completamente extraídos.
- **MA:** Reactividad del núcleo cuando todos los elementos de control se encuentran completamente insertados.

3.4.2.2. Procedimiento experimental.

La reactividad en exceso y el MA se calcularon experimentalmente en la misma configuración crítica de los elementos de control [15]. La tabla 3.21, presenta la configuración crítica de elemento de control durante la medición de reactividad en exceso y MA.

La reactividad en exceso fue calculada experimentalmente resumiendo sólo el valor de reactividad de los elementos de control insertados.

El MA fue calculado experimentalmente como la suma de todos los CEWs menos la reactividad en exceso, lo que equivale a la suma del valor de reactividad de los elementos de control extraídos.

La metodología empleada para obtener tanto la reactividad en exceso como el MA se denomina método de período estable.

Tabla 3.21: Configuración crítica de elementos de control durante la medición de reactividad en exceso y MA [15]

Elemento de control	% de extracción
1	32,0%
2	31,2%
3	100%
4	100%
5	100%

3.4.2.3. Procedimiento de cálculo.

La reactividad en exceso y el MA fueron calculados de modo similar al de los datos experimentales, utilizando las curvas de calibración calculadas para los elementos de control, ver figuras 3.12 y 3.13, y la configuración crítica informada de elementos de control.

3.4.2.4. Resultados y análisis.

La tabla 3.22 presenta la reactividad en exceso y el MA calculada y medida.

Tabla 3.22: Datos medidos y valores calculados de reactividad en exceso y MA

Reactividad en exceso y MA					
	Elemento de control	% de extracción	CEW [pcm]	Valor de reactividad de elemento de control extraído [pcm]	Valor de reactividad de elemento de control insertado [pcm]
Valores calculados	1	32,0%	3324	957	2367
	2	31,2%	3775	1035	2740
	3	100%	4173	4173	0,0
	4	100%	2774	2774	0,0
	5	100%	1115	1115	0,0
Reactividad en exceso calculada [pcm]					5107
Reactividad en exceso medida [16] [pcm]					5346
<i>Diferencias entre la reactividad en exceso calculada y medida [pcm, %]</i>					239, 5%
MA calculada [pcm]					-10054
MA⁵ medida [pcm]					-9687
<i>Diferencias entre el MA total calculado y medido [pcm, %]</i>					367, 4%

⁵ Este valor fue calculado por el autor. Durante puesta en marcha se informaron otro valor que corresponde al método de caída de barra integral, al ser más conservador desde la punta de vista de la seguridad.

3.4.3. MA con Falla Única de un Elemento de Control.

3.4.3.1. Definición.

- **MA con falla única de un EC:** Es la reactividad del núcleo cuando todos los elementos de control están completamente insertados menos uno.

3.4.3.2. Procedimiento experimental.

El MA con falla única de un elemento de control fue calculado experimentalmente resumiendo todo el valor de reactividad de elementos de control extraídos menos uno (para simular una falla única). Este modo de calcular el MA con falla única de un elemento de control se denomina método de período estable⁶. La técnica empleada durante la puesta en marcha para medir el MA con falla única de un elemento de control fue el método de caída de barra integral⁷.

El valor más bajo del MA con falla única de un EC posee una importancia en el análisis de seguridad como el peor escenario. Por lo general, este valor está asociado a la falla de EC de mayor peso.

Empleando el método de período estable, el procedimiento para medir el MA debido a una asunción de esquema de falla secuencial en elementos de control se llevó adelante tal como se indica a continuación: En primer lugar, la configuración del núcleo se fijó como crítica empleando todos los elementos de control menos al menos uno. En segundo lugar, resumiendo toda la porción extraída de valor de reactividad de EC menos uno, ergo, para medir el MA con una falla única de un EC. En tercer lugar, este procedimiento se repitió para simular la falla del resto de los EC. El EC 5, excluido de la señal de SCRAM, se ignoró en este procedimiento de falla secuencial.

El método de caída de barra integral, por otro lado, se implementó del siguiente modo: En primer lugar, la configuración de núcleo se fijó en crítica utilizando todos los elementos de control menos al menos uno. En segundo lugar, a partir de esta configuración crítica de elementos de control, todos los elementos de control cayeron en el núcleo menos uno, ergo, simulando el MA con falla del elemento de control no caído. En tercer lugar, este procedimiento se repitió para simular la falla del resto de los elementos de control. Tal como se mencionara antes, el EC 5 se descontó de este procedimiento de falla secuencial.

La tabla 3.23 presenta la configuración crítica de elementos de control durante la medición del MA con falla única de un elemento de control [18].

⁶ El autor utilizó este método para el análisis.

⁷ Para ser conservador desde la punta de vista de la seguridad, se empleó el método de caída de barra integral en lugar del método de período estable.

Tabla 3.23: Configuración crítica de elementos de control durante la medición del MA con falla única de un elemento de control. Los espacios sombreados indican que este elemento de control fue excluido del procedimiento de falla secuencial [18].

	% de extracción				
	EC 1	EC 2	EC 3	EC 4	EC 5 ⁸
Simulando falla de EC 1	100%	100%	28,4%	29,0%	100%
Simulando falla de EC 2	100%	100%	28,4%	29,0%	100%
Simulando falla de EC 3	32,0%	31,2%	100%	100%	100%
Simulando falla de EC 4	32,0%	31,2%	100%	100%	100%

3.4.3.3. Procedimiento de cálculo.

El MA con falla única de EC se simuló empleando la línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP. Se obtuvo a través del procedimiento experimental empleando tanto el método de período estable como el método de caída de barra integral.

3.4.3.4. Resultados y análisis.

El análisis experimental se aplicó en primer lugar para demostrar una comparación entre el método de período estable y el método de caída de barra integral para la medición del MA con falla única de elemento de control.

Las tablas 3.24 y 3.25 muestran los datos experimentales para el método de período estable y el método de caída de barra integral, respectivamente. Se realizó una comparación entre ambos métodos, la cual se presenta en la tabla 3.26.

⁸ EC 5 se excluye de la señal de SCRAM.

Tabla 3.24: Datos experimentales del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de período estable”

Datos experimentales del MA con falla única de EC “Método de período estable”			
Elemento de control	% de extracción	CEW [pcm]	Valor de reactividad de EC extraído [pcm]
1	100%	3385	3385
2	100%	3958	3958
3	28,4%	4089	858
4	29,0%	2617	651
5	100%	985	985
MA con falla de EC 1 [pcm]			-6451
MA con falla de EC 2 [pcm]			-5878
Elemento de control	% de extracción	CEW [pcm]	Valor de reactividad de EC extraído [pcm]
1	32,0%	3385	924
2	31,2%	3958	1056
3	100%	4089	4089
4	100%	2617	2617
5	100%	985	985
MA con falla de EC 3 [pcm]			-5582
MA con falla de EC 4 [pcm]			-7053

Tabla 3.25: Datos experimentales del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de caída de barra integral”

Datos experimentales del MA con falla única de un EC “Método de caída de barra integral”		
Elemento de control	MA con falla única de un EC a partir de la lectura de (CIC⁹ -1) [pcm]	MA con falla única de un EC a partir de la lectura de (CIC -2) [pcm]
1	-5959*	-6924 ¹⁰
2	-5109 ¹⁰	-4737*
3	-5380 ¹⁰	-4882*
4	-6836*	-6837 ¹⁰

*Solamente se informaron el valor reducido entre las dos lecturas, [17].

⁹CIC: Cámara de Ionización Compensada.

¹⁰Valores obtenidos por el autor a través de la aplicación de la ecuación del Anexo B.

Tabla 3.26: Comparación entre el método de período estable y el método de caída de barra integral para la medición experimental del MA con falla única de un elemento de control

Datos experimentales del MA con falla única de un elemento de control			
	Método de período estable [pcm]	Valor promedio del método de caída de barra integral [pcm]	Diferencias [%]
MA con falla de EC 1	-6451	-6442	0,1%
MA con falla de EC 2	-5878	-4923	16%
MA con falla de EC 3	-5582	-5131	8%
MA con falla de EC 4	-7053	-6837	3%

Desde un plano experimental, el método de caída de barra integral posee mayor desviación que el método de período estable. La razón principal de ello es el error inducido por armónicos, desviaciones de la distribución de flujo espacial real medida del modo fundamental. Los armónicos rápidos, una desviación de la distribución de neutrones rápidos del modo persistente, son los que más contribuyen a grandes errores sistemáticos detectados por lo general en la técnica de caída de barra integral. En ubicaciones donde un CIC se encuentra cercano a un elemento de control caído (donde los armónicos son positivos), la reactividad medida es mayor que la otra reactividad medida desde el CIC más lejano.

Es digno de mencionar el hecho de que el más bajo MA con falla única de un elemento de control coincide con la falla del EC 2 al aplicar la técnica de caída de barra integral, mientras que con la técnica de período estable el MA más bajo con falla única de un elemento de control se encontró con la falla de EC 3, que tenía el mayor peso.

Luego de un profundo análisis de los datos experimentales, se simuló el MA con falla única de un elemento de control como procedimiento experimental. Las tablas 3.27 y 3.28 presentan el MA calculado con falla única de un elemento de control empleando dos técnicas diferentes: el método de período estable y el método de caída de barra integral.

Tabla 3.27: Valores calculados del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de período estable”

Valores calculados del MA con falla única de un elemento de control “Método de período estable”			
Elemento de control	% de extracción	CEW [pcm]	Valor de reactividad de EC extraído [pcm]
1	100%	3324	3324
2	100%	3775	3775
3	28,4%	4173	929
4	29,0%	2774	733
5	100%	1115	1115
MA con falla de EC 1 [pcm]			-6552
MA con falla de EC 2 [pcm]			-6101
Elemento de control	% de extracción	CEW [pcm]	Valor de reactividad de EC extraído [pcm]
1	32,0%	3324	957
2	31,2%	3775	1035
3	100%	4173	4173
4	100%	2774	2774
5	100%	1115	1115
MA con falla de EC 3 [pcm]			-5881
MA con falla de EC 4 [pcm]			-7280

Tabla 3.28: Valores calculados del MA con falla única de un elemento de control empleando el “método de caída de barra integral”

Valores calculados del MA con falla única de elemento de control “Método de caída de barra integral”	
Elemento de control	MA con falla única de un elemento de control [pcm]
1	-6026
2	-5161
3	-5250
4	-6550

Se llevó a cabo una comparación entre valores calculados y experimentalmente medidos del MA con falla única de un elemento de control empleando ambas técnicas, tal como se muestra en las tablas 3.29 y 3.30.

Tabla 3.29: Comparación entre valores calculados y experimentalmente medidos del MA con falla única de un elemento de control empleando el “Método de período estable”

Comparación de datos calculados y medidos – “Método de período estable”			
	Valor medido¹¹, [pcm]	Valor calculado [pcm]	Diferencias [%]
MA con falla de EC 1	-6451	-6552	2%
MA con falla de EC 2	-5878	-6101	4%
MA con falla de EC 3	-5582	-5881	5%
MA con falla de EC 4	-7053	-7280	3%

Tabla 3.30: Comparación entre valores calculados y experimentalmente medidos del MA con falla única de un elemento de control empleando el “Método de caída de barra integral”

Comparación de datos calculados y medidos - “Método de caída de barra integral”			
	Valor medido promedio [pcm]	Valor calculado [pcm]	Diferencias [%]
MA con falla de EC 1	-6442	-6026	6%
MA con falla de EC 2	-4923	-5161	5%
MA con falla de EC 3	-5131	-5250	2%
MA con falla de EC 4	-6837	-6550	4%

Se observa que el cálculo empleando el método de período estable arroja una mejor comparación contra los datos experimentales, mientras que se demuestran mayores diferencias en el caso del método de caída de barra integral. Las mayores diferencias se deben al hecho de que no puede presentarse el flujo temporal espacial más allá del método de caída de barra integral empleando la línea de cálculo. Esto es clara evidencia de la explicación previa entre los dos métodos.

¹¹ Valores obtenidos por el autor.

3.4.4. Coeficiente de Realimentación Isotérmica.

3.4.4.1. Definición.

- **Coeficiente de realimentación isotérmica:** Es el cambio de reactividad por unidad de cambio de temperatura, ecuación (3.1).

$$\alpha_T = \frac{\rho - \rho_i}{T - T_i} \quad (3.1)$$

Donde:

α_T : Coeficiente de realimentación isotérmica [pcm/°C]

ρ_i : Reactividad de núcleo de referencia [pcm]

T_i : Temperatura de núcleo de referencia [°C]

3.4.4.2. Procedimiento experimental.

Se llevó adelante el procedimiento experimental para medir el coeficiente de realimentación isotérmica calentando la pileta de agua del reactor de 24,5 a 31,5°C, utilizando la bomba primaria mientras la potencia del reactor se mantenía en 100W_{th} a lo largo de todo el experimento. La tasa de calentamiento fue de 1°C/h. Debido a tal calentamiento, EC 5 fue parcialmente extraído en cada paso para mantener la criticidad del reactor. El porcentaje de extracción de EC 5 fue registrado [19] por cada incremento de paso de 0,5°C. Se registró un total de 15 posiciones críticas (PC).

El coeficiente de realimentación isotérmica se obtuvo experimentalmente a través del siguiente procedimiento¹²:

- A) Restar la reactividad insertada debido a la extracción de EC 5 a respecto de la reactividad previamente insertada. Luego, dividir esta diferencia de reactividad por 0,5°C para obtener el coeficiente de realimentación isotérmica.
- B) Repetir el paso previo por cada incremento de 0,5°C. Se encontró un total de 14 valores de coeficiente de realimentación isotérmica.
- C) Se obtuvo un valor promedio y una desviación estándar 1σ para todos los 14 valores del coeficiente de realimentación isotérmica.

3.4.4.3. Procedimiento de cálculo.

Se empleó la línea de cálculo CONDOR-CITVAP para calcular la reactividad del núcleo asociada a cada PC experimental por cambio de temperatura. El procedimiento de cálculo se implementó del siguiente modo:

- CONDOR: Se generó una biblioteca para todas las secciones eficaces macroscópicas por cada cambio de temperatura de 24,5 a 31,5°C en pasos de 0,5°C.
- CITVAP: Se utilizó CITVAP por cada biblioteca asociada a la temperatura para calcular las reactividades del núcleo para todos los PC registrados experimentalmente.

¹² El autor aplicó este procedimiento para obtener la incertidumbre experimental asociada a las mediciones del coeficiente de realimentación isotérmica. El valor informado en Ref. [17] se obtuvo al tomar la suma del coeficiente de la diferencia en reactividad con una referencia fija a 24,5°C correspondiente a la reactividad sobre el incremento de temperatura, para luego dividir esta suma por todos los puntos.

3.4.4.4. Resultados y análisis.

Se llevó adelante una evaluación de los datos experimentales para determinar la incertidumbre experimental asociada a la medición del coeficiente de realimentación isotérmica. Se obtuvo el coeficiente de realimentación isotérmica al aplicar el procedimiento experimental mencionado anteriormente. La figura 3.14 presenta cada coeficiente de realimentación isotérmica, el valor promedio para todos los coeficientes de realimentación isotérmica y la desviación estándar 1σ asociada.

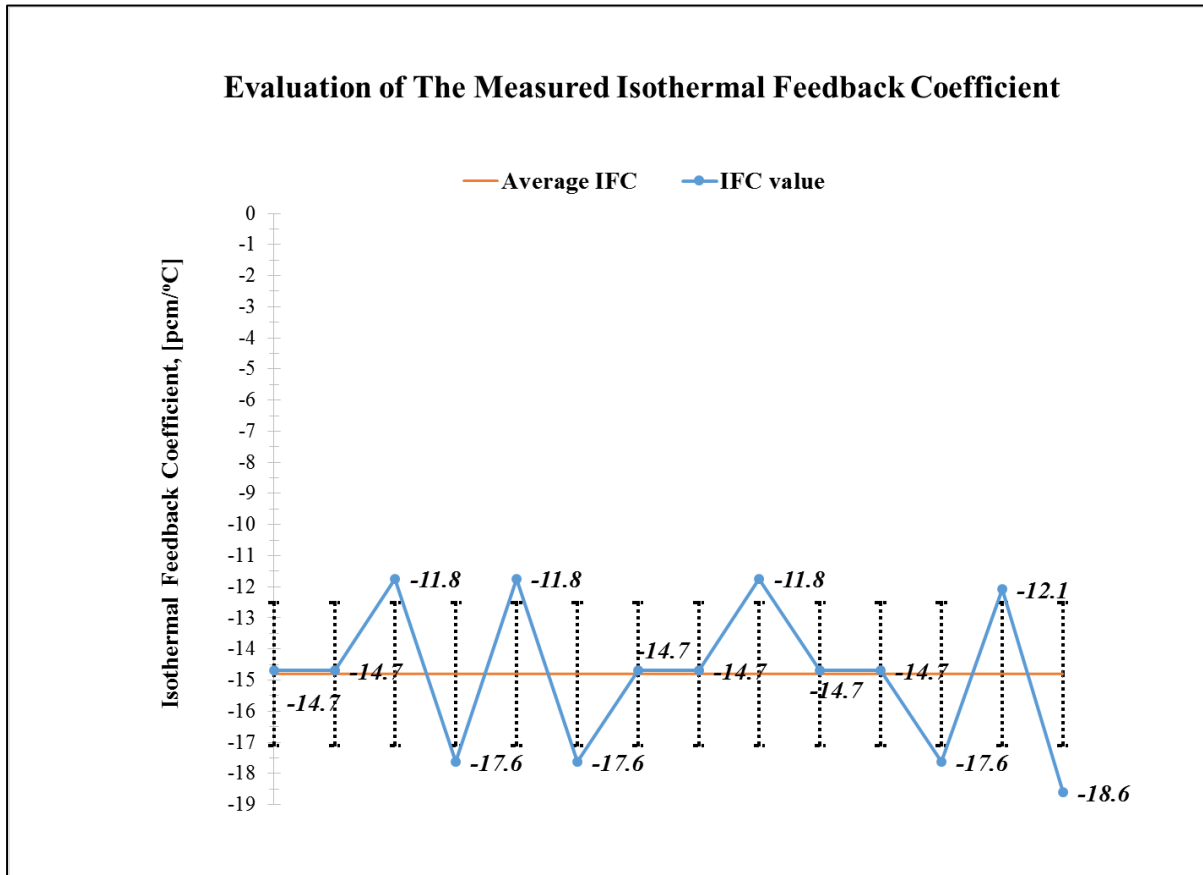


Fig. 3.14: Medición de los coeficientes de realimentación isotérmica

Los procedimientos de cálculo se implementaron para calcular el coeficiente de realimentación isotérmica. Se obtuvo un gráfico de la reactividad del núcleo versus la temperatura para todos los PC informados desde 24,5 hasta 31,5°C, ver Fig. 3.15.

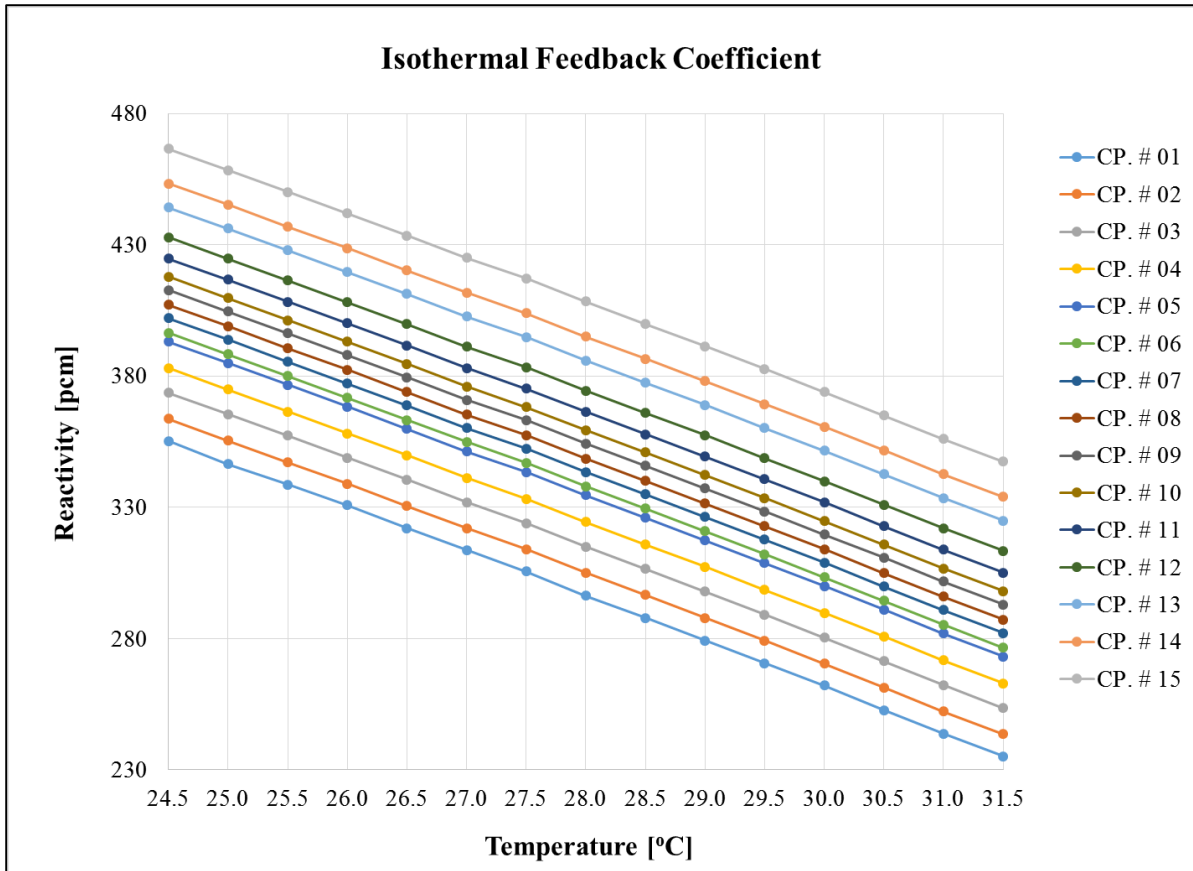


Fig. 3.15: Cálculos de coeficiente de realimentación isotérmica

Un valor promedio para todas las pendientes de estas líneas representa el coeficiente de realimentación isotérmica. La tabla 3.31 presenta los datos experimentales y el valor calculado del coeficiente de realimentación isotérmica.

Tabla 3.31: Coeficiente de realimentación isotérmica calculado y medido

	Coeficiente de realimentación isotérmica [pcm/°C]	Diferencias respecto del valor medido [%]
Valor medido	$-14,80 \pm 2,30^{13}$	16%
Valor calculado	$-17,10 \pm 0,04^{14}$	

Se observa que el valor calculado de coeficiente de realimentación isotérmica se encuadra en el rango de los datos medidos.

¹³ Incertidumbre experimental a una desviación estándar de 1σ . El autor calculó la desviación promedio y estándar.

¹⁴ Incertidumbre estadística a una desviación estándar de 1σ .

3.4.5. Coeficiente de Realimentación de Vacío.

3.4.5.1. Definición.

- **Coeficiente de realimentación de vacío:** Es el cambio de reactividad por cambio porcentual de contenido de vacío, ecuación (3.2)

$$\alpha_v = \frac{\rho_0 - \rho}{f_v} \quad (3.2)$$

Donde:

α_v : Coeficiente de realimentación de vacío [pcm/% vacío]

ρ_0 : Reactividad del núcleo con la presencia de vacío [pcm]

ρ : Reactividad del núcleo sin la presencia de vacío [pcm]

f_v : Porcentaje de contenido de vacío [% vacío]

3.4.5.2. Procedimiento experimental.

El coeficiente de realimentación de vacío se obtuvo experimentalmente introduciendo hojas de aluminio¹⁵ en el séptimo canal de refrigeración contando a partir del filtro BNCT para todos los ECN en el núcleo. EC 5 fue extraído parcialmente debido a la inserción de estas hojas de aluminio con el fin de mantener el estado de criticidad del núcleo. El PC se registró dos veces, ver tabla 3.32. La primera vez tuvo lugar antes de introducir las hojas de aluminio, mientras que la segunda vez fue después de ello. El incremento del nivel de agua debido a la inserción de estas hojas de aluminio representa neutrónicamente una pérdida local de densidad de refrigerante. Dicha pérdida equivale a un cierto porcentaje de contenido de vacío en el núcleo, este porcentaje fue calculado empleando el código MCNP5 por modificando la densidad de agua para todos los ECN y ECC. El resultado de contenido de vacío fue $(1,5 \pm 0,2)$ % vacío [20]. El coeficiente de reactividad insertada sobre el porcentaje de contenido de vacío representa el coeficiente de realimentación de vacío.

Tabla 3.32: Configuración crítica de elementos de control durante la medición del coeficiente de realimentación de vacío [21]

Elemento de control	% de extracción	
	Antes de insertar las hojas de Al	Luego de introducir las hojas de Al
1	100%	100%
2	28,7%	28,7%
3	60,5%	60,5%
4	100%	100%
5	0,0%	48,2%

¹⁵ Una hoja de aluminio posee un ancho de 6,4 cm; un espesor de 0,1 cm; y la altura de la placa interna de un ECN (67,1 cm).

3.4.5.3. Procedimiento de cálculo.

Se simuló el coeficiente de realimentación de vacío empleando la línea de cálculo CONDOR-CITVAP, bajo dos enfoques diferentes:

- A) Simulando el procedimiento experimental exacto al insertar una hoja de aluminio por modelo ECN en la séptima posición del canal de refrigeración, ver fig. 3.16. Se generaron secciones eficaces macroscópicas empleando CONDOR para dos casos: con y sin la hoja de Al. Luego, se obtuvo la diferencia de reactividad de núcleo empleando CITVAP para: en primer lugar, empleando ambas bibliotecas de secciones eficaces macroscópicas (con y sin la hoja de Al) para la configuración crítica del EC cuando las hojas de Al fueron extraídos. En segundo lugar, repitiendo el paso anterior pero usando la configuración crítica del EC cuando las hojas de Al fueron introducidos. Esta metodología para calcular la diferencia de reactividad del núcleo es independiente del movimiento de EC. Se aplicó otra metodología para calcular la diferencia de reactividad del núcleo con dependencia del movimiento del EC, simulando las dos configuraciones críticas del EC (antes y después de la inserción de las hojas de Al) por cada biblioteca de secciones eficaces macroscópicas generadas. Luego, se obtuvieron diferencias de reactividad del núcleo por cada metodología de simulación. El coeficiente de realimentación de vacío para ambos métodos se obtuvo dividiendo la diferencia de reactividad por el porcentaje de contenido de vacío. La tabla 3.33 presenta el valor promedio del coeficiente de realimentación de vacío por cada método.

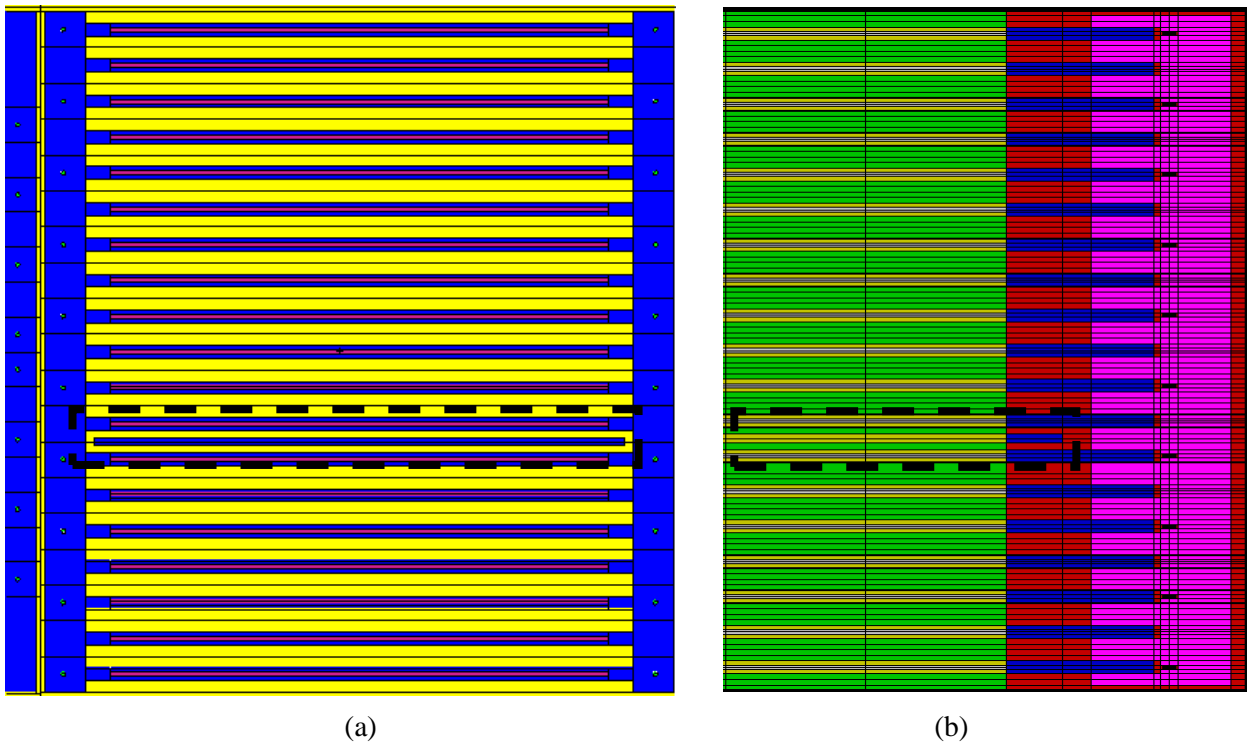


Fig. 3.16: Ubicación de la hoja de Al en el modelo ECN: (a) usando el código MCNP5 [20], (b) usando el código CONDOR

B) La segunda enfoque se logró simulando una reducción en la densidad de agua del ECN y ECC igual a una presencia de 1,5% de vacío. Se generaron dos bibliotecas de secciones eficaces macroscópicas usando CONDOR: una con una densidad de agua reducida a 1,5% en los ECN y ECC, y otra con densidad de agua normal. Luego de ello, se usó CITVAP para calcular la diferencia de reactividad del núcleo usando ambas bibliotecas para cada configuración crítica de EC: a) la que corresponde al caso cuando las hojas de AI no estaban en el núcleo y b) cuando las hojas de AI estaban insertadas. Se obtuvo una diferencia de reactividad del núcleo entre ambas bibliotecas para cada caso. Luego, se calculó el coeficiente de realimentación de vacío tomando la diferencia de reactividad del núcleo obtenida para cada caso sobre 1,5% del contenido de vacío. La tabla 3.33 presenta un valor promedio del coeficiente de realimentación de vacío según este enfoque.

3.4.5.4. Resultados y análisis.

Se calculó el coeficiente de realimentación de vacío mediante dos enfoques, y se lo comparó con datos experimentales, ver tabla 3.33.

Tabla 3.33: Coeficiente de realimentación de vacío calculado y medido

	Coeficiente de realimentación de vacío [pcm/% vacío]	Diferencias respecto del valor medido [%]
Valor medido [16]	-302 ± 27	-
Valor calculado, primer enfoque, método de biblioteca independiente	-359	19%
Valor calculado, primer enfoque, método de movimiento de EC independiente	-290	4%
Valor calculado, segunda enfoque	-304	1%

Se observa que el coeficiente de realimentación de vacío calculado en el primer y segundo enfoque se encuentran dentro del rango de los datos experimentales. Aquí, la segunda enfoque presento una simulación más precisa respecto de los datos experimentales, este es debido que el segundo enfoque simula un monto de vacíos distribuido homogéneamente en el núcleo. Por otra parte, el primer enfoque simula un monto de vacíos distribuido heterogéneamente en el núcleo. Normalmente en reactores de investigación similares, la segunda enfoque muestra una mejor concordancia con datos experimentales.

3.4.6. Coeficiente de Realimentación de Potencia.

3.4.6.1. Definición.

- **Coeficiente de realimentación de potencia:** Es el cambio de reactividad por cambio de potencia, ecuación (3.3).

$$\alpha_P = \frac{\rho - \rho_i}{P - P_i} \quad (3.3)$$

Donde:

α_P : Coeficiente de realimentación de potencia [pcm/MW]

ρ_i : Reactividad del núcleo de referencia [pcm]

P_i : Potencia del núcleo de referencia [MW]

3.4.6.2. Procedimiento experimental.

Se midió indirectamente el coeficiente de realimentación de potencia cambiando la posición crítica para obtener un cambio en el nivel de potencia. Inicialmente, el nivel de potencia del reactor era de 1KW_{th} , crítico, frío y sin xenón. Luego, se incrementó la potencia a nivel de potencia operativa, 1MW, y se mantuvo la criticidad. La configuración de EC de este estado de criticidad se registró de inmediato luego del aumento en el nivel de potencia con el fin de evitar la acumulación de xenón. Dicho incremento en la potencia del reactor se obtuvo extrayendo EC 5. La diferencia de reactividad debido a la extracción de EC 5 representa el cambio de reactividad debido al incremento de potencia. El coeficiente de cambio de reactividad por incremento de potencia del reactor de 1KW_{th} a 1MW representa el coeficiente de realimentación de potencia.

3.4.6.3. Procedimiento de cálculo.

El coeficiente de realimentación de potencia se calculó incorporando un modelo termohidráulico del RA-6 al código CITVAP. En este marco, se calculó la convección forzada para simular el flujo de convección forzada descendente del RA-6.

El proceso de acople interno del código TERMIC en el código CITVAP se alcanzó del siguiente modo: a) Al nivel inicial de potencia, se calculó el perfil de densidad de potencia axial por medio del CITVAP para cada ECN y ECC (elementos generadores de potencia); b) Este perfil de densidad de potencia axial se transmitió al TERMIC para calcular los perfiles axiales para la temperatura del combustible, temperatura del refrigerante, y densidad del refrigerante; c) Luego de cambiar el nivel de potencia, los perfiles axiales de la temperatura del combustible, la temperatura del refrigerante y la densidad del refrigerante se recalcularon con el TERMIC y luego se transmitieron nuevamente al CITVAP; d) Las secciones eficaces macroscópicas se ajustaron por medio del CITVAP para considerar los cambios en la temperatura del combustible, la temperatura del refrigerante, y la densidad del refrigerante; e) De tal ajuste en las secciones eficaces macroscópicas, CITVAP calculó el nuevo perfil de densidad de potencia axial.

Se llevó a cabo un paso anterior para generar un juego de secciones eficaces macroscópicas que dependa de la temperatura del combustible y del refrigerante, por medio del CONDOR. La

variable de densidad de refrigerante se cambió según la variación en la temperatura del refrigerante utilizando una función internamente incorporada en CONDOR. En otras palabras, cuando cambia la temperatura del refrigerante, cambia automáticamente la densidad del refrigerante.

El ajuste de las secciones eficaces macroscópicas se logra con el CITVAP por medio de la interpolación lineal. CITVAP puede manejar al mismo tiempo una interpolación entre secciones eficaces macroscópicas por variable (esto es, temperatura de combustible, temperatura de refrigerante y densidad de refrigerante). En otras palabras, CITVAP no puede interpolar entre secciones eficaces macroscópicas que dependen tanto de la temperatura del refrigerante como de la densidad del refrigerante. Por ende, se emplea el programa HXS para corregir manualmente la densidad del refrigerante para todas las secciones eficaces macroscópicas con el fin de superar esta barrera de la metodología de interpolación. Por lo tanto, la interpolación que aquí se efectúa involucra solamente la temperatura del combustible y del refrigerante.

El juego de secciones eficaces macroscópicas generado por medio de CONDOR depende de la siguiente temperatura de combustible: 20°C, 40°C, 60°C y la siguiente temperatura de refrigerante: 20°C, 25°C, 30°C.

El modelo matemático de interpolación construido internamente en CITVAP se implementó del siguiente modo [22]:

- Para una temperatura de combustible ($T_{fuel,ref}$) y de refrigerante ($T_{cool,ref}$) fijas dadas, la ecuación de interpolación para una sección eficaz macroscópica requerida sobre la base de una temperatura de combustible cambiante a $T_{fuel,1}$ y un cambio en la temperatura del refrigerante a $T_{cool,1}$ se calcula por medio de la ecuación (3.4).

$$\Sigma_x(T_{fuel,1}, T_{cool,1}) = \Sigma_x(T_{fuel,ref}, T_{cool,ref}) + \Delta\Sigma_x(T_{fuel,1}, T_{cool,ref}) + \Delta\Sigma_x(T_{fuel,ref}, T_{cool,1}) \quad (3.4)$$

Donde:

$\Sigma_x(T_{fuel,1}, T_{cool,1})$: Sección eficaz macroscópica de cualquier tipo de reacción sobre la base de un incremento en la temperatura del combustible ($T_{fuel,1}$) y la temperatura del refrigerante ($T_{cool,1}$), [cm^{-1}], calculado con CITVAP.

$\Sigma_x(T_{fuel,ref}, T_{cool,ref})$: Sección eficaz macroscópica de cualquier tipo de reacción a la temperatura de combustible y refrigerante de referencia fijada, [cm^{-1}], calculada con CONDOR.

$\Delta\Sigma_x(T_{fuel,1}, T_{cool,ref})$: Cambio en la sección eficaz macroscópica de cualquier tipo de reacción entre la sección eficaz macroscópica a ($T_{fuel,1}, T_{cool,ref}$) y ($T_{fuel,ref}, T_{cool,ref}$), [cm^{-1}], calculado con CONDOR.

$\Delta\Sigma_x(T_{fuel,ref}, T_{cool,1})$: Cambio en la sección eficaz macroscópica de cualquier tipo de reacción entre la sección eficaz macroscópica a ($T_{fuel,ref}, T_{cool,1}$) y ($T_{fuel,ref}, T_{cool,ref}$), [cm^{-1}], calculado con CONDOR.

La fig. 3.17 explica el modo en el que ocurre internamente la interpolación de las secciones eficaces macroscópicas en el código CITVAP.

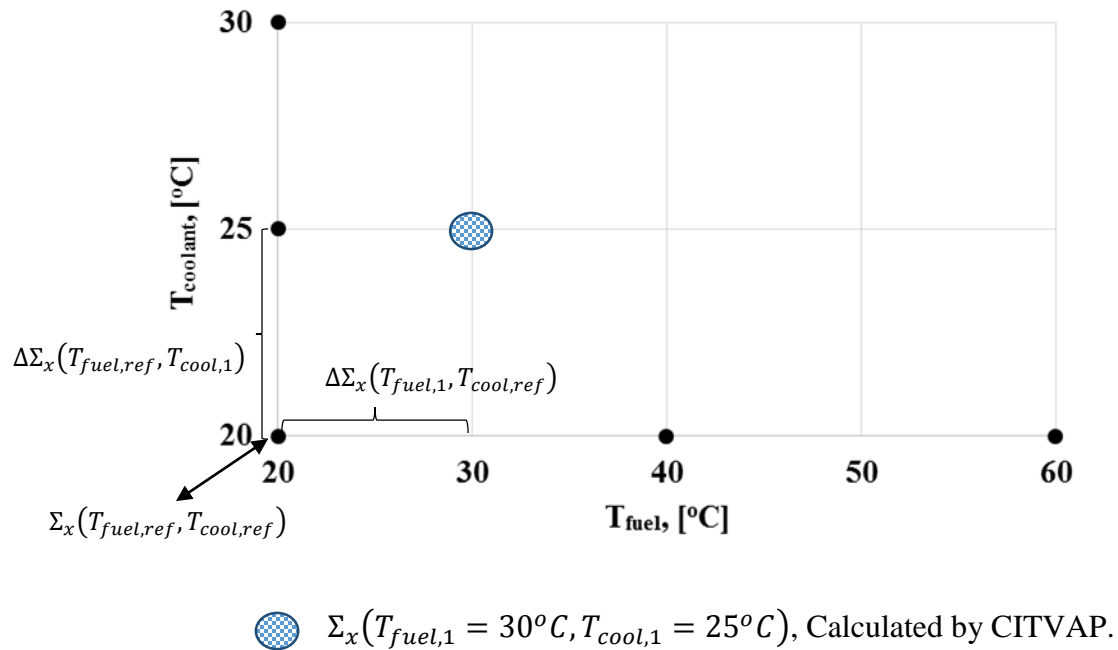


Fig. 3.17: Ilustración esquemática del método de interpolación de secciones eficaces macroscópicas del CITVAP

3.4.6.4. Resultados y análisis.

La información externa termohidráulica que corresponde al cálculo del coeficiente de realimentación de potencia se resume en la tabla 3.34.

Tabla 3.34: Información termohidráulica sobre el cálculo del coeficiente de realimentación de potencia

Para ECN	
Ancho del meat [cm]	6.0
Ancho del canal [cm]	6.6
Altura del canal [cm]	0,271
Longitud activa [cm]	62,3
Longitud de la placa [cm]	67,1
Número de placas combustible	19
Medio de espesor del meat [cm]	0,02533
Espesor de la vaina [cm]	0,04917
Espesor del óxido [cm]	0,0
Para ECC, igual que para ECN excepto por lo siguiente	
Altura del canal [cm]	0,261
Número de placas combustible	14

Tabla 3.34 (Continuación): Información termohidráulica del cálculo de coeficiente de realimentación de potencia

Datos de conductividad térmica	
Meat del combustible [kW/m.K]	0,048
Espacio [kW/m.K]	0,0023
La vaina [kW/m.K]	0,165
Información adicional	
Columna de agua [cm]	660
Temperatura de entrada¹⁶ (°C)	24,0
Velocidad de flujo de canal refrigerante¹⁷ (cm/s)	91,0
Tipo de flujo	Forzado – Descendente

El coeficiente de realimentación de potencia se calculó empleando una referencia fija de 20°C para la temperatura de tanto el combustible como el refrigerante. A esas dos temperaturas, se generó con CONDOR un juego de todas las secciones eficaces macroscópicas. Más adelante, se generaron secciones eficaces macroscópicas solamente para los elementos generadores de potencia, uno a uno, para las siguientes temperaturas de combustible y refrigerante: T_{fuel} : 40°C y 60°C, T_{cool} : 25°C y 30°C. Al generarse una sección eficaz macroscópica a temperatura de combustible (por ejemplo a $T_{\text{fuel}} = 40^\circ\text{C}$), la temperatura del refrigerante se mantenía constante a la temperatura de referencia, y viceversa. Con estas secciones eficaces macroscópicas y la información termohidráulica presentada en la tabla 3.34, la diferencia de reactividad entre la condición fría (1KW_{th}) y la condición caliente (1MW) se obtiene con CITVAP. Luego, tal diferencia de reactividad se divide por el cambio en el nivel de potencia para dar el coeficiente de realimentación de potencia. La tabla 3.35 presenta los valores medidos y calculados del coeficiente de realimentación de potencia.

Tabla 3.35: Coeficiente de realimentación de potencia calculado y medido

	Coeficiente de realimentación de potencia [pcm/ MW]	Diferencias respecto del valor medido [%]
Valor medido [24]	-52	35%
Valor calculado	-70	

Se realizó una mejora para incluir la combinación de los siguientes efectos en el cálculo del coeficiente de realimentación de potencia:

1) Cambiando la temperatura del combustible y el refrigerante de referencia para hacer coincidir con el valor promedio en cada estado del núcleo (frío y caliente).

¹⁶ Temperatura de entrada asumida como de 24°C al no haber sido informada en Ref. [24].

¹⁷ En la Ref. [24], la caída de presión en el núcleo se asume uniforme, lo que significa que la velocidad es independiente de la ubicación de elemento combustible en el núcleo.

2) Cambiando la temperatura de todos los materiales estructurales, placas de absorción y toda agua para lograr igualdad con la temperatura de refrigerante promedio para cualquier estado correspondiente (frío o caliente).

Del cálculo anterior ($T_{\text{fuel, ref}} = T_{\text{cool, ref}} = 20^{\circ}\text{C}$), se observa que la temperatura promedio del combustible y el refrigerante se encuentran en las condiciones fría y caliente. En condición fría, la temperatura promedio del combustible y el refrigerante era de 24°C , que era lo esperado ya que la temperatura de entrada era de 24°C . En condición caliente, la temperatura promedio del combustible y el refrigerante fue de 32 y 26°C , respectivamente.

Al aplicar los dos efectos indicados anteriormente, la temperatura de referencia del combustible y el refrigerante fue de:

- a) En condición fría ($T_{\text{fuel, ref}} = T_{\text{cool, ref}} = 24^{\circ}\text{C}$)
- b) En condición caliente ($T_{\text{fuel, ref}} = 32^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{cool, ref}} = 26^{\circ}\text{C}$)

La idea detrás del cambio de la temperatura de referencia en cada estado del núcleo fue la de mejorar el modo de interpolación en las secciones eficaces macroscópicas. Las otras secciones eficaces macroscópicas de los elementos que no generan potencia fueron fijadas a la temperatura promedio del refrigerante. El coeficiente de realimentación de potencia luego de estas actualizaciones se muestra en la tabla 3.36.

Tabla 3.36: Actualización del valor de coeficiente de realimentación de potencia calculado

	Coeficiente de realimentación de potencia [pcm/ MW]	Diferencias respecto del valor medido [%]
Valor medido [23]	-52	15%
Valor actualizado	-60	

Se ganó más de un 50% de reducción en la diferencia entre coeficiente de realimentación medido y calculado en virtud de los efectos considerados.

Se introdujo un ulterior análisis de sensibilidad para determinar lo importante de considerar la temperatura promedio del refrigerante para los materiales estructurales, placas absorbentes y toda agua en el núcleo. A nivel de potencia 1MW (condición caliente), la temperatura de estos materiales era de 26°C (la temperatura promedio del refrigerante en el estado caliente). En este estudio, el efecto de cambiar la temperatura de estos materiales de 26 a 24°C (la temperatura promedio del refrigerante en el estado frío) se analizó en el coeficiente de realimentación de potencia. El resultado de este estudio muestra una caída del coeficiente de realimentación de potencia a un valor de -65 pcm/MW, mientras que antes era de -60 pcm/MW. Este cambio en el coeficiente de realimentación de potencia es evidencia de lo importante de incluir el cambio de la temperatura de estos materiales en los cálculos termohidráulicos. La diferencia de reactividad en la condición caliente debido a los cambios en la temperatura de estos materiales mide la cantidad de este estudio de sensibilidad. Tal cantidad es de -2.55 pcm/ $^{\circ}\text{C}$.

3.4.7. Parámetro α -cinético.

3.4.7.1. Definición.

- **Parámetro α -cinético:** Es el coeficiente de la fracción de neutrones retardados sobre el tiempo entre reproducciones de neutrones instantáneos, ecuaciones 3.6 y 3.7

$$\alpha = \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \quad (3.6)$$

$$\Lambda = \frac{l}{k} \quad (3.7)$$

Donde:

α : Parámetro cinético [s^{-1}]

β_{eff} : Fracción de neutrones retardados [pcm]

Λ : Tiempo entre reproducciones de neutrones instantáneos [s]

l : Vida media de los neutrones instantáneos [s]

k : Factor de multiplicación efectivo

3.4.7.2. Procedimiento experimental.

El parámetro α -cinético fue medido experimentalmente mediante la técnica de ruido neutrónico para diferentes condiciones subcríticas y aproximadamente a cero la potencia del reactor ($10W_{th}$) [25]. Los valores α se graficaron contra la reactividad del núcleo y se adaptaron por medio de un ajuste lineal para obtener el valor de α cuando el reactor se encuentra crítico. Este valor representa el valor medido del parámetro α -cinético.

3.4.7.3. Procedimiento de cálculo.

El procedimiento de cálculo para calcular la fracción de neutrones retardados y la vida media de los neutrones instantáneos se implementó del siguiente modo: En primer lugar, aplicando CONDOR para obtener todas las secciones eficaces microscópicas y macroscópicas a 10 grupos energéticos. Las secciones eficaces microscópicas se generaron en formato CITATION. En segundo lugar, aplicando el programa HXS, las secciones eficaces macroscópicas generadas se importaron a una biblioteca a ser usada luego en el archivo de entrada de CITVAP. En tercer lugar, se aplicó CITVAP para generar un archivo de salida de base de datos. Junto con las secciones eficaces microscópicas generadas anteriormente, dicho archivo se utilizó para preparar el archivo de entrada del programa POS_LIB. En quinto lugar, aplicando el programa POS_LIB, se generaron las secciones 000, 012 y 020 para utilizarse en otro archivo de entrada de CITVAP. Por último, se aplicó CITVAP para generar la fracción de neutrones retardados y la vida media de los neutrones instantáneos utilizando las tres secciones previas generadas y la sección 040, que posee la información sobre el espectro de neutrones retardados, ver tabla 3.37. Por ende, se calcula el parámetro α -cinético. Se emplearon diez grupos de energía para distinguir entre espectro de neutrones instantáneos y retardados. Las ecuaciones de fracción de neutrones retardados y la vida media de los neutrones instantáneos implementadas en CITATION II se describen en las ecuaciones 3.8 y 3.9 [6]. La tabla 3.38 resume los diez grupos energéticos.

$$\beta_{eff} = \sum_{j=1}^6 \beta_{eff}^j = \frac{\sum_i V_i \sum_g \chi^+(j, g) \phi_{i,g}^* \sum_b \beta_{b,j} N_{b,i} \sum_n \sigma_{f,n,b,i} \phi_{i,n}}{\sum_i V_i \sum_g \chi(g) \phi_{i,g}^* \sum_n \nu \Sigma_{f,n} \phi_{i,n}} \quad (3.8)$$

$$l = k \frac{\sum_i \frac{V_i}{v(n)} \phi_{i,n}^* \phi_{i,n}}{\sum_i V_i \sum_g \chi(g) \phi_{i,g}^* \sum_n \nu \Sigma_{f,n} \phi_{i,n}} \quad (3.9)$$

Donde:

β_{eff}^j : Fracción de neutrones retardados para una familia de precursores j dada [pcm]

V_i : Volumen asociado a la malla i [cm^3]

$\chi^+(j, g)$: Espectro de neutrones retardados para una familia de precursores j y un grupo energético g

$\phi_{i,g}^*$: Flujo adjunto en malla i asociado al grupo energético g

$\beta_{b,j}$: Fracción de neutrones retardados para el nucleído b y una familia de precursores j [pcm]

$N_{b,i}$: Densidad atómica para el nucleído b en malla i [at.cm^{-3}]

$\sigma_{f,n,b,i}$: Sección eficaz microscópica de fisión asociada a la energía n, nucleído b y malla i [cm^2].

$\phi_{i,n}$: Flujo en la malla i para energía n [$\text{n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$]

$\chi(g)$: Espectro total de neutrones retardados asociados al grupo energético g

ν : Número de neutrones producidos por fisión

$\Sigma_{f,n}$: Sección eficaz macroscópica de fisión para energía n [cm^{-1}]

l : Vida media de los neutrones instantáneos [s]

k : Factor de multiplicación efectivo

$v(n)$: Velocidad de neutrones como función de energía n [cm.s^{-1}]

Tabla 3.37: Espectro de neutrones retardados [26]

Grupos energéticos	Grupos de neutrones retardados						Neutrones instantáneos
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	
1	5,309E-03	1,220E-01	7,060E-02	1,240E-01	1,018E-01	8,897E-02	0,7452790
2	6,727E-02	2,523E-01	2,612E-01	2,348E-01	2,200E-01	2,650E-01	0,1160090
3	1,594E-01	3,208E-01	2,746E-01	2,607E-01	2,515E-01	2,606E-01	0,0676054
4	2,729E-01	1,605E-01	1,969E-01	1,855E-01	1,951E-01	1,944E-01	0,0358692
5	2,913E-01	1,145E-01	1,424E-01	1,390E-01	1,783E-01	1,236E-01	0,0180814
6	2,038E-01	2,986E-02	5,478E-02	5,606E-02	5,345E-02	6,768E-02	0,0170127
7	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,0001489
8	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,0000000
9	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,0000000
10	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,0000000

Tabla 3.38: Estructura de grupo energético utilizada para el cálculo del parámetro cinético

Grupos energéticos	Límite energético superior de cada grupo [eV]
1	1,00000E+07
2	0,82085E+06
3	0,50000E+06
4	0,30200E+06
5	0,18300E+06
6	0,11100E+06
7	5,53080E+03
8	2,10000E+00
9	6,25060E-01
10	8,19680E-02

3.4.7.4. Resultados y análisis.

La fracción de neutrones retardados y la vida media de los neutrones instantáneos se obtuvo empleando los procedimientos de cálculo mencionados anteriormente. Los cálculos de los parámetros cinéticos se efectuaron en condición fría en una situación crítica. Se llevó adelante un análisis de sensibilidad para verificar la influencia de las siguientes dos situaciones sobre el parámetro α -cinético: a) todos los elementos de control se encuentran fuera del núcleo, b) todos los elementos de control se encuentran adentro en el núcleo. La tabla 3.39 presenta los parámetros cinéticos calculados juntos con los dos casos estudiados.

Tabla 3.39: Valores de cálculo de la fracción de neutrones retardados, vida media de los neutrones instantáneos, tiempo entre reproducciones de neutrones instantáneos y parámetro α -cinético

	Estudio original	Análisis de sensibilidad	
	Estado de criticidad	Todos los EC afuera	Todos los EC adentro
$\beta_{\text{eff}}[\text{pcm}]$	767,3	763,2	765,3
$l[\mu\text{s}]$	42,5	44,7	41,6
$\Lambda[\mu\text{s}]$	42,8	42,7	46,8
$\alpha[\text{s}^{-1}]$	179,3	178,7	163,4

La tabla 3.40 muestra la comparación entre los datos medidos y el valor calculado.

Tabla 3.40: Parámetro α -cinético calculado y medido

	Parámetro α -cinético [s^{-1}]	Diferencias respecto del valor medido [%]
Valor medido [17]	$180,8 \pm 0,9$	0,8%
Valor calculado	179,3	

Se llevó adelante un ulterior análisis de sensibilidad para verificar el efecto del cambio del estado del núcleo de frío a caliente. El efecto en el parámetro α -cinético fue despreciable.

3.5. Comparación con MCNP5.

En esta sección se demuestran los resultados de los siguientes cálculos:

- Verificación de los cálculos de celdas de CONDOR2.62 contra los cálculos de MCNP5.1.6. Los modelos de celdas de ECN y ECC, sección 3.3, fueron idénticos en ambos códigos, así como también las especificaciones de materiales.
- Se llevó una evaluación de la sección eficaz microscópica del material absorbente del elemento de control en la biblioteca ESIN 2001.
- Se realizaron cálculos de criticidad utilizando MCNP5.1.6 con el fin de verificar la existencia de la pendiente de reactividad, tal como se mencionara anteriormente.

3.5.1. Verificación de Cálculos de Celdas ECN y ECC.

Se llevó un cálculo para la verificación del cálculo de celdas determinístico CONDOR2.62 con el código estocástico MCNP5.1.6. La tabla 3.41 muestra una comparación entre los cálculos CONDOR2.62 y MCNP5.1.6 para el factor de multiplicación infinito de los modelos de celdas ECN y ECC.

Tabla 3.41: Comparación entre CONDOR2.62 y MCNP5.1.6 para K_{∞}

	Proceso de verificación	CONDOR 2.62	MCNP5.1.6	Diferencia de reactividad [pcm]
1	Modelo de celdas ECN sin alambres de Cd	1,616747	1,63001	500
2	Modelo de celdas ECN con alambres de Cd	1,489125	1,49648	305
3	Modelo de celdas ECC sin alambres de Cd y sin el elemento de control	1,529065	1,54278	593
4	Modelo de celdas ECC con alambres de Cd y sin el elemento de control	1,400634	1,40895	420
5	Modelo de celdas ECC sin alambres de Cd y con el elemento de control	1,356369	1,34423	666
6	Modelo de celdas ECC con alambres de Cd y con el elemento de control	0,923173	0,91848	554

Posteriormente, se calculó la sección eficaz macroscópica de absorción del material absorbente del elemento de control (AgInCd) empleando MCNP5.1.6 y comparando con el cálculo de CONDOR2.62. La biblioteca de secciones eficaces microscópicas del CONDOR2.62 fue la ESIN 2001, mientras que en el caso de MCNP5.1.6 fue ENDF/B-VI. La comparación tuvo lugar

en 3 grupos energéticos para el modelo de celdas ECC sin alambres de Cd y con el elemento de control, ver tabla 3.42.

Tabla 3.42: Comparación en la sección eficaz macroscópica de absorción de AgInCd

Grupo energético	Sección eficaz macroscópica de absorción de AgInCd		
	CONDOR2.62 (ESIN 2001) [cm ⁻¹]	MCNP5.1.6 (ENDF/B-VI) [cm ⁻¹]	Diferencia [%]
1 (10 MeV – 0,821 MeV)	3,9283E-03	4,5206E-03	13%
2 (0,821 MeV – 0.625 eV)	2,1805E-01	2,7160E-01	20%
3 (0,625 eV – 0.0 eV)	7,5583E+00	7,7908E+00	3%

Se llevó adelante un análisis en mayor profundidad en virtud de la existencia de una diferencia de 20% en la región epitérmica, con el fin de comparar las secciones eficaces microscópicas de absorción entre la biblioteca ESIN 2001 y el archivo de salida de MCNP para 69 grupos energéticos respecto de los siguientes elementos: 47107 (Ag-107), 47109 (Ag-109), 48113 (Cd-113) y 49000 (In-natural). Las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 muestran las secciones microscópicas de absorción para los elementos anteriores.

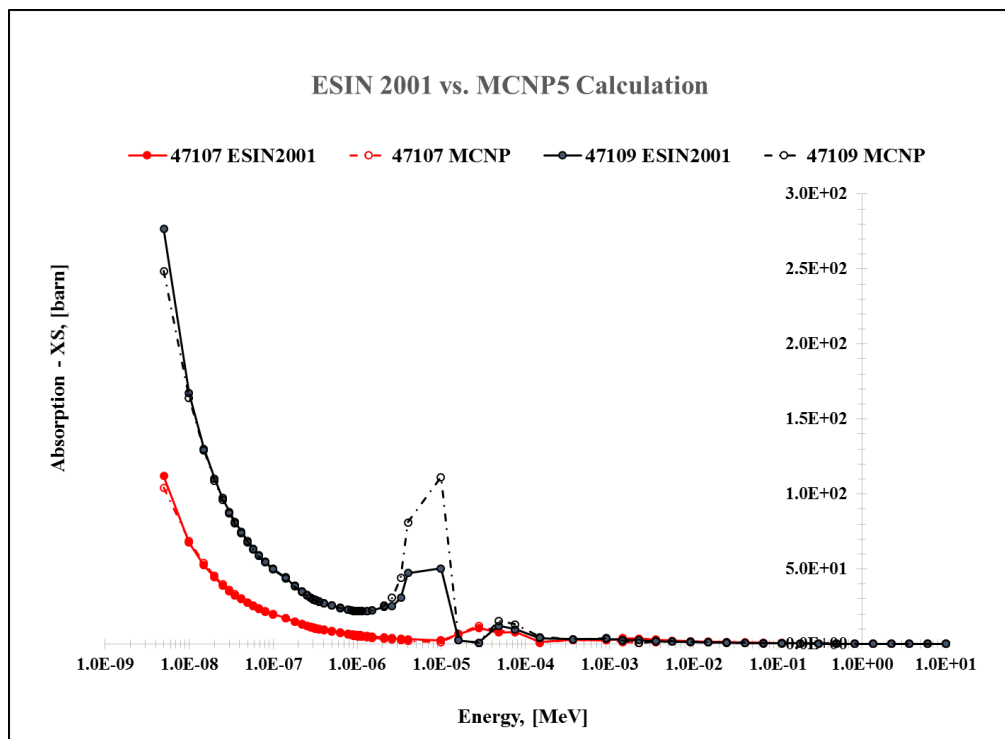


Fig. 3.18: Secciones eficaces microscópicas de absorción para Ag-107 y Ag-109 empleando cálculos ESIN 2001 y MCNP5.1.6

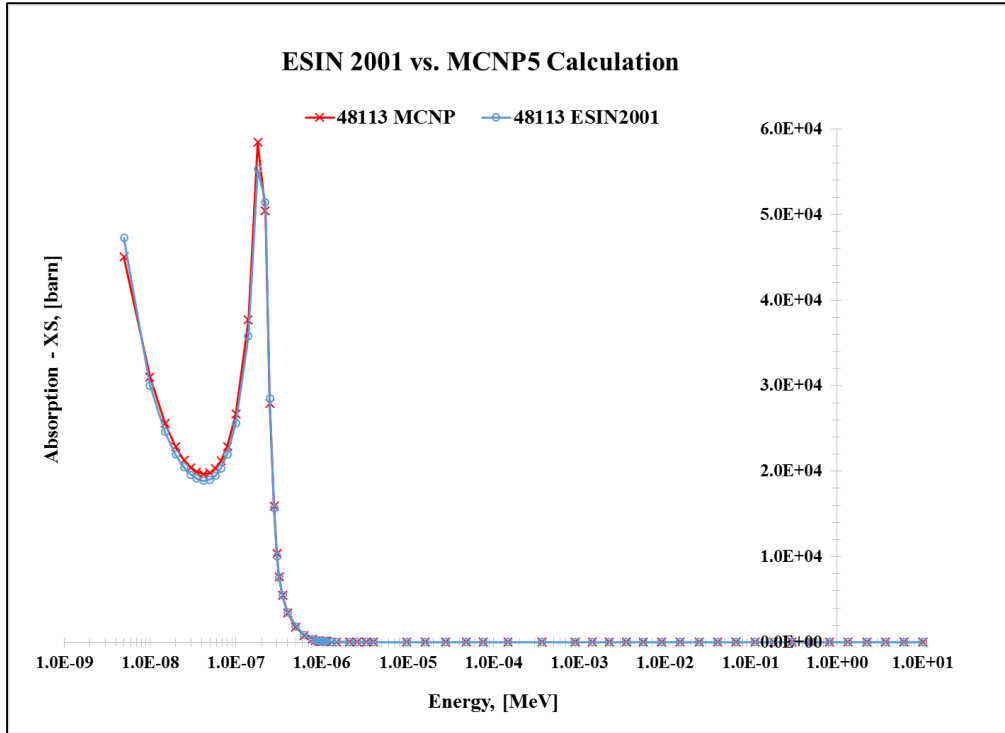


Fig. 3.19: Secciones eficaces microscópicas de absorción para Cd-113 empleando cálculos ESIN 2001 y MCNP5.1.6

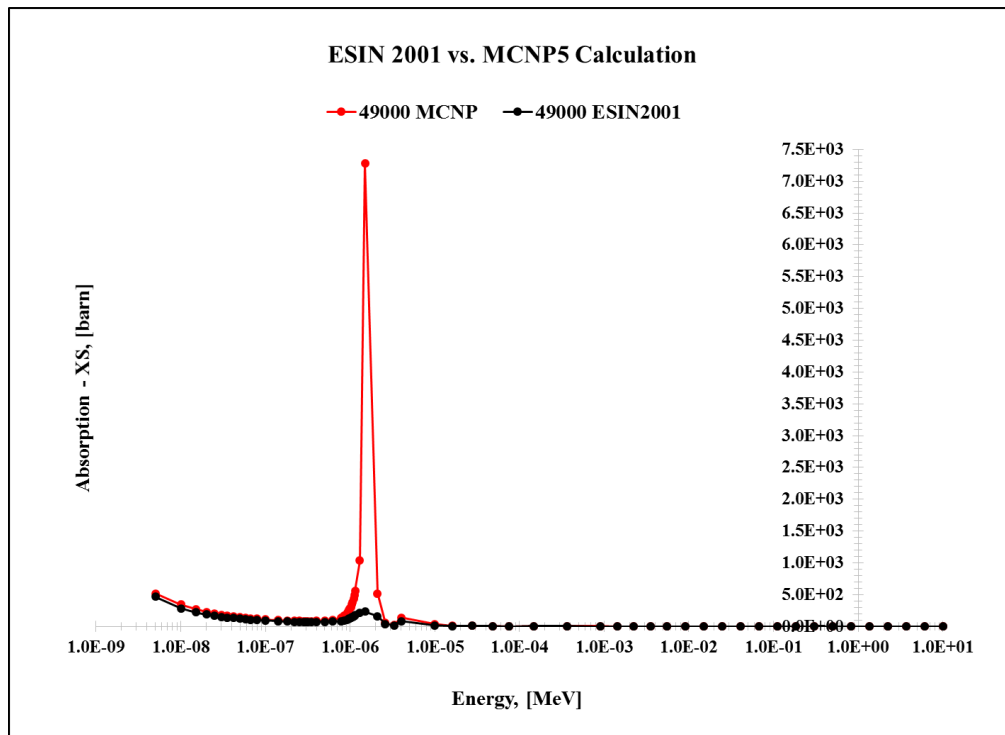


Fig. 3.20: Secciones eficaces microscópicas de absorción para iridio natural empleando cálculos ESIN 2001 y MCNP5.1.6

Hubo una diferencia significativa para Ag-109 e iridio natural en la región epitérmica, debida al tratamiento espacial de auto-apantallamiento. No se aplicó el tratamiento espacial de auto-apantallamiento de ESIN 2001 al elemento de control del RA-6. Para considerar el tratamiento de auto-apantallamiento, las secciones eficaces del MCNP en la región epitérmica se emplearon en el archivo de entrada de CONDOR por medio de la tarjeta “RESONANEC XS_EFFECTIVE”. Luego de ello, el factor de multiplicación infinita de CONDOR fue reevaluado y comparado contra MCNP5.1.6 para ambos modelos de celdas ECC con el elemento de control (sin y con alambres de Cd). La tabla 3.43 muestra esta comparación.

Tabla 3.43: Comparación K_{∞} entre MCNP5.1.6 y CONDOR2.62 para ambos modelos de celdas ECC (sin y con alambres de Cd) y con el EC insertado

	Proceso de verificación	CONDOR 2.62	MCNP5.1.6	Diferencia de reactividad [pcm]
5	Modelo de celdas ECC sin alambres de Cd y con el EC	1,351861	1,34423	-420
6	Modelo de celdas ECC con alambres de Cd y con el EC	0,919874	0,91848	-165

Todos estos cambios en las secciones eficaces microscópicas se habían aplicado anteriormente en la sección 3.4.

3.5.2. Cálculo de Criticidad Empleando MCNP5.1.6.

El objeto de este estudio es verificar la existencia de la pendiente de la reactividad de los puntos críticos del EC 2, ver Fig. 3.11 por medio de MCNP5.1.6. Se desarrolló un modelo simplificado de núcleo a los fines de esta comparación. La Fig. 3.20 muestra la reactividad obtenida empleando MCNP y la línea de cálculo CONDOR-CITVAP para los puntos críticos registrados de EC 2.

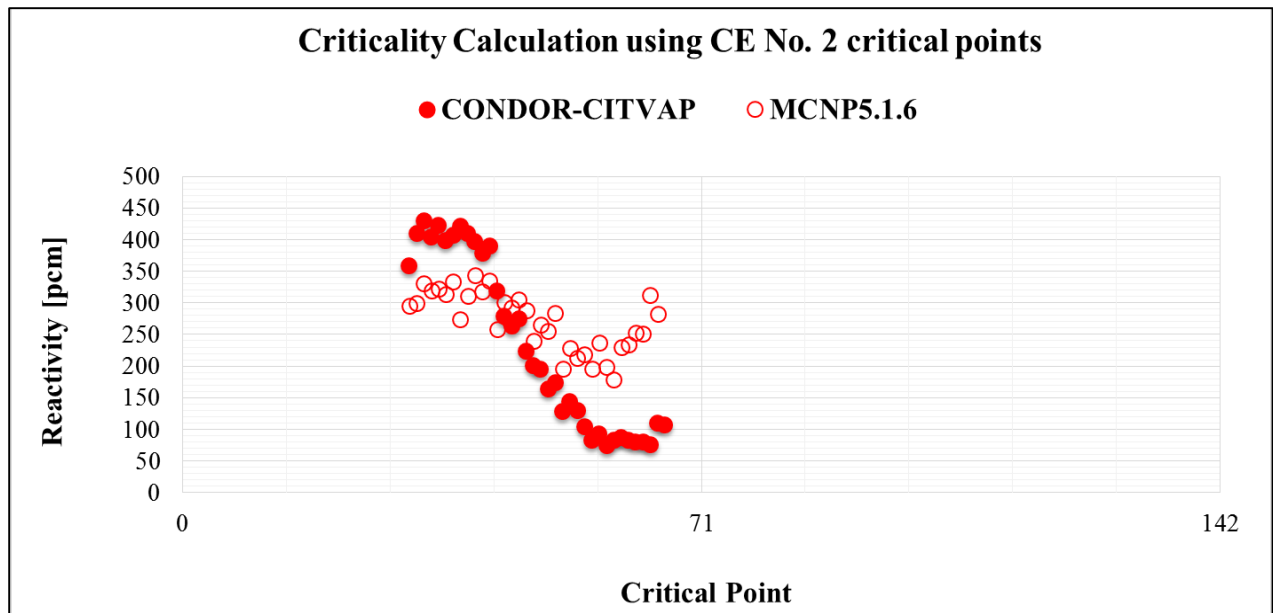


Fig. 3.21: Cálculo de criticidad para los puntos críticos registrados de EC 2 empleando MCNP5.1.6 y CONDOR-CITVAP

Se observa la aparición de una pequeña pendiente de reactividad con los cálculos MCNP. Debería realizarse un análisis ulterior a este respecto, teniendo en cuenta que EC 2 se calibró mayormente contra EC 4 y que EC 4 estaba muy cercano a EC 5, ubicado en el borde del núcleo. La interacción entre EC 4 y EC 5 debería evaluarse con mucha atención.

CAPITULO 4: CONCLUSIONES

La línea de cálculo determinístico CONDOR-CITVAP se validó contra el benchmark numérica de OIEA y el benchmark experimental del RA-6. Esta investigación se llevó adelante para cumplir con los siguientes objetivos:

- Conocer la línea de cálculo a través del uso de un benchmark bien definido (benchmark numérico de OIEA).
- Expandir la validación de línea de base experimental de la línea de cálculo a través del empleo del benchmark experimental del RA-6.
- Desarrollar un modelo de diseño para predecir el comportamiento del reactor RA-6 empleando la línea de cálculo, para luego validar este modelo contra los datos medidos durante la puesta en marcha del RA-6.
- Intentar mejorar la comparación cálculo – experimento para examinar los detalles experimentales no medidos hasta el momento.
- De ser posible, emplear la herramienta de cálculo Monte Carlo en caso de discrepancia entre la línea de cálculo y los datos experimentales.

4.1. Resumen.

Los resultados obtenidos a partir del benchmark OIEA fueron satisfactorios y se encuadraron dentro de los resultados de otros participantes. Se compararon los siguientes parámetros de celdas y núcleo contra los resultados de los participantes: K_{∞} como función de quemado, contenido de Pu^{239} a un 50% de quemado, K_{eff} en tres estados de núcleo: Fresco (sin Xe), BOL y EOL, relación de flujo térmico y rápido en estado BOL a lo largo del eje X, CEW y coeficientes de realimentación. Los anteriores parámetros de celdas y núcleo se aplicaron al combustible HEU y LEU. La tabla 4.1 presenta un resumen de resultados de parámetros de núcleo para combustible LEU.

Se analizaron los siguientes experimentos en el benchmark experimental del RA-6: aproximación a la criticidad por elementos de control, calibración de elementos de control, medición de la reactividad en exceso, Margen de Antirreactividad (MA), Margen de Antirreactividad con falla única de un elemento de control, coeficiente de realimentación isotérmica, coeficiente de realimentación de vacío, coeficiente de realimentación de potencia y parámetro α -cinético. Estos experimentos se utilizaron para ampliar la validación de la línea de cálculo CONDOR-CITVAP. La tabla 4.2 presenta un resumen de las diferencias obtenidas entre los datos medidos y los valores calculados.

Tabla 4.1: Resumen de las diferencias obtenidas entre los resultados del autor y el promedio de los participantes del benchmark OIEA en el caso del combustible LEU empleando CONDOR2.62-CITVAP3.8

Estado del núcleo	Variable comparada	Diferencias respecto de los resultados promedios de los participantes
Fresco	Reactividad en exceso	303 pcm (2%)
	CEW total (AgInCd – “Modelo B”)	9
BOL	Reactividad en exceso	44 pcm (2%)
	CEW total (AgInCd – “Modelo B”)	8%
	Coefficiente de realimentación de temperatura de agua	9%
	Coefficiente de realimentación de densidad de agua	2%
	Coefficiente de realimentación de temperatura de combustible	4%
	Coefficiente de realimentación de vacío	3%

Tabla 4.2: Resumen de las diferencias obtenidas entre los datos medidos y los valores calculados del benchmark experimental del RA-6 usando CONDOR2.62-CITVAP3.8

Variable comparada	Diferencias respecto de los datos medidos
Cálculo de criticidad	(209 ± 109) pcm
CEW 1	2%
CEW 2	5%
CEW 3	2%
CEW 4	6%
CEW 5	13%
Reactividad en exceso	239 pcm (5%)
MA	367 pcm (4%)
MA con falla de EC 1	2%
MA con falla de EC 2	4%
MA con falla de EC 3	5%
MA con falla de EC 4	3%
Coefficiente de realimentación isotérmica	16%
Coefficiente de realimentación de vacío	0,7%
Coefficiente de realimentación de potencia	15%
Parámetro α -cinético	0,8%

Los siguientes comentarios se aplican a las tablas 4.1 y 4.2:

- Los resultados del autor respecto del benchmark numérica de OIEA se encuadraron con los de otros participantes y estuvieron muy cercanos al promedio de los resultados de los participantes.
- La diferencia en la reactividad en exceso fue similar en magnitud para el benchmark numérica de OIEA y el benchmark experimental del RA-6.
- El CEW total se calculó para el benchmark del RA-6. La diferencia entre los datos medidos y el valor calculado fue igual a 0,8% aún cuando la diferencia para CEW 5 fue del 13%. Por otro lado, la diferencia en el CEW total del benchmark de OIEA fue del 9%, y no hubo información sobre cada diferencia porcentual del CEW.
- El coeficiente de realimentación de vacío concuerda muy bien con ambos benchmark: benchmark OIEA (3%) y benchmark RA-6 (0,7%).

4.2. Recomendaciones.

Sobre la base de las diferencias obtenidas entre los datos medidos y los valores calculados, se remarcan las siguientes recomendaciones:

- Debería aplicarse una investigación para comprender la existencia de una diferencia de un 13% entre los datos medidos y los valores calculados de CEW 5.
- Debería aplicarse una reevaluación experimental a la medición del coeficiente de realimentación isotérmica para comprender la existencia de una alta desviación estándar de los datos experimentales.
- Con el fin de reducir la diferencia obtenida en el coeficiente de realimentación de potencia, debería mejorarse el código termohidráulico en CITVAP para considerar los cambios de secciones eficaces macroscópicas respecto de elementos no generadores de potencia, por ej. la caja de irradiación.

El autor desea enfatizar el desarrollo de una medición y/o estimación experimental de los parámetros de seguridad no medidos y/o no estimados, por ej. el coeficiente de realimentación de temperatura de combustible, el coeficiente de realimentación de temperatura del moderador, etc. Tales datos experimentales ampliarían la validación de la línea de base. Por otro lado, conocerlos nos aseguraría que se encuentran dentro del límite aceptado por la Autoridad Regulatoria Nuclear.

Referencias

- [1] I. Mochi, “INVAP's Nuclear Calculation System”, ScienEC and Technology of Nuclear Installations, Vol. 2011, Article ID 215363, November 23, 2010
- [2] E. Villarino, “CONDOR Calculation Package”, International ConferenEC on the New Frontiers of Nuclear Technology: Reactor Physics, Safety and High-PerformanEC Computing. Physor 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002
- [3] E. Villarino, R.Stamm'ler, A.Ferri and J.Casal, “HELIOS: Angularly-dependent Collision Probabilities”, Nuclear ScienEC and Engineering: 112, 16-31 (1992)
- [4] E. Villarino, “POS_LIB v2.0 User Manual”. May 2012
- [5] E. Villarino, C. Lecot and I. Mochi, “CITVAP v3.8 improved version of CITATION II MTR_PC v3.0 system: User Manual”. March, 2012
- [6] T. B. Fowler, D. R. Vondy and G. W. Cunningham, “Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION”, ORNL-TM-2496,Revision 2, July 1971
- [7] E. Villarino and I. Mochi, “FLUX v2.0 User Manual”
- [8] Y. AlZaben, “Safety Parameters Validation After the Commissioning of RA6 Core Conversion To LEU Fuel”, 6th International Symposium on Material Testing Reactors, Bariloche, Argentina, October 28-31, 2013
- [9] IAEA, “Research Reactor Core Conversion from the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of Low Enriched Uranium Fuels Guidebook”, TECDOC-233, IAEA, Vienna, 1980
- [10] IAEA, “Research Reactor Core Conversion Guidebook”, TECDOC-643V3, IAEA, Vienna, 1992
- [11] S. Matzkin, “Benchmark of IAEA”, INVAP, September, 1998
- [12] M. Brizuela, “Benchmark of IAEA: Safety-Related Problem”, INVAP, October, 2005
- [13] S. P. Bazzana and J. I. Márquez Damián, IEU-COMP-THERM-014, “RA-6 Reactor: Water Reflected, Water Moderated U (19.77)3Si2-Al Fuel Plates”. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, 2010
- [14] R.J. Tuttle, “Delayed Neutron Yields in Nuclear Fission”, Proc. Consultants' Meeting on Delayed Neutron Properties, INDC (NDS) – 107/G, P. 29, IAEA, Vienna, 26-30 March 1979
- [15] J. M. Longhino, Registro Puesta en Marcha RA-6, REG-06NBX-PM-B2-06 Rev. 1, “Calibración en Reactividad de Barras de Control y Determinación del Exceso de Reactividad del Núcleo de Operación”
- [16] Santiago Bazzana, “Desarrollo, Análisis Y Evaluación De Experimentos Neutrónicos En El RA-6”, Master Thesis, Balseiro Institute, March 2012
- [17] H. Blaumann, ITA-06NBX-433 Rev. 0, “Evaluación de Ensayos de la Etapa B2”
- [18] J. M. Longhino, Registro Puesta en Marcha RA-6, REG-06NBX-PM-B2-07 Rev. 1, “Medición de Margen de Antirreactividad con falla de la Barra de mayor peso”
- [19] J. M. Longhino, Registro Puesta en Marcha RA-6, REG-06NBX-PM-B2-15 Rev. 1, “Medición del Coeficiente de Reactividad por Temperatura”
- [20] A. Weir, ITA-06NBX-412 Rev.1, “Cálculos de Cambio de Reactividad por Fracción de Vacío con el Código MCNP5”
- [21] J. M. Longhino, Registro Puesta en Marcha RA-6, REG-06NBX-PM-B2-12 Rev. 0, “Medición del Coeficiente de Reactividad por Vacío”

- [22] Darío Pieck, “Desarrollo Y Validación Experimental De Un Algoritmo De Acople Neutronico-Termohidraulico Para Reactores De Investigación”, Master Thesis, Balseiro Institute, June 2010
- [23] G. Ortiz Uriburu, IS-06NBX-405 Rev. 1, “Informe Final de Seguridad”.
- [24] J. M. Longhino, Registro Puesta en Marcha RA-6, REG-06NBX-PM-C2-04 Rev. 0, “Medición del Coeficiente de Reactividad por Potencia”
- [25] A. Gómez, Registro Puesta en Marcha RA-6, REG-06NBX-PM-B2-08 Rev. 0, “Estimación del Parámetro Alfa y de la Potencia Mediante la Técnica de Ruido Neutrónico – Primera Etapa”
- [26] Y. Ronen and Ed., “CRC Handbook of Nuclear Reactor Calculations”, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1986
- [27] J. M. Longhino, Procedimiento Puesta en Marcha RA-6, PRO-06NBX-PM-B1-08 Rev. 1, “Medición de Margen de Antirreactividad”

Anexo A: Benchmark Numéricos de OIEA: Especificaciones, Requisitos y Modelos de Cálculo

Este apéndice contiene la siguiente información: especificaciones de benchmark numéricos de OIEA, cálculos requeridos de celdas y núcleo y modelos de cálculo de celdas y núcleo.

A.1. Especificaciones de Benchmark.

Tabla A.1: Especificaciones geométricas [8]

Especificaciones geométricas	
Altura activa del núcleo	60 cm
Altura de extrapolación	8 cm (distancia de 8 cm del núcleo, el flujo de forma coseno va a cero)
Cálculo 2D solamente (X,Y)	
Espacio en la placa grilla por elemento combustible	7,7 cm x 8,1 cm
Sección transversal de elemento combustible	7,6 cm x 8,05 cm incluyendo la placa soporte 7,6 cm x 8,00 cm sin la placa soporte
Dimensiones del meat ($UAl_x - Al$)	6,3 cm x 0,051 cm
Vaina (aluminio)	6,3 cm x 0,038 cm
Placa soporte (aluminio)	0,475 cm x 8,05 cm
Número de placas combustible por elemento combustible normal (ECN)	23 placas idénticas, cada una de 0,127 cm de espesor.

Tabla A.1 (Continuación): Especificaciones geométricas [8]

<p>Número de placas combustible por elemento de combustible de control (ECC)</p>	<p>17 placas idénticas, cada una de 0,127 cm de espesor</p>
<p>Identificación de las seis restantes posiciones de placa del ECC</p>	<p>Cuatro placas guía de aluminio puro, cada una de 0,127 cm de espesor, que ocupan las posiciones 1, 3, 21 y 23</p> <p>Hay un espacio de agua entre cada juego de placas guía</p> <p>Las dos placas restantes corresponden a los dos elementos de control insertados en el espacio de agua</p>

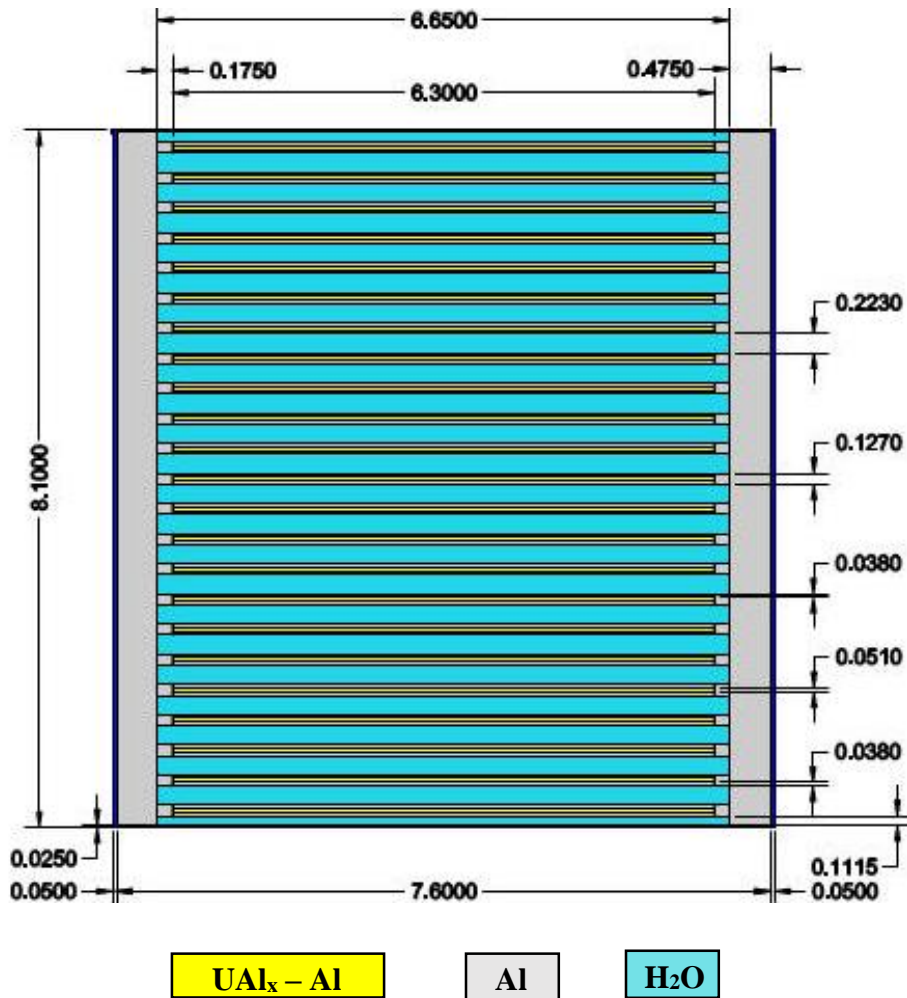


Fig. A.1: Elemento combustible normal (ECN) (dimensiones en cm)

Tabla A.2: Especificaciones de material [8]

Especificaciones de material		
Combustible (UAl_x – Al) (Meat) Sólo U²³⁵ y U²³⁸ en el combustible fresco	HEU	Enriquecimiento: 93 % (% de peso) U ²³⁵ 280 g U ²³⁵ por ECN, correspondiente a 12,174 g U ²³⁵ por placa combustible 21 % uranio en el UAl _x – Al
	MEU	Enriquecimiento: 45 % U ²³⁵ 320 g U ²³⁵ por ECN (23 placas) 40 % uranio en el UAl _x – Al
	LEU	Enriquecimiento: 20 % U ²³⁵ 390 g U ²³⁵ por ECN (23 placas) 72 % uranio en el UAl _x – Al
Aluminio		Aluminio puro (Densidad = 2,7 g/cm ³)
Grafito (Reflector)		Grafito puro (Densidad = 1,7 g/cm ³)

Tabla A.3: Condición de reactor [8]

Condición de reactor	
Potencia total	10 MW (Acumulación de potencia por 3,1 x 10 ¹⁰ fisión/Joule)
Datos termohidráulicos	Temperatura del agua: 20°C Temperatura del combustible: 20°C Presión a la altura del núcleo: 1,7 bar
Estado xenón	Contenido de xenón homogéneo correspondiente a la densidad de potencia promedio

A.1.1. Estructura de Grupo Energético Para El Cálculo Del Núcleo.

- Grupo térmico con $0 \text{ eV} < E_n < 0,625 \text{ eV}$
- Grupo epitérmico con $0,625 \text{ eV} < E_n < 5,531 \text{ KeV}$
- Grupo rápido con $E_n > 5,531 \text{ KeV}$

A.1.2. Geometría del Núcleo.

El núcleo comprende 21 ECN y 4 ECC, con una caja de irradiación central llena solo de agua. Está reflejado en dos lados por una fila de grafito y luego rodeado de reflector de agua, tal como se muestra en la figura A.2.

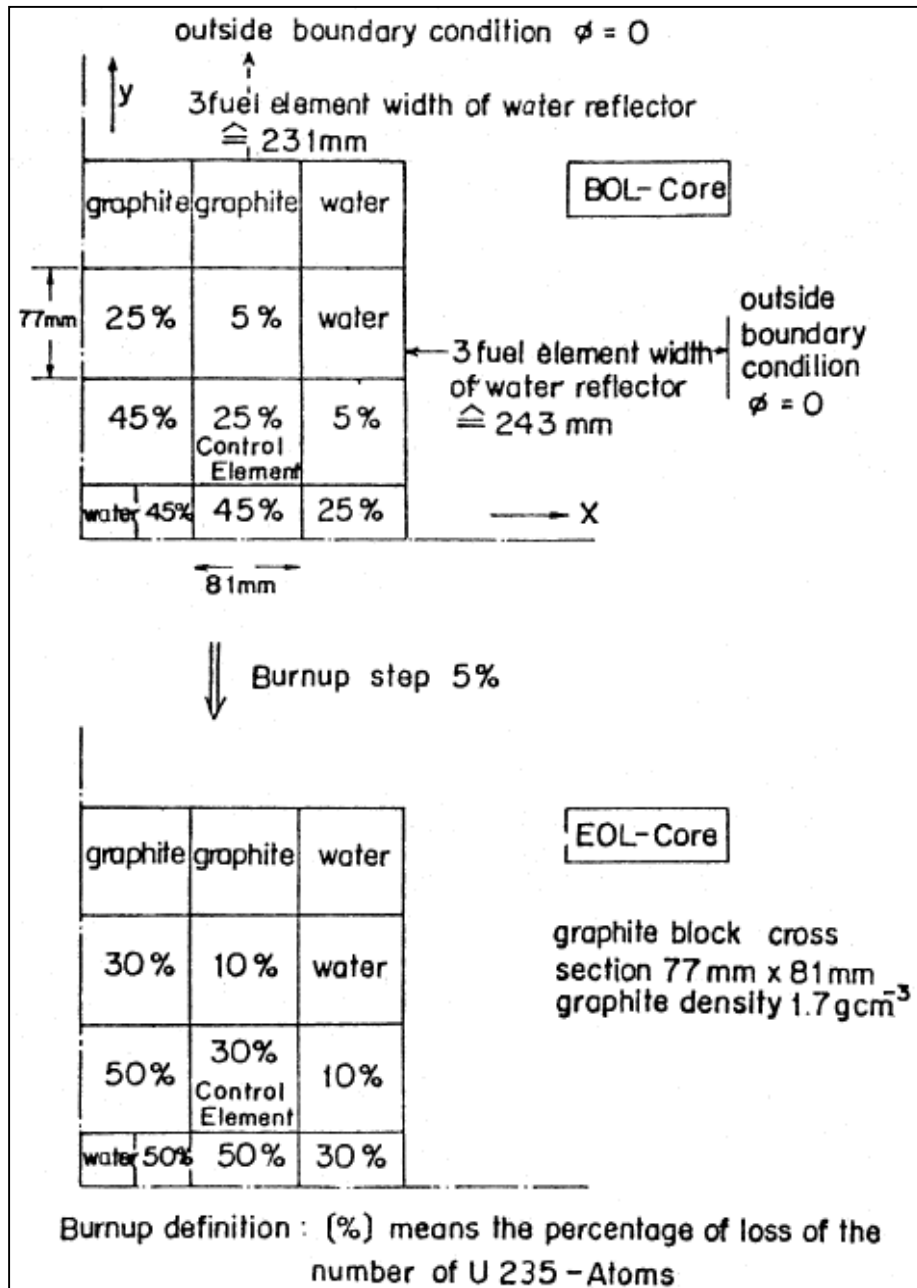


Fig. A.2: Cuarto de configuración de núcleo en estados BOL y EOL [8]

A.1.3. Especificación de Benchmark 643.

Este benchmark es una continuación de OIEA benchmark 233, si bien con el cambio de la caja de irradiación central, tal como se indica a continuación: reemplazo del agua en la trampa de flujo central con un bloque de aluminio de 7,7 cm x 8,1 cm que contiene un agujero cuadrado de 5 cm de lado, lleno de agua.

Tabla A.4: Especificaciones de elemento de control [9]

Geometría de elemento de control: Tipo horquilla con hojas que encajan en placas guía	
Longitud	60 cm
Espesor	0,318 cm; absorbente de 0,31 cm de espesor con capa de níquel de 0,004 cm en cada superficie de Ag-In-Cd y hojas de B ₄ C Absorbente de 0,31 cm de espesor para hojas de Hf (sin capa de níquel)
Ancho	6.6 cm
Materiales absorbentes	
Ag-In-Cd	80,5 % Ag; 14,6 % In; 4,9 % Cd Densidad de Ag-In-Cd: 9,32 g/cm ³ Densidad de Ag = 7,50 g/cm ³ In = 1,36 g/cm ³ Cd = 0,46 g/cm ³ Ni = 8,90 g/cm ³
B₄C	Densidad de B ₄ C = 2,52 g/cm ³
Hf	Densidad de Hf = 13,3 g/cm ³

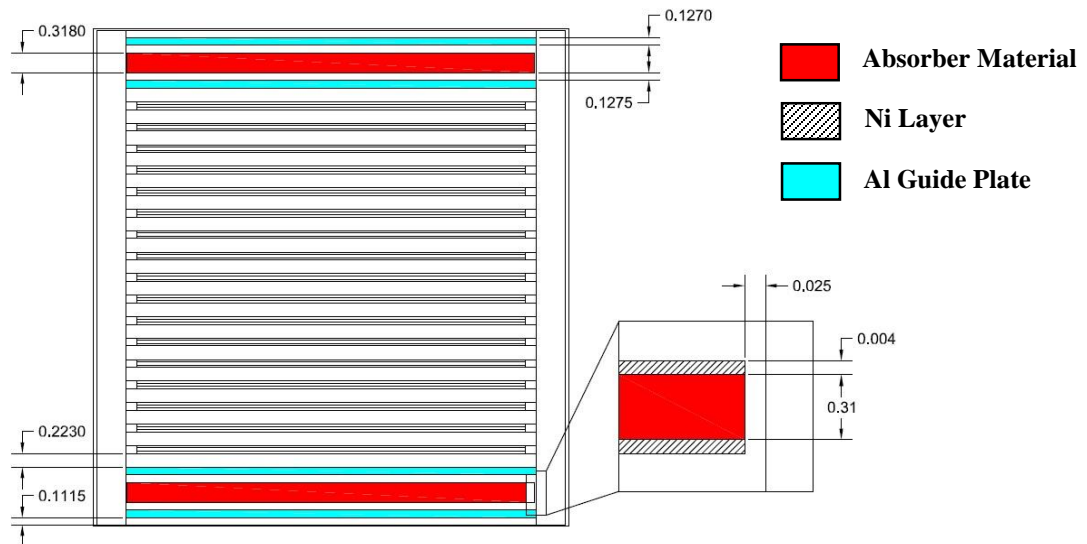


Fig. A.3: Elemento combustible de control con elemento de control insertado, otras dimensiones exactamente iguales a las del ECN (dimensiones en cm)

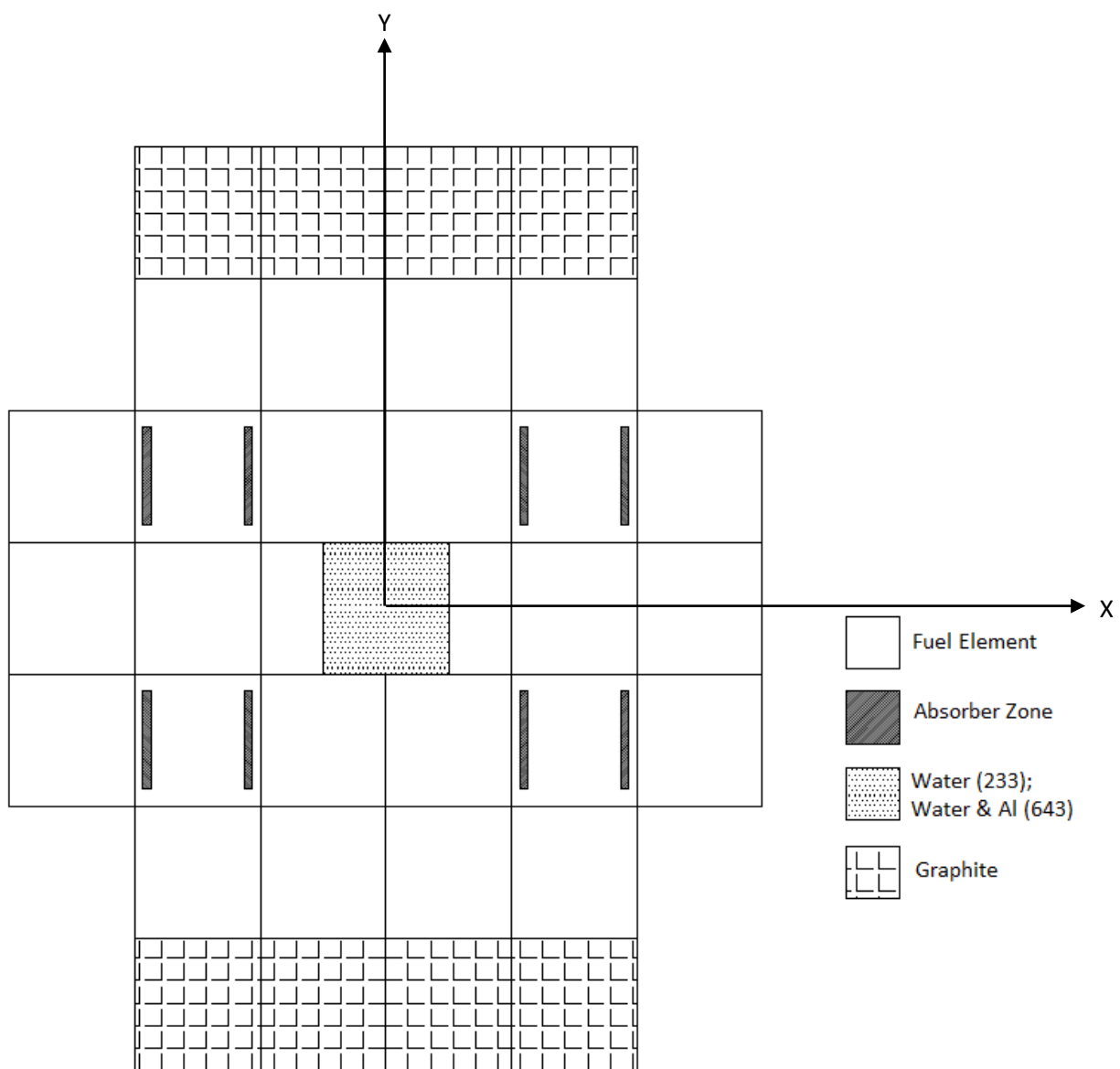


Fig. A.4: Configuración de núcleo para benchmark 233 y 643 [11]

A.2. Requisitos de Benchmark.

Se acordó un conjunto de requisitos a cumplirse entre todos los participantes. Se seleccionaron los siguientes requisitos para este trabajo:

A.2.1. Verificación del Cálculo de Celdas.

- Verificar K_{∞} como función de quemado (pérdida de % de U^{235}) para HEU y LEU
- Verificar el contenido de Pu^{239} a 50% de quemado para ECN para HEU y LEU

A.2.2. Verificación del Cálculo del Núcleo.

- Verificar K_{eff} del núcleo para HEU y LEU en tres estados:
Fresco (sin Xe), BOL y EOL
- Verificar la relación de flujo térmico y rápido (LEU/HEU) en estado BOL a lo largo del eje X
- Peso del elemento de control (CEW) de cuatro elementos de control insertados en estos estados:
HEU (fresco sin Xe y BOL) y LEU (fresco sin Xe y BOL)
- Coeficientes de realimentación de reactividad (núcleo BOL, HEU y LEU) calculados cambiando solamente las siguientes condiciones en todos los ECN y ECC:
 - 1) Sola la temperatura del agua: 38, 50, 75 y 100°C
 - 2) Solo la densidad del agua: 0,993; 0,988; 0,975 y 0,958 g/cm³
 - 3) Solo la temperatura del combustible: 38, 50, 75, 100 y 200°C
 - 4) Coeficiente de vacío de núcleo – cambiando solamente la densidad del agua por:
10%, 20% de vacío.

A.3. Modelos de Cálculo.

En esta sección se demostrarán dos modelos de cálculo: modelos de celdas y de núcleo. Existen cinco modelos diferentes para los modelos de celdas, a saber: Elemento Combustible Normal (ECN), Elemento Combustible de Control (ECC), reflector de agua, reflector de grafito y caja de irradiación central.

A.3.1. Modelos de Cálculo de Celdas

A.3.1.1. Modelo ECN

El modelo ECN se obtuvo por medio de modelos 1D y 2D. Para el modelo 1D, se implementaron dos modos para el modelaje utilizando la conservación del coeficiente de volumen. En primer lugar, manteniendo el espesor del meat; en segundo lugar, manteniendo la distancia de paso. El modelo 1D consistió en tres placas: el meat, el aluminio y el agua. El modelo 2D comprendió un cuarto del ECN, ver Fig. A.1, ya que el ECN era simétrico.

Primero: Modelo 1D de conservación del meat (CM).

La idea subyacente en este modo de modelaje es mantener la física del problema. La parte más crítica aquí es el espesor del meat. Por ende, para implementar este método, se preservó la mitad del espesor del meat y se calcularon los espesores de las otras placas sobre la base del mantenimiento del mismo coeficiente de volumen. El espesor de la placa de aluminio fue la siguiente:

$$Thickness_{AL} = \left(\frac{V_{AL}}{V_{Meat}} \right) * 1/2 * Thickness_{Meat} \quad (A.1)$$

El espesor de la placa de agua se calculó del siguiente modo:

$$Thickness_{Water} = \left(\frac{V_{Water}}{V_{Meat}} \right) * 1/2 * Thickness_{Meat} \quad (A.2)$$

Donde:

Espesor del meat = 0,051 cm

V_{AL} : Volumen del aluminio = 1180,9 cm³

V_{Meat} : Volumen del meat = 443,4 cm³

V_{Water} : Volumen del agua = 2117,9 cm³



Fig. A.5: Modelo 1D de conservación del meat de ECN (dimensiones en cm)

Segundo: Modelo 1D de conservación de paso (CP).

La idea de este modelo es la de conservar la distancia de paso, esto es, la distancia de centro a centro de dos elementos de control vecinos. Se calculó el espesor del meat del siguiente modo:

$$Thickness_{Meat} = P * \frac{V_{Meat}}{V_T} * 1/23 * 1/2 \quad (A.3)$$

Donde:

P: distancia de paso = 8,1 cm

V_T : volumen total (Meat + Al + Agua) = 3742,2 cm³

El espesor del aluminio y del agua se calcularon como en la ecuación A.1 y A.2, respectivamente, pero *sin* dividir por 2, ya que ello se incluye en la ecuación A.3.

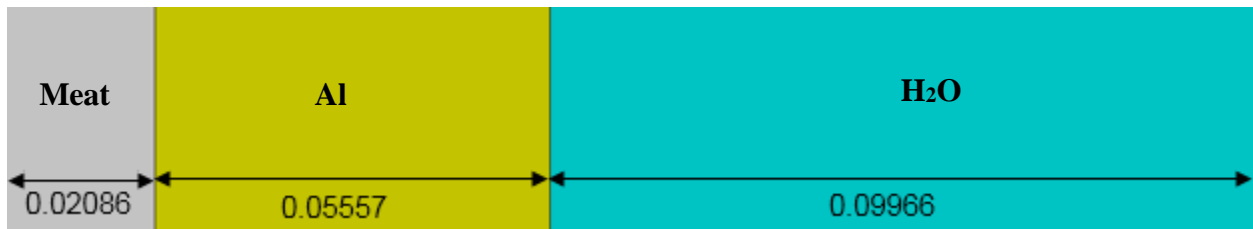


Fig. A.6: Modelo 1D de conservación de paso de ECN (dimensiones en cm)

En los dos modelos anteriores, MC y PC, las tres placas se homogeneizaron para obtener las secciones eficaces macroscópicas para el modelo 1D ECN.

Tercero: Modelo 2D ECN.

Las dimensiones 2D se tomaron de la Fig. A.1. El modo en el que el código de celdas (CONDOR) trata este problema es por medio de HRM, donde se decidió que la separación de cada caja estaría en la mitad de cada canal de agua para que la asunción de condición blanco fuese válida.

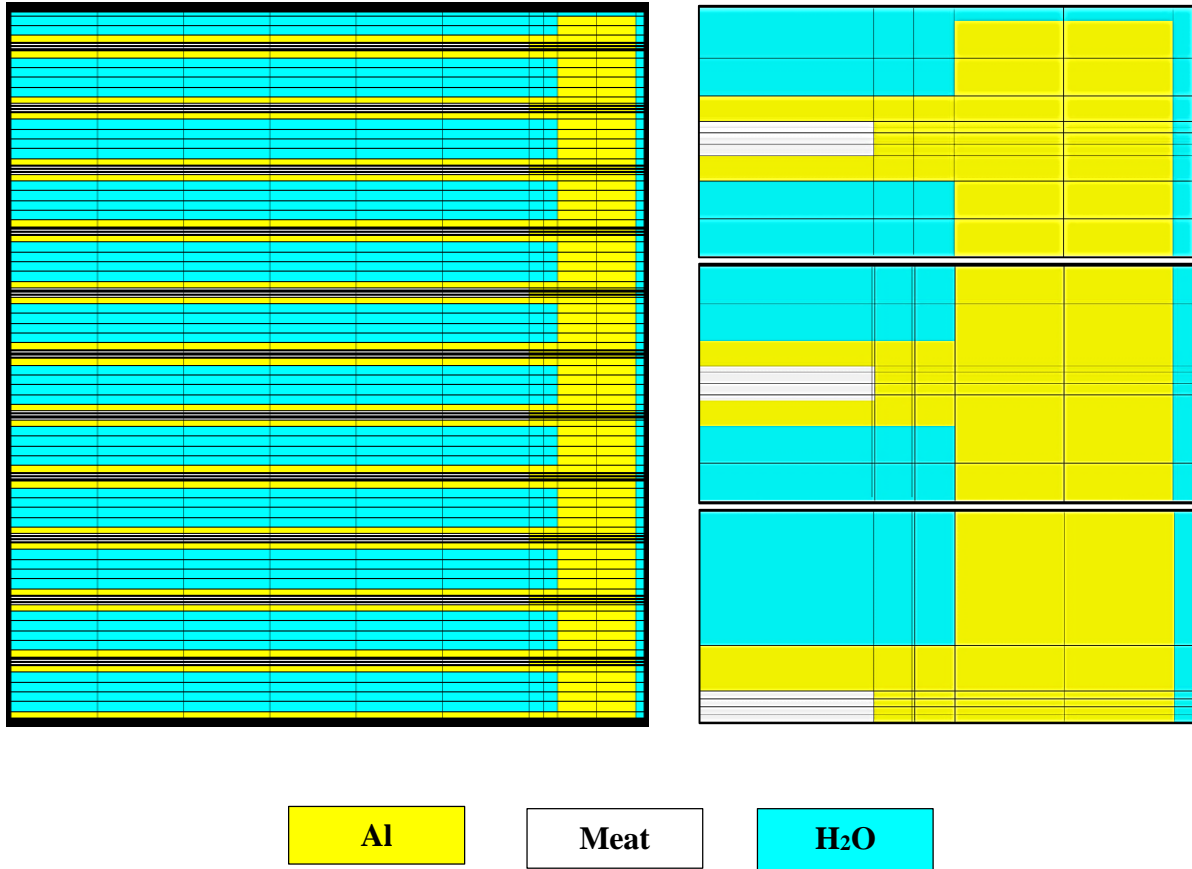


Fig. A.7: Modelo ECN 2D. A la derecha, aproximación a cada caja celda construida en el archivo de entrada CONDOR

Aquí se optó por homogeneizar todo junto y obtener las secciones eficaces macroscópicas para el modelo 2D ECN.

A.3.1.2. Modelo ECC.

El ECC se modeló en 1D y 2D, para los que hubo dos modelos para cada uno: uno con placa absorbente inserta y otro sin dicha placa. El 1D ECC se modeló a lo largo del eje Y, ver Fig. A.3, tomando su mitad y agregando un ECN homogeneizado a su izquierda para evitar la repetición de la placa absorbente del lado izquierdo. El modelo 2D, por otro lado, se tomó como un cuarto de la Fig. A.3. Aquí sólo mostraremos los modelos con la placa absorbente inserta.

Primero: Modelo 1D ECC.

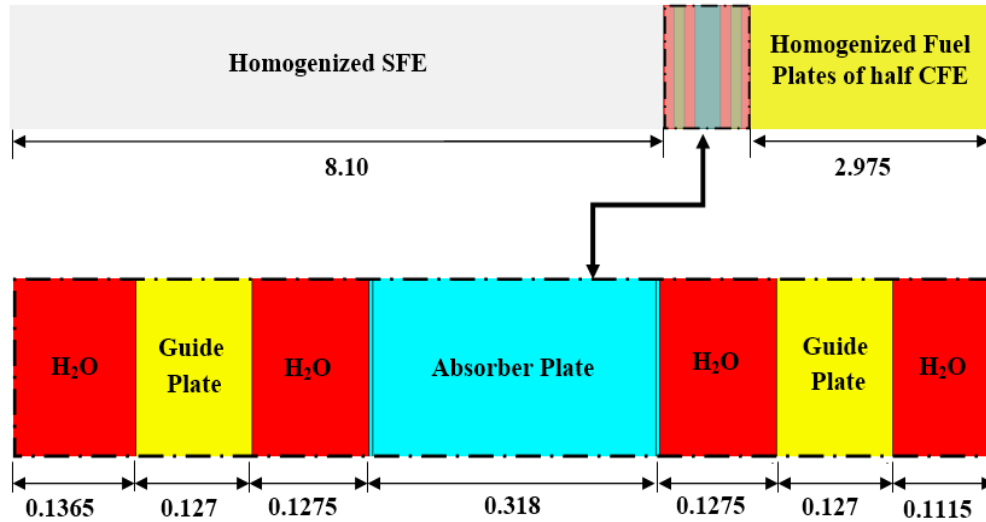


Fig. A.8: Modelo 1D ECC (dimensiones en cm)

Segundo: Modelo 2D ECC.

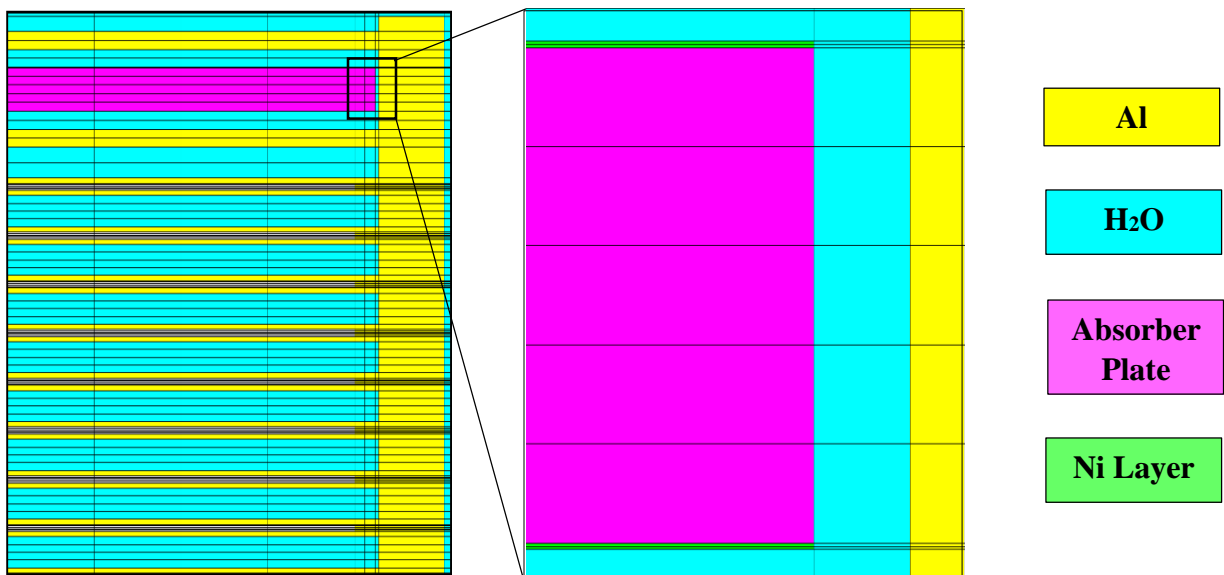


Fig. A.9: Un cuarto del modelo 2D ECC con placa control insertada

Se implementó un proceso detallado de homogeneización en virtud de la criticidad del modelo ECC. La homogeneización del modelo 1D ECC fue tal cual se indica a continuación: En primer lugar, se homogeneizó la parte central de la Fig. A.8 que contiene la placa control y su placa guía, y luego extrajo un juego de secciones eficaces macroscópicas para esta parte, En segundo lugar, se extrajo un juego de secciones eficaces macroscópicas para la placa combustible homogeneizada de la mitad del ECC. Estos dos juegos de secciones eficaces se transferirían luego a un modelo 2D ECC tal como se observa en la Fig. A.10.A, para ser empleados más adelante en el modelo del núcleo.

Mientras tanto, el proceso de homogeneización para el modelo 2D ECC se llevó adelante del siguiente modo:

En primer lugar, modelo de tres regiones con dos juegos diferentes de secciones eficaces en las que todo el modelo del ECC se homogeneizó con excepción de la placa absorbente y su vaina de Ni, Fig. A.10.A.

En segundo lugar, cinco regiones con tres juegos diferentes de secciones eficaces que corresponden a lo siguiente, Fig. A.10.B:

- A) Marco de Al con marco de agua.
- B) Dos placas guía (Al) con región absorbente entre ellas.
- C) Placas combustibles con su moderador de agua.

En tercer lugar, tres regiones con diferentes juegos de secciones eficaces, ver Fig. A.10.C:

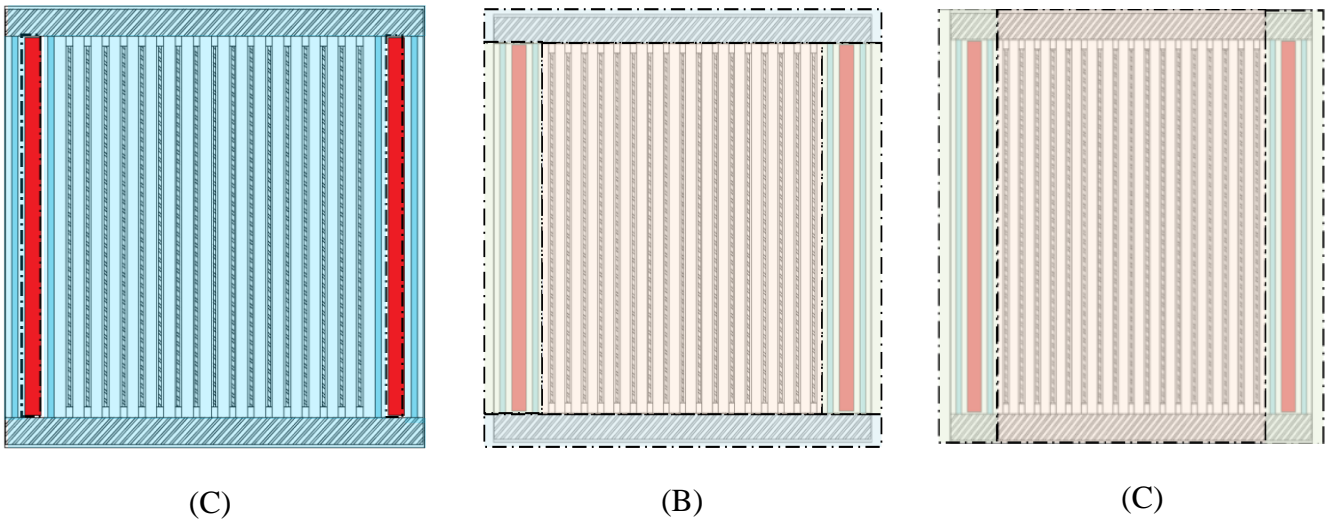


Fig. A.10: Proceso de homogeneización 2D ECC (A): primera homogeneización, (B): segunda homogeneización, (C): tercera homogeneización

A.3.1.3. Modelo de reflector.

Aquí tenemos dos tipos de reflector: agua y grafito. Para generar un modelo para ellos, se generó un modelo 1D a lo largo del eje X de la Fig. A.4 para el reflector de agua, mientras que el reflector de grafito se generó a lo largo del eje Y.

Primero: Modelo de reflector de agua a lo largo del eje X

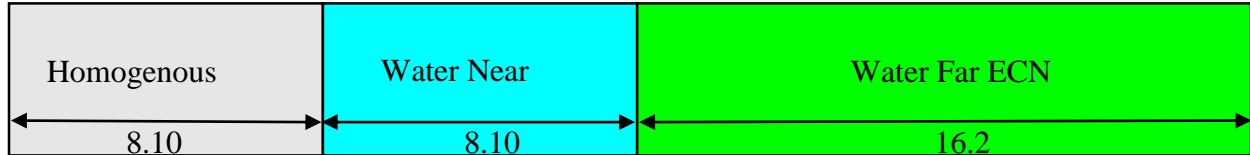


Fig. A.11: Modelo de reflector de agua (cerca y lejos) a lo largo del eje X (dimensiones en cm)

Segundo: Modelo de reflector de grafito a lo largo del eje Y

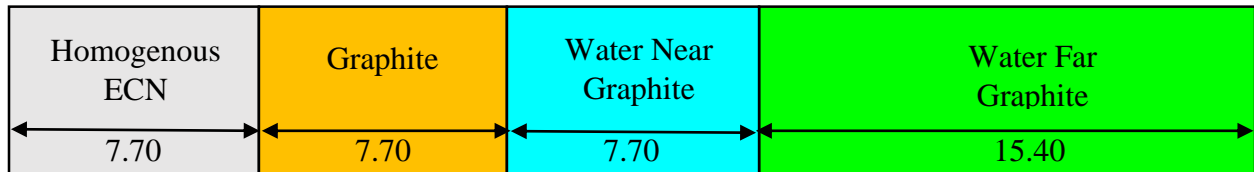


Fig. A.12: Modelo de reflector de grafito a lo largo del eje Y (dimensiones en cm)

A.3.1.4. Modelo de caja de irradiación central.

La diferencia principal entre los benchmark 233 y 643 fue la caja de irradiación central. En el benchmark 233, la región central se llenó sólo con agua, mientras que en el benchmark 643 la región central fue una caja de aluminio con un agujero lleno de agua, tal como se mencionara anteriormente. Se generó un modelo 1D a lo largo del eje X para alcanzar las secciones eficaces macroscópicas para la caja de irradiación central.

Primero: Modelo de región central para benchmark 233

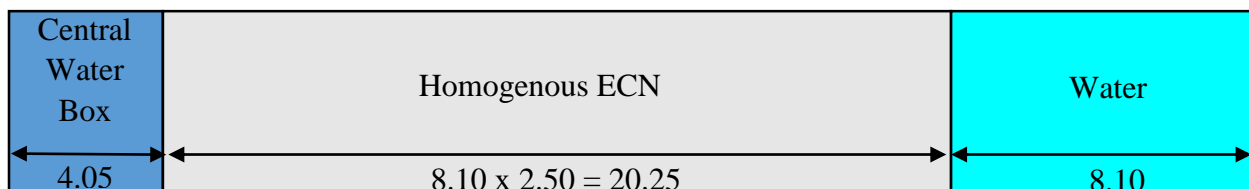


Fig. A.13: Modelo de agua de irradiación central (benchmark233) (dimensiones en cm)

Segundo: Modelo de región central para el benchmark 643

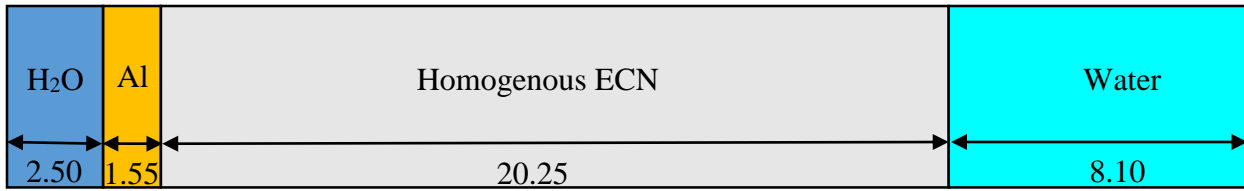


Fig. A.14: Modelo de irradiación central (H₂O y Al) (benchmark 643) (dimensiones en cm)

A.3.2. Modelo de Núcleo.

Debido a la simetría del núcleo, se modeló un cuarto 2D por medio del código CITVAP para ambos benchmark. Se empleó un total de 84 intervalos de malla en dirección X y 74 en dirección Y. El núcleo del reactor, incluyendo las filas de grafito, se refleja en todos lados con agua con un espesor correspondiente a tres elementos cada uno. Se utilizó un ahorro de 8 cm de reflector para calcular el buckling axial, lo que simula la fuga axial. Se observó que el buckling axial (B_z^2) era igual a 1,70873E-03 cm⁻².

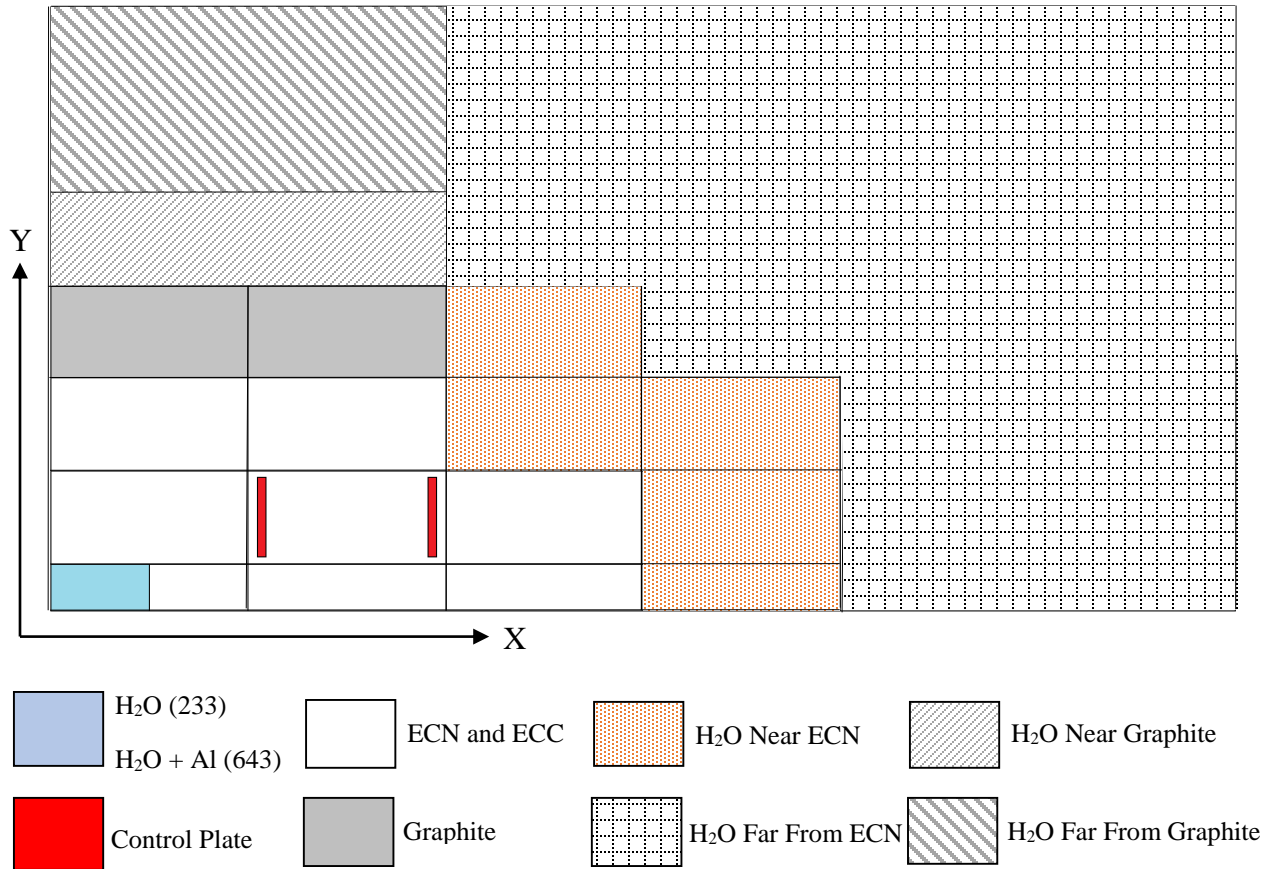


Fig. A.15: Modelo CITVAP para un cuarto de núcleo

Anexo B: Cálculo Experimental del MA con Falla Única de un Elemento de Control Empleando El Método de Caída de Barra Integral

En la sección 3.4.3.4, el cálculo experimental de la inserción de reactividad negativa en el MA con falla única de un elemento de control empleando el método de caída de barra integral se implementó por medio de la ecuación (B.1) [26]:

$$\rho_{SCRAM} = - \left[\frac{N(0) - N_f}{\int_0^{\infty} (N(t) - N_f) dt - \int_0^{\Delta T} (1 - r(t)) [N(t) - N_f] dt} \right] \sum_{i=1}^6 \beta_i / \lambda_i \quad (B.1)$$

Donde:

$N(t)$: Señal proporcional de flujo neutrónico [ampere o voltio]

$N(0)$: Valor estable inicial de señal proporcional de flujo neutrónico [ampere o voltio]

N_b : Valor estable final de señal proporcional de flujo neutrónico [ampere o voltio]

$r(t)$: Función normalizada que describe la inserción de reactividad negativa

ΔT : Duración temporal de la inserción [en segundos]

β_i : Fracción de neutrones retardados en el grupo i [pcm]

λ_i : Constante de decaimiento de precursores en el grupo i [pcm]

Empleando los viejos datos del MA con falla única de un elemento de control [17], obtenidos empleando las constantes cinéticas de ENDF/B-VI.8 junto con los datos actualizados de la ref. [16], se calculó el MA con falla única de un elemento de control para las dos posibles Cámaras de Ionización Compensada (CIC). Los datos actualizados corresponden al uso de constantes cinéticas de Tuttle, ref. [16], y contienen sólo los datos del valor más bajo del MA de las dos lecturas de las CIC. Ambas lecturas de las CIC fueron necesarias a los fines de una comparación. Se presenta a continuación un cálculo de muestra del MA con falla única de un elemento de control número 3.

$$\left(\frac{\rho_{CIC-1}}{\rho_{CIC-2}}\right)_{old} = \left(\frac{\rho_{CIC-1}}{\rho_{CIC-2}}\right)_{updated} \quad (B.2)$$

Donde:

$\rho_{CIC-1, old}$: Reactividad negativa calculada a partir de CIC -1 empleando las constantes cinéticas de ENDF/B-VI.8 $\rho_{CIC-1, old} = -4666$ pcm (tomado de ref. [17])

$\rho_{CIC-2, old}$: Reactividad negativa calculada a partir de CIC -2 empleando las constantes cinéticas de ENDF/B-VI.8 $\rho_{CIC-2, old} = -4234$ pcm (tomado de ref. [17])

$\rho_{CIC-1, updated}$: Reactividad negativa calculada a partir de CIC -1 empleando las constantes cinéticas de Tuttle $\rho_{CIC-1, updated}$ inicialmente desconocida

$\rho_{CIC-2, updated}$: Reactividad negativa calculada a partir de CIC -2 empleando las constantes cinéticas de Tuttle $\rho_{CIC-2, updated} = -4882$ pcm (tomado de ref. [16])

El empleo de la ecuación (B.2) hizo posible el cálculo de ambos valores de inserción de reactividad negativa, lo que corresponde a CIC-1 y CIC-2. Todos los valores del MA con falla única de un elemento de control de ambas lecturas (CIC-1 y CIC-2) fueron previamente presentados en la tabla 3.25.