

ASPECTOS NEUTRONICOS Y DE SEGURIDAD EN EL DISEÑO NUCLEAR DE UNA CAJA DE IRRADIACION INCORE PARA EL REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIONES RFR

Victor Sánchez

Instituto Peruano de Energía Nuclear, apartado 1687, Lima, Perú.

Recibido el 4 de diciembre de 1989.

ABSTRACT

This paper presents the neutronic calculations carried out with the codes THERMOS, WIMS-D and SNAP for the optimal design of a new Incore Irradiation Facility (CdII) at the 10 MW research reactor RFR of the Rossendorf Research Centre (ZfK-Rossendorf). Therefore has been considered both safety and effectiveness factors.

RESUMEN

Se presenta los cálculos neutrónicos realizados con los códigos THERMOS, WIMS-D y SNAP-3D para el diseño de una nueva Caja de Irradiación Incore (CdII) del Reactor RFR del Centro Nuclear de Investigaciones Rossendorf (ZfK-Rossendorf) considerando criterios de seguridad y de máxima efectividad.

1. INTRODUCCION

La necesidad de satisfacer la creciente demanda interna por radioisótopos de alta actividad (sobre todo Co-60) y de incrementar las exportaciones de múltiples radioisótopos obligaron al ente explotador del reactor RFR de 10 Mw a estudiar todas las posibilidades para cubrir tales requerimientos.

Se optó por elevar la potencia del RFR a 15 Mw con la simultánea ampliación de las facilidades de irradiación, que en la actual configuración del núcleo se encuentran en la zona del reflector. El nuevo núcleo del RFR contará con cajas de irradiación Incore, es decir posicionadas en el núcleo reemplazando a elementos combustibles.

El presente trabajo presenta el diseño neutrónico de una CdII para la producción de fuentes de Co-60 considerando sus aspectos de seguridad. Por razones de seguridad se optó en mantener la geometría exagonal de la CdII utilizando para ello la parte externa de los elementos combustibles tipo ECH-1 del RFR. Considerando que el Co-59 a irradiar es disponible en forma de varillas de un centímetro de diámetro, existe un gran número de posibilidades de

distribuir tales varillas dentro de la sección exagonal, teniendo como variables tanto el número de varillas como de distribución. Esta peculiaridad exige realizar estudios de optimización considerando primero los efectos netamente neutrónicos, lo que es factible con códigos de celdas, como por ejemplo THERMOS, WIMS-D, etc. Para dichos cálculos se parte de cinco configuraciones predefinidas cotejables entre sí considerando su comportamiento neutrónico.

Finalmente se realizan los cálculos neutrónicos para todo el núcleo (código SNAP-3D) del RFR considerando las configuraciones más favorable según los cálculos de celdas. La selección final se efectúa teniendo en cuenta la máxima actividad alcanzable por configuración y que signifique la menor perturbación del núcleo.

2. CONCEPCION DE LA NUEVA CAJA DE IRRADIACION INCORE

La nueva CdII tiene las mismas dimensiones y forma que los elementos combustibles ECH-1 incluyendo la parte superior e inferior de ingreso y salida del refrigerante. La Fig. 1 muestra un corte de los elementos combustibles exagonales a los cuales se les retira las dos secciones circulares y en cuyo lugar se distribuyen las varillas de Co-59 en una posición determinada de cada zona de quemado del núcleo de RFR, cuyo corte horizontal se muestra en la Fig. 3. Como se observa en la Fig. 3 el núcleo cilíndrico está formado por elementos combustibles exagonales tipo ECH-1 rodeados de reflector compacto de berilio y grafito donde se encuentran las diferentes posiciones de irradiación.

Los elementos combustibles tienen un enriquecimiento del 36% y por estrategia de gestión de combustible el núcleo presenta tres zonas de diferente grado de quemado a saber: zona 1, 3.8 % quemado promedio; zona 2: 12.3 % quemado promedio y zona 3, 26.6 % quemado promedio. Por razones tecnológicas y constructivas las varillas del material a irradiar (Co-59), están contenidas en tubos de Cr-Ni.

3. CONSIDERACIONES FISICO-NEUTRONICAS

La perturbación neutrónica del núcleo standard del Reactor RFR, origina al reemplazar un elemento combustible por una CdII, una distorsión local del flujo neutrónico y otras variaciones globales que se dejan notar en parámetros globales tales como el factor de multiplicación efectivo y la reactividad. Estos efectos son explicables con la teoría de perturbaciones que no es intención de este trabajo.

Las exigencias de seguridad obligan a seleccionar la configuración que posea refrigeración adecuada, y que signifique mínima perturbación hidráulica y neutrónica del núcleo. Por otro lado se sabe que la activación de muestras en reactores nucleares térmicos de investigación se realiza sobre todo por neutrones térmicos pero también por epitérmicos. Las reacciones típicas [2,3] para Co-59 son: (n,gamma), (n,p) y (n,alfa).

La ecuación conocida dada en [3] para calcular la actividad de una muestra cualquiera en el caso que el tiempo de irradiación sea mucho menor a la vida media conviene transformarlo de tal manera que su evaluación sea posible con los parámetros que nos proporcionan los códigos de cálculo. De acuerdo a ello se tiene las siguientes ecuaciones:

$$A_{ter} = G \cdot L / M \cdot \delta_{a,ter} \cdot 0.693 \cdot \tau_B / T_{1/2} \cdot \phi^3_{Co} / \phi^3_{Cell} \cdot \phi^3_{(i,j,z)}, \quad (1)$$

donde A_{ter} : actividad por neutrones térmicos; G: masa de la muestra; L: número de avogadro;

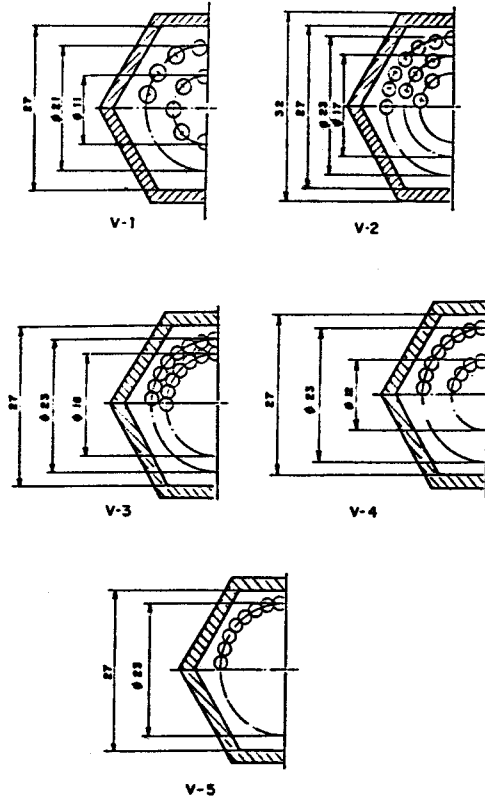


Fig. 2: Posibles configuraciones de la CdII para la irradiación de Co-59. Estas configuraciones serán posicionadas hipotéticamente

Para cualquier grupo g de energía se cumple la siguiente relación:

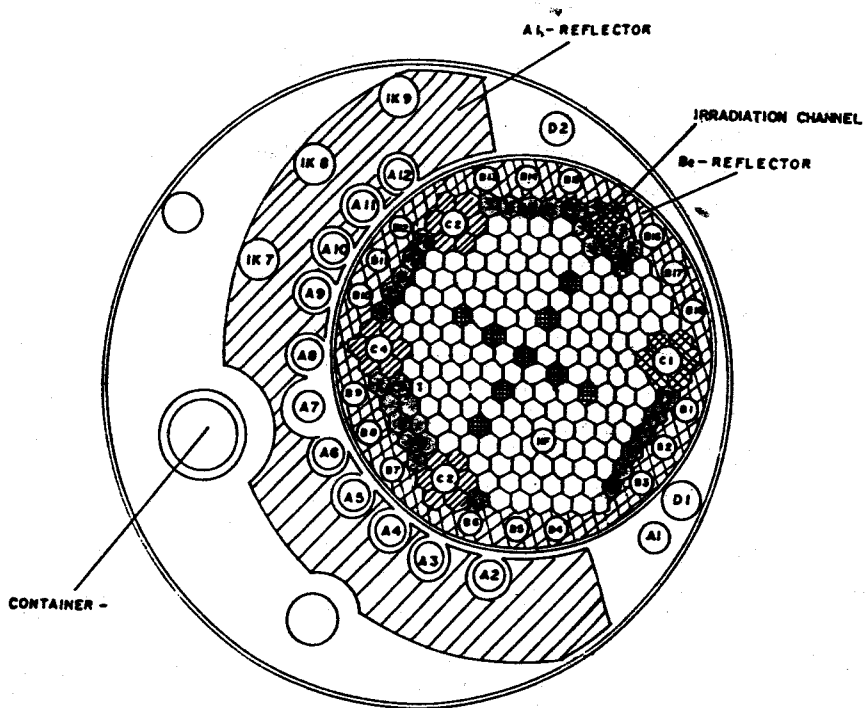
$$\phi_g(i,j,z) = \int_0^H \phi_g(i,j) * \text{sen}(\pi * (H+z)/H')/H, \quad (3)$$

donde $\phi_g(i,j)$: flujo neutrónico máximo en el plano medio $z=H/2$.

Integrando la ecuación (3) y considerando las características específicas del reactor RFR tales como buckling $B^2 = 0.002 \text{ cm}^{-2}$, $H' = 70.000 \text{ cm}$ y $H = 57.000 \text{ cm}$ se obtiene la expresión

$$\phi_g^S(i,j,z) = 0.748 * \phi_g^S(i,j), \quad (4)$$

De acuerdo a [7] donde se consideran las características del código SNAP-3D y la po-



POSICIONES DE IRRADIACION

A: EN REFLECTOR DE ALUMINIO

B: EN REFLECTOR DE BERILLO

C: EN NUCLEO

D: CANAL GIRATORIO

HF: CANAL DE ALTO FLUJO



Fig. 3: Corte horizontal del núcleo del reactor del ZfK-Rosendorf.

tencia del RFR de $P = 10$ Mw se obtiene la siguiente expresión:

$$\phi^s(i,j) = 1 / (\alpha J_z) * 1/J_f * P * \&E^s(i,j), \quad (5)$$

donde: 3.10^{-11} ws; $J_z : 2/B_z$, con $B_z = 0.04428 \text{ cm}^{-1}$; J_f : aproximadamente del integral didimensional sobre la superficie F.

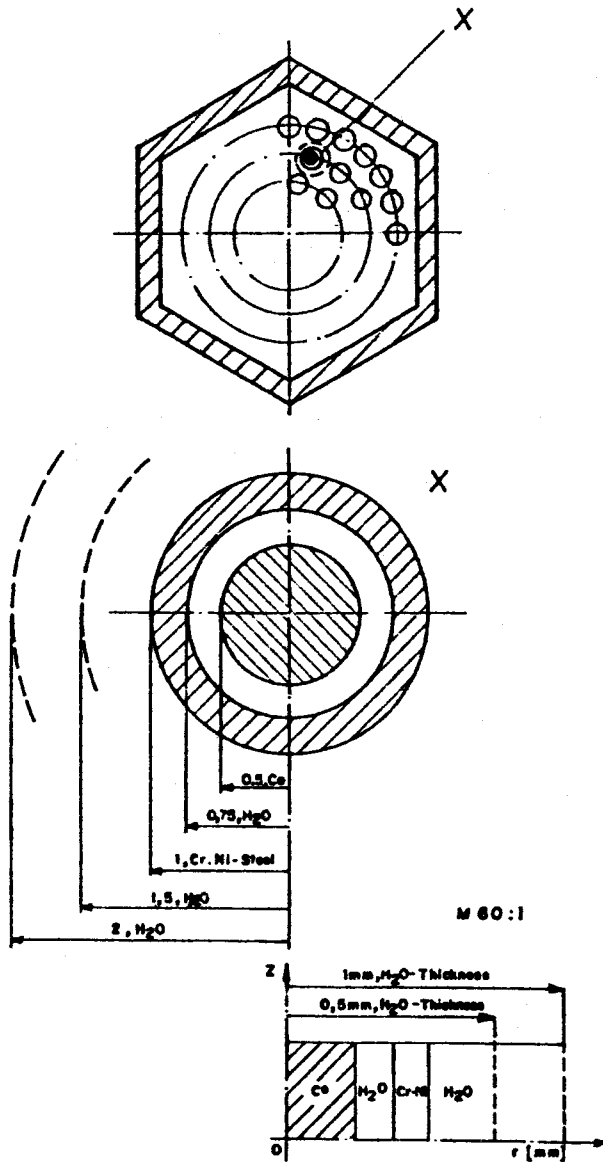


Fig. 4: Modelización geométrica para THERMOS

Reemplazando dichos valores en ecuación (5) se obtiene la expresión:

$$\phi^g(i,j) = 7.12 * 10^{15} * 1/J_F * P * \&^g(i,j), \quad (6)$$

Tanto J_F como $\&^g(i,j)$ son proporcionados por los programas de cálculo mencionados y sirven para calcular las actividades de cada configuración.

4. CALCULOS DE CELDAS

La variación local del flujo neutrónico dentro de cada configuración (V1, V2,...,V5) se calcula utilizando los códigos THERMOS [5] y WIMS-D [6].

4.1 MODELIZACION

La modelización tanto del tubo de Cr-Ni conteniendo la varilla de cobalto así como de V1,V2...V5 realizada en [7] se muestra en la Fig. 4 y 5. La tabla 1 contiene los datos sobre la composición material para su uso en THERMOS. La tabla 2 contiene los datos de entrada más importante para el cálculo con WIMS-D.

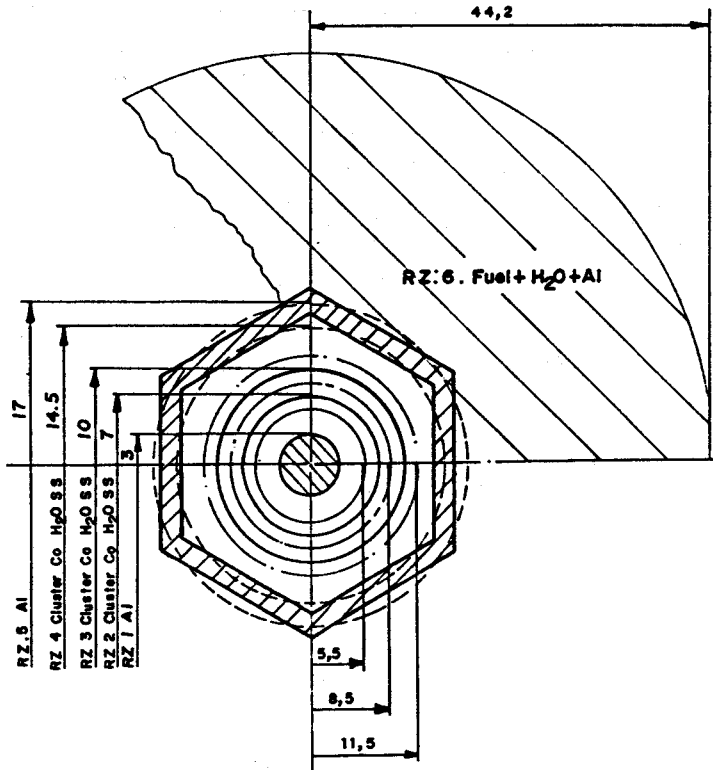


Fig. 5: Modelización geométrica de una configuración de la CdII para WIMS- D.

Tabla 1: Composición material de celda unitaria

Elementos	Densidad atómica en 10^{24} cm^{-3}
H	0.06692
O	0.03336
Co	0.08990
Mn	0.25200
Al	0.06020
SS	0.08410

Tabla 2: Composición material y datos geométricos para WIMS-D

N° de Zonas	Nombre	Elemento N° de material	Radio Externo mm	Densidad Atómica 10^{24} cm^{-3}
RZ: 1	circular	Al/2	3	0.06023
RZ: 2	cluster	Mn/4 H ₂ O/3	7	0.24300
RZ: 3	cluster	SS/5 Mn/4 H ₂ O/3 SS/5	10	0.08410 H: 0.066900 O: 0.033400
RZ: 4	cluster	Mn/4 H O/3 SS/5	14.5	
RZ: 5	circular	Al/2	17	
RZ: 6	circular	U+Al+H ₂ O	44.2	US: 0.000164 Al: 0.025880 O: 0.018380 H: 0.036750

Para la modelización se consideró las siguientes hipótesis: i) tratamiento de caja exagonal como cilindro manteniendo las proporciones de volumen constantes, la zona RZ: 6 está conformada por el volumen de U+AL+H₂O contenido en los 6 elementos combustibles circundantes de la CdII e ii) por consideraciones constructivas se considera el centro de la CdII un cilindro compacto de aluminio de 6 mm. de diámetro, ver Fig. 5.

4.2 RESULTADOS

En la Fig. 6 y en la Tabla 3 se muestra los resultados obtenidos con THERMOS para la celda unitaria de la Fig. 4. Los resultados de Tabla 3 y de gráfico 6 demuestran que: i) el espesor de agua circundante a muestra a irradiar tiene poca influencia en el valor final del flujo en Co (8%) e ii) el aluminio es más apropiado que Cr-Ni respecto a la economía de neutrones, pero que su empleo se debe a consideraciones tecnológicas.

Por otro lado, los cálculos realizados con WIMS-D para el modelo de Fig. 5. se presentan en la Fig. 7. para cada configuración V1, V2....V5 y en la tabla 4. Los resultados presentados en la gráfica de la Fig. 7. llevan a concluir en que i) no existe diferencias significativas entre los flujos neutrónicos para las diferentes configuraciones, ii) el esperado efecto de apantallamiento de las varillas de Cobalto internas por las externas es también pequeño, iii) V2 se desecha por presentar los valores más bajos de flujo y por poseer la menor cantidad de masa.

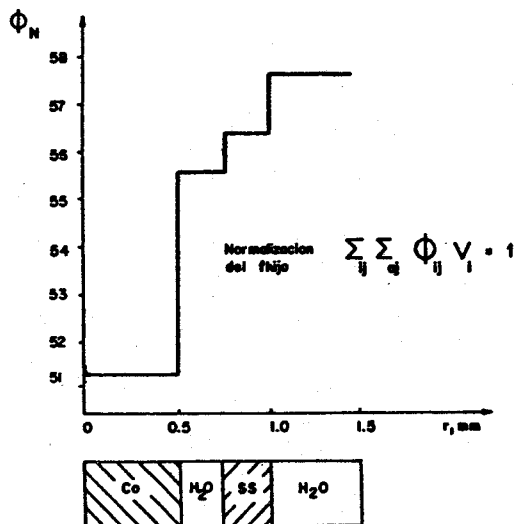


Fig. 6: Variación relativa del flujo neutrónico en la celda unitaria según THERMOS.

Tabla 3: Resultados de [7]

Espesor de Canal de agua circundante cm	Disminución en % del flujo neutrónico térmico en Co respecto al borde (agua)
0.5	87.2
1.0	85.1
2.0	82.1
3.0	81.1
4.0	80.6

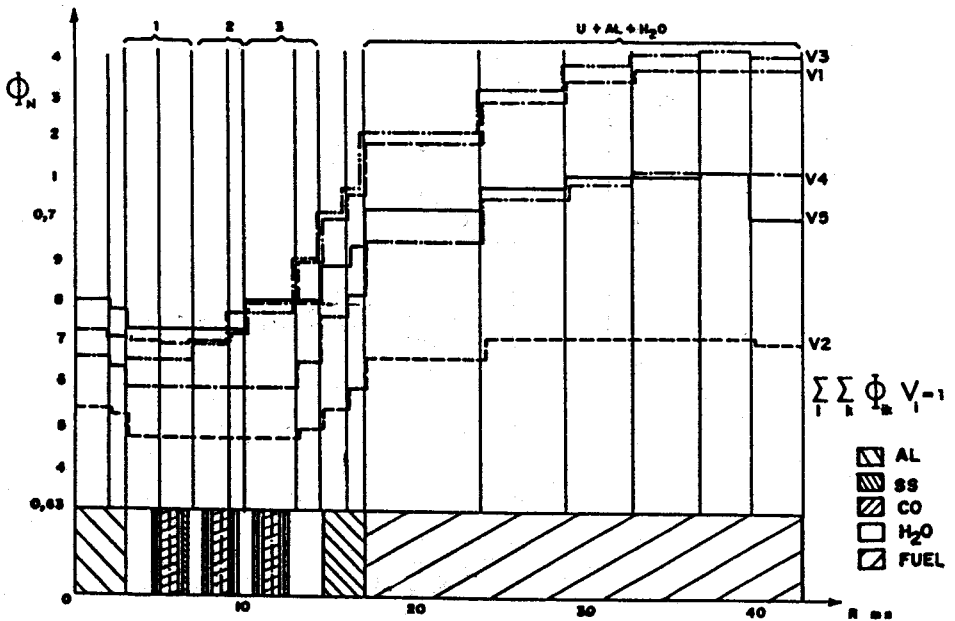


Fig. 7: Variación del flujo neutrónico dentro de cada configuración V1 ... V5 calculada con WIMS-D.

Tabla 4: Resultados obtenidos en [7] con WIMS-D

Configuración	$\phi^3_{Co} \phi^3_{Cell}$	masa de Co	gramos
V1	0.1385 0.1402 0.1436	0.1433	201.6
V3	0.1257 0.1315	0.1328	226.6
V4	0.1471 0.1398	0.1435	189.0
V5	0.1627	0.1617	126.0

5. DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION NEUTRONICA EN TODO EL NUCLEO.

5.1 MODELIZACION

Para el tratamiento con el código SNAP-3D del núcleo del RFR Fig. 3. se le modeló según la Fig. 8. La versión 2D de SNAP proporciona los valores de $k_{ef}(i,j)$, I_F y la reactividad.

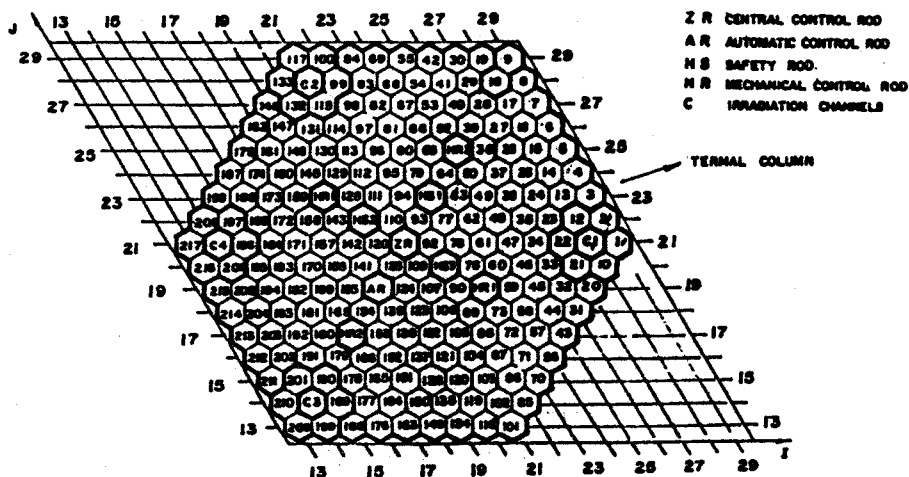


Fig. 8: Modelización geométrica del núcleo del RFR de Fig. 3. para su tratamiento neutrónico con el código SNAP-3D.

Este programa soluciona la ecuación de difusión multigrupo utilizando el método de las diferencias finitas [8,9] en las opciones de geometría x, y, z; r, O, z; hexa, z y cónicas. Los cálculos se realizaron para la posición 77 (i=23, j=22, Fig. 8.) y un quemado promedio de 3.8%, ya que según [7] en ésta zona se obtienen los flujos más altos y por ende las actividades mayores.

5.2 RESULTADOS

Los resultados obtenidos usando como datos de entrada las constantes de celda de WIMS-D se representan en la Tabla 5. De la Tabla 5. se deduce que la configuración V3 perturba en mayor grado y la V5 en menor grado al núcleo del RFR.

Tabla 5: Parámetros neutrónicos del núcleo Standard sin CdII y con las diferentes configuraciones según [7].

	K_{ef}	$\epsilon_{(i,j)}^g$			J_F
		g=1	g=2	g=3	
Standard	1.06985	0.4197	0.8745	0.3484	27.2625
V1	1.04669	0.3425	0.7489	0.2938	26.5932
V3	1.04620	0.3422	0.7463	0.2736	26.5697
V4	1.04695	0.3427	0.7500	0.3045	26.6057
V5	1.04872	0.3445	0.7584	0.3780	26.6883

6. SELECCION DE LA CAJA DE IRRADIACION INCORE MAS OPTIMA

Utilizando las ecuaciones 1, 2, 5 y 6 y los valores para los flujos relativos y absolutos proporcionados por WIMS-D y SNAP-D y considerando un tiempo de irradiación de 6000 horas así como despreciando la activación por neutrones rápidos se obtuvo las actividades para cada configuración V1, V2.... V5 que se adjuntan en la Tabla 6.

Tabla 6: Actividades por configuración.

Config.	A_{epi}^{13} Bq10 ¹³	A_{ter}^{13} Bq10 ¹³	$A_T = A_{epi} + A_{ter}$ Bq10 ¹³	$A_{espec.}$
V1	14.49	39.96	54.65	0.049
V3	16.65	41.85	58.50	0.046
V4	14.09	39.48	53.50	0.051
V5	9.55	32.74	42.50	0.060

Los resultados obtenidos demuestran: (i) La actividad total es directamente proporcional a ρ_{Co} / ρ_{Cell} , (ii) la distribución de las varillas de cobalto dentro de la CdII tienen poca influencia en el resultado final, (iii) la actividad final depende en mayor grado de la masa de Co-59 empleada y del flujo absoluto existente $\phi(i,j,z)$ e (iv) el efecto apantallamiento es menor a lo esperado.

Por lo tanto se puede concluir que desde el punto de vista neutrónico la configuración más óptima considerando las premisas iniciales es la V3.

Finalmente se debe mencionar que la selección final dependerá de aspectos constructivos y tecnológicos que el ente explotador forzosamente deberá considerar para tomar una decisión de compromiso respecto a la seguridad y efectividad.

REFERENCIAS

- [1] AUTORENKOLLEKTIV: *Sicherheitsbericht des RFR, ZfK Rossendorf, 1981.*
- [2] BAUMGAERTNER, F.: *Tabellen zur Neutronenaktivierung Thiemig Taschenbuecher (1967) 47, 52, Muenchen.*
- [3] MARTH: *Bestrahlungstechnik an Forschungsreaktoren Thiemig Taschenbuecher (1969), Muenchen.*
- [4] McCALLIEN U.A.: *A Three-Dimensional Neutron Diffusion Code SNAP-3D, United Kingdom Atomic Energy Authority TGR-Report 2677 (R) Oct. 1975.*
- [5] REICHE CHR.: *Gramos, Grace und Thermos, RFR-9/77 ZfK Rossendorf.*
- [6] ASKEW, J. R. u.a.: *A general description of Lattice Code WIMS.*
- [7] SANCHEZ ESPINOZA V. H.: *Entwicklung Incore Bestrahlungskassette zur industriellen Co-Quellen Produktion im RFR, Dipl-Arbeit N 1915, TU Dresden 1984.*
- [8] Mc GALLIEN G.W.J.: *A two-dimensional Neutron Diffusion Code SNAP- 2D, TGR-Report 1996(R) 1975, England.*
- [9] KOCH, R; FINDEISEN, A.: *Neutronenflussberechnungen zum Rossendorfer Forschungsreaktor in (hex)-und (Hex-z) Geometrie mit SNAP-3D ZfK-582, April 1986.*

Aspectos neutrónicos y de seguridad en el diseño nuclear de una caja de irradiación incore para reactor nuclear de investigaciones RFR por Victor Sánchez se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.