

# EVALUACIÓN DE FLUJO DE NEUTRONES TÉRMICOS Y EPITÉRMICOS EN UN ELEMENTO COMBUSTIBLE NORMAL Y UNA CAJA DE IRRADIACIÓN EN UN REACTOR TIPO MTR

Gomez J. <sup>(1)</sup> [jigb76@yahoo.com](mailto:jigb76@yahoo.com); Zapata M. <sup>(1)</sup> [Magaly\\_balcazar@yahoo.com](mailto:Magaly_balcazar@yahoo.com);  
 Bruna R. <sup>(1)</sup> [rbruna@ipen.gob.pe](mailto:rbruna@ipen.gob.pe); Lazaro G. <sup>(1)</sup> [glazaro@ipen.gob.pe](mailto:glazaro@ipen.gob.pe);  
 Parreño F. <sup>(1)</sup> [fparreno@ipen.gob.pe](mailto:fparreno@ipen.gob.pe)

*(1) Departamento de Cálculo, Análisis y Seguridad – IPEN / Lima, Perú*

## RESUMEN

Para el flujo de neutrones térmico y epitérmico se obtuvieron las distribuciones espaciales (sección axial y radial) de un elemento combustible normal tipo MTR del reactor RP-0 y una caja de irradiación del reactor RP-10. La distribución depende de la ubicación de los monitores de flujo en el núcleo del reactor.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los reactores peruanos RP-0 y RP-10 son de tipo MTR. El tratamiento experimental para la medición de flujo de neutrones térmicos y epitérmicos se realizó utilizando hojuelas de indio y oro con y sin cobertores de cadmio, activados por la irradiación de neutrones.

En la sección 2 se presenta el procedimiento experimental para la evaluación de la distribución de flujos. Se describe la ubicación en laminas de aluminio (espadas) de las hojuelas de indio y oro, su ubicación en la caja del combustible normal y en la caja de irradiación. En la sección 3 se presentan los resultados de las mediciones.

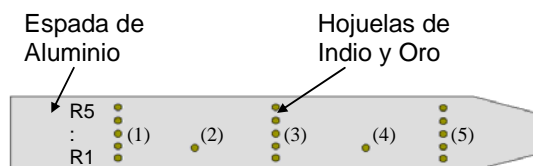
## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los elementos combustibles normales tienen una forma de paralelepípedo con 16 placas de U-238 enriquecido al 20 % (U-235) (ver Fig. 2(a)), la caja de irradiación es una caja de aluminio vacía en forma de paralelepípedo (Fig. 2(b)). La irradiación se realizó en la posición del elemento combustible E4(2-3, 5-6, 11-12, 15-16) del RP-0, y la caja de irradiación G1 del RP-10.

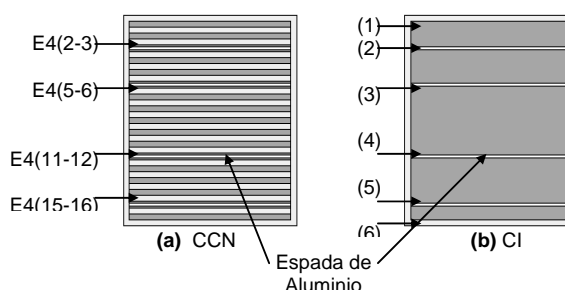
### 2.1 Preparación de monitores de flujo de neutrones térmicos y epitérmicos

Se usaron planchas de aluminio (“espadas”) para distribuir y fijar las hojuelas de indio y oro (Fig. 1), y posteriormente fueron insertadas en

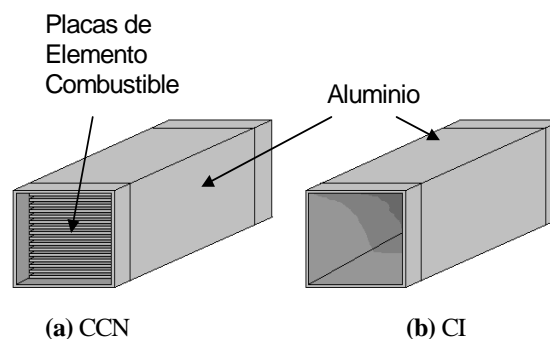
las cajas de elemento normal y en la de irradiación, como se muestra en la figura 3.



**Figura 1.** Esquema de la espada de aluminio con los monitores de activación.



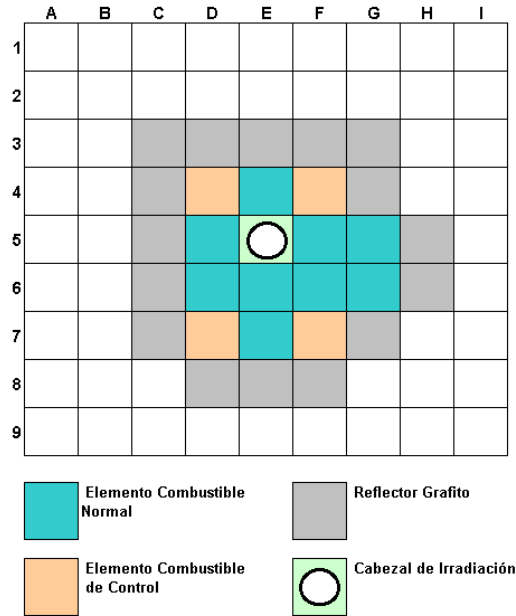
**Figura 2.** Esquema de (a) la Caja de elemento de Combustible Normal y (b) la Caja de Irradiación.



**Figura 3.** Esquema de la posición de las espadas en la CCN y la CI.

## 2.2 Ubicación en el núcleo de los reactores RP-0 y RP-10

En la figura 4 y 5, se tiene el esquema del núcleo del reactor RP-0 y RP-10 respectivamente, donde se pueden ubicar las posiciones de los elementos combustibles normales y las cajas de irradiación.



**Figura 4.** Esquema del núcleo del Reactor RP-0 (vista superior).

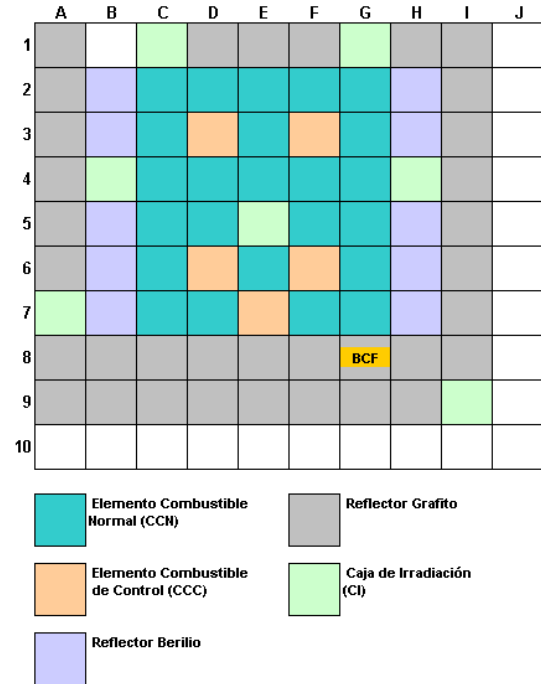
Ambos reactores son de tipo MTR, cada caja de elemento combustible normal contiene 16 placas de combustible ( $U_3O_8$ ) y cada caja de control 12 placas, las cajas de irradiación son cajas de aluminio vacías que son usadas para las diferentes aplicaciones que se da al reactor. El RP-0 tiene una potencia máxima de 10 W y el RP-10 de 10 MW.

En la Fig. 1 la espada de aluminio esta orientada en forma axial (1, 2, 3, 4 y 5) y radial (R1, R2, R3, R4 y R5). Las espadas son colocadas (insertadas) en las posiciones como se indica en la figura 3; posteriormente son ubicadas en el núcleo del reactor.

En el RP-0 (Fig. 4) es ubicada la caja de elemento combustible E5 y cuatro espadas de aluminio son ubicadas entre las placas de combustible 2-3, 5-6, 11-12 y 15-16 (Fig. 3(a)).

En el RP-10 (Fig. 5) se ubica la caja de irradiación G1 y seis espadas de aluminio están

ubicadas en las posiciones (1), (2), (3), (4), (5) y (6) (ver Fig. 3(b)).



**Figura 5.** Esquema del núcleo del Reactor RP-0 (vista superior).

## 3. RESULTADOS

La Tabla 1 muestra los parámetros de irradiación en el núcleo de los reactores RP-0 y RP-10, los cuales fueron: la posición en el núcleo, los monitores de activación empleados (hojuelas) y la potencia.

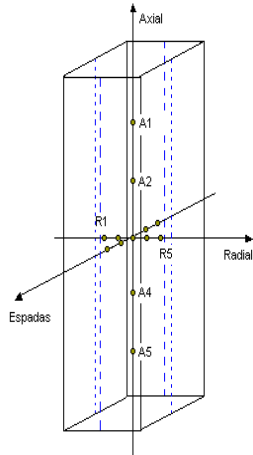
**Tabla 1.** Parámetros de Irradiación.

Reactor	Posición en el núcleo	monitores	Corriente - Potencia
RP-0	E4	Indio	0.1 e -6 A. (5 W)
RP-10	G1	Oro	0.6 e -8 A. (3.6 KW)

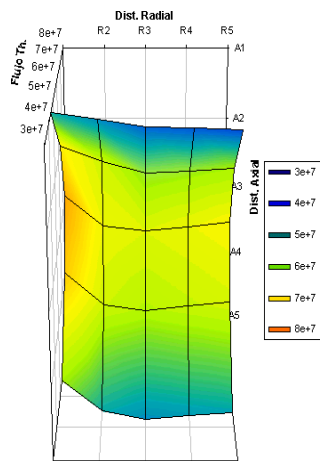
Todas las irradiaciones se realizaron en 1 hora.

La medición de las actividades de las hojuelas se realizó con una cadena de espectrometría gamma asociada a una PC y a un detector de INa (Canberra) para las hojuelas de indio en el RP-0, y un detector de GeHP (Canberra) para las hojuelas de oro en el RP-10.

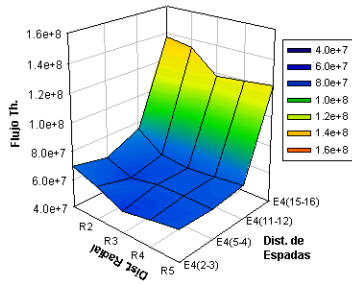
En las figuras 6 se observa la distribución en la zona central de las cajas de los monitores de activación (radial, axial y por espadas) y en la figura 7 el flujo térmico según esta distribución en el CCN.



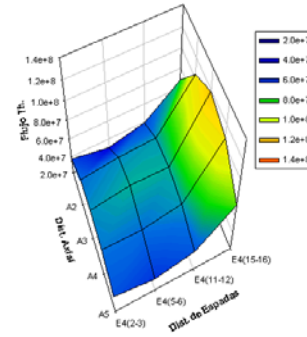
**Figura 6.** Esquema de la distribución en la zona central de la caja (CCN, CI).



**Figura 7 (a).** Distribución del flujo térmico en la dirección axial y radial en el CCN.

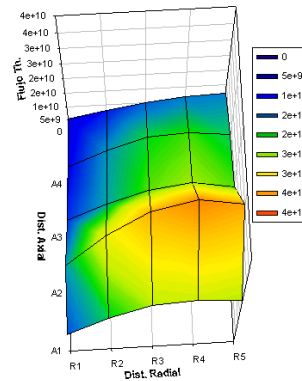


**Figura 7 (b).** Distribución del flujo térmico en la dirección radial según la ubicación de las espadas en el CCN.

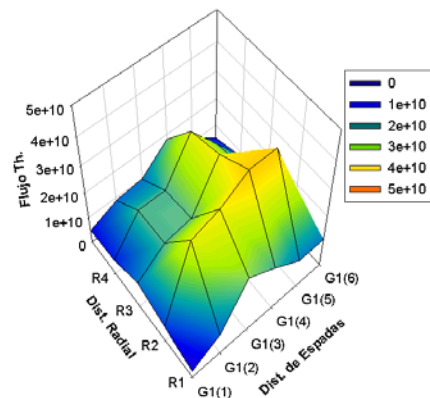


**Figura 7 (c).** Distribución del flujo térmico en la dirección axial según la ubicación de las espadas en el CCN.

En la figura 8 se muestra la distribución del flujo térmico en los 3 ejes centrales de la CI según la figura 6.



**Figura 8 (a).** Distribución del flujo térmico en la dirección axial y radial en el CI.



**Figura 8 (b).** Distribución del flujo térmico en la dirección radial según la ubicación de las espadas en el CI.

En las tablas 2 y 3 se detallan los flujos de neutrones térmicos y Epitérmicos ( $n_s/cm^2s$ ) en

la caja del elemento combustible normal (CCN) por espadas insertadas que tienen los monitores de activación distribuidos en forma radial (R1... R5) y axial (A1... A5), y en las tablas 4 y 5 los flujos en la caja de irradiación (CI).

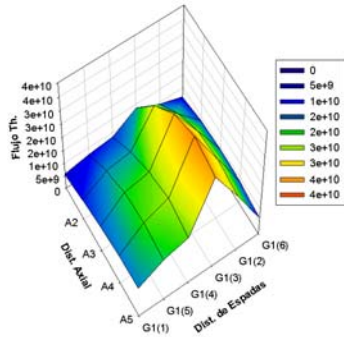


Figura 8 (c). Distribución del flujo térmico en la dirección axial según la ubicación de las espadas en la CI.

Tabla 2. Flujo de neutrones térmicos en la CCN.

Distribución Radial					
Ax.	R1	R2	R3	R4	R5
<b>E4 (2-3)</b>					
A1	4.33E+07	4.01E+07	3.71E+07	3.59E+07	3.47E+07
A2	6.23E+07	5.73E+07	5.01E+07	5.22E+07	5.43E+07
A3	6.92E+07	6.35E+07	5.48E+07	5.81E+07	6.14E+07
A4	6.31E+07	5.81E+07	5.08E+07	5.38E+07	5.67E+07
A5	4.70E+07	4.40E+07	4.05E+07	4.26E+07	4.46E+07
<b>E4 (5-6)</b>					
A1	3.45E+07	3.09E+07	2.98E+07	3.40E+07	3.81E+07
A2	5.78E+07	5.13E+07	5.42E+07	5.51E+07	5.60E+07
A3	6.39E+07	5.66E+07	6.05E+07	6.06E+07	6.06E+07
A4	5.58E+07	4.76E+07	5.00E+07	5.15E+07	5.31E+07
A5	4.39E+07	3.45E+07	3.46E+07	3.84E+07	4.22E+07
<b>E4 (11-12)</b>					
A1	4.52E+07	4.20E+07	3.87E+07	3.80E+07	3.73E+07
A2	7.01E+07	5.86E+07	5.64E+07	5.77E+07	5.89E+07
A3	7.53E+07	6.21E+07	6.01E+07	6.18E+07	6.35E+07
A4	7.09E+07	5.84E+07	5.62E+07	5.78E+07	5.94E+07
A5	5.50E+07	4.51E+07	4.23E+07	4.35E+07	4.46E+07
<b>E4 (15-16)</b>					
A1	7.89E+07	7.33E+07	6.77E+07	7.14E+07	7.51E+07
A2	1.21E+08	1.17E+08	1.04E+08	1.06E+08	1.09E+08
A3	1.37E+08	1.34E+08	1.18E+08	1.20E+08	1.22E+08
A4	1.26E+08	1.21E+08	1.06E+08	1.08E+08	1.09E+08
A5	9.36E+07	8.32E+07	7.28E+07	7.26E+07	7.24E+07

Tabla 3. Flujo de neutrones epitérmicos en la CCN.

Distribución Radial					
Ax.	R1	R2	R3	R4	R5
<b>E4 (2-3)</b>					
A1	6.86E+06	6.36E+06	5.88E+06	5.69E+06	5.50E+06
A2	9.64E+06	8.86E+06	7.75E+06	8.07E+06	8.40E+06
A3	1.06E+07	9.76E+06	8.42E+06	8.93E+06	9.44E+06
A4	9.43E+06	8.68E+06	7.60E+06	8.04E+06	8.48E+06
A5	6.32E+06	5.91E+06	5.44E+06	5.72E+06	6.00E+06
<b>E4 (5-6)</b>					
A1	6.06E+06	5.42E+06	5.23E+06	5.96E+06	6.69E+06
A2	9.11E+06	8.08E+06	8.53E+06	8.67E+06	8.82E+06
A3	9.90E+06	8.77E+06	9.37E+06	9.38E+06	9.39E+06
A4	8.70E+06	7.43E+06	7.80E+06	8.04E+06	8.29E+06
A5	6.97E+06	5.48E+06	5.50E+06	6.10E+06	6.70E+06
<b>E4 (11-12)</b>					
A1	7.62E+06	7.08E+06	6.53E+06	6.41E+06	6.29E+06
A2	1.18E+07	9.86E+06	9.49E+06	9.71E+06	9.92E+06
A3	1.27E+07	1.05E+07	1.01E+07	1.04E+07	1.07E+07
A4	1.18E+07	9.70E+06	9.34E+06	9.60E+06	9.86E+06
A5	8.52E+06	6.99E+06	6.55E+06	6.73E+06	6.91E+06
<b>E4 (15-16)</b>					
A1	9.53E+06	8.85E+06	8.17E+06	8.62E+06	9.07E+06
A2	1.33E+07	1.29E+07	1.14E+07	1.17E+07	1.20E+07
A3	1.47E+07	1.44E+07	1.27E+07	1.29E+07	1.31E+07
A4	1.40E+07	1.35E+07	1.19E+07	1.20E+07	1.22E+07
A5	1.22E+07	1.08E+07	9.49E+06	9.46E+06	9.43E+06

El error de la medición del flujo térmico es menor que 3.3% y en el epitérmico menor que el 7.8% en ambas cajas.

**Tabla 4.** Flujo de neutrones térmicos en la CI

<b>Distribución Radial</b>					
Ax.	R1	R2	R3	R4	R5
<b>G1 (1)</b>					
A1	2.79E+09	3.18E+09	5.33E+09	3.67E+09	2.50E+09
A2	3.82E+09	4.17E+09	7.63E+09	4.97E+09	2.47E+09
A3	4.93E+09	5.36E+09	9.86E+09	6.28E+09	2.58E+09
A4	5.42E+09	6.33E+09	1.14E+10	6.99E+09	2.53E+09
A5	5.50E+09	6.14E+09	1.18E+10	7.20E+09	2.16E+09
<b>G1 (2)</b>					
A1	4.67E+09	6.89E+09	7.08E+09	1.18E+10	5.56E+09
A2	6.98E+09	1.19E+10	1.29E+10	2.36E+10	7.64E+09
A3	9.07E+09	1.52E+10	1.72E+10	3.16E+10	8.29E+09
A4	9.81E+09	1.78E+10	1.80E+10	3.26E+10	7.20E+09
A5	1.06E+10	1.59E+10	1.65E+10	3.17E+10	5.82E+09
<b>G1 (3)</b>					
A1	5.34E+09	7.12E+09	8.07E+09	1.37E+10	9.29E+09
A2	7.60E+09	1.25E+10	1.41E+10	2.61E+10	1.70E+10
A3	9.76E+09	1.69E+10	1.87E+10	3.46E+10	2.17E+10
A4	1.18E+10	1.81E+10	2.10E+10	3.78E+10	2.30E+10
A5	1.21E+10	1.68E+10	1.84E+10	3.52E+10	2.18E+10
<b>G1 (4)</b>					
A1	8.91E+09	1.20E+10	1.35E+10	1.58E+10	1.10E+10
A2	1.40E+10	2.35E+10	2.58E+10	3.05E+10	1.53E+10
A3	1.81E+10	3.15E+10	3.44E+10	4.00E+10	1.66E+10
A4	2.07E+10	3.28E+10	3.80E+10	4.21E+10	1.52E+10
A5	2.27E+10	3.18E+10	3.54E+10	4.18E+10	1.25E+10
<b>G1 (5)</b>					
A1	6.15E+09	8.17E+09	9.31E+09	1.56E+10	7.40E+09
A2	9.09E+09	1.54E+10	1.68E+10	3.07E+10	1.05E+10
A3	1.16E+10	2.01E+10	2.19E+10	4.03E+10	1.12E+10
A4	1.26E+10	1.99E+10	2.32E+10	4.20E+10	9.32E+09
A5	1.39E+10	1.94E+10	2.16E+10	4.16E+10	7.71E+09
<b>G1 (6)</b>					
A1	4.19E+09	5.56E+09	6.34E+09	1.06E+10	7.31E+09
A2	4.52E+09	7.64E+09	8.35E+09	1.49E+10	9.95E+09
A3	4.75E+09	8.29E+09	9.01E+09	1.59E+10	1.06E+10
A4	4.58E+09	7.20E+09	8.40E+09	1.48E+10	9.28E+09
A5	4.16E+09	5.82E+09	6.49E+09	1.19E+10	7.62E+09

**Tabla 5.** Flujo de neutrones epitérmicos en la CI.

<b>Distribución Radial</b>					
Ax.	R1	R2	R3	R4	R5
<b>G1 (1)</b>					
A1	3.78E+07	4.03E+07	7.34E+07	6.56E+07	1.86E+08
A2	8.33E+07	9.01E+07	1.73E+08	1.50E+08	2.24E+08
A3	1.15E+08	1.26E+08	2.55E+08	2.00E+08	2.53E+08
A4	1.32E+08	1.44E+08	2.98E+08	2.32E+08	2.54E+08
A5	1.25E+08	1.36E+08	2.85E+08	2.10E+08	1.99E+08
<b>G1 (2)</b>					
A1	6.89E+07	1.18E+08	1.21E+08	2.20E+08	5.59E+08
A2	1.60E+08	2.69E+08	2.72E+08	5.22E+08	6.76E+08
A3	2.32E+08	3.60E+08	3.67E+08	7.40E+08	7.36E+08
A4	2.73E+08	3.85E+08	3.90E+08	8.05E+08	6.87E+08
A5	2.62E+08	3.60E+08	3.66E+08	7.65E+08	5.35E+08
<b>G1 (3)</b>					
A1	7.35E+07	1.23E+08	1.29E+08	2.34E+08	2.08E+08
A2	1.70E+08	2.71E+08	2.94E+08	5.65E+08	4.89E+08
A3	2.56E+08	3.70E+08	4.04E+08	8.18E+08	6.40E+08
A4	3.00E+08	3.91E+08	4.26E+08	8.81E+08	6.85E+08
A5	2.86E+08	3.65E+08	3.98E+08	8.31E+08	6.14E+08
<b>G1 (4)</b>					
A1	1.34E+08	2.20E+08	2.35E+08	3.87E+08	1.12E+09
A2	3.31E+08	5.22E+08	5.64E+08	9.45E+08	1.39E+09
A3	5.14E+08	7.40E+08	8.15E+08	1.32E+09	1.60E+09
A4	6.15E+08	8.05E+08	8.79E+08	1.45E+09	1.56E+09
A5	5.96E+08	7.65E+08	8.32E+08	1.30E+09	1.20E+09
<b>G1 (5)</b>					
A1	1.20E+08	1.97E+08	2.10E+08	3.83E+08	9.73E+08
A2	2.89E+08	4.54E+08	4.91E+08	9.42E+08	1.25E+09
A3	4.03E+08	5.80E+08	6.38E+08	1.29E+09	1.31E+09
A4	4.79E+08	6.26E+08	6.84E+08	1.41E+09	1.25E+09
A5	4.39E+08	5.64E+08	6.13E+08	1.28E+09	9.01E+08
<b>G1 (6)</b>					
A1	3.39E+08	5.59E+08	5.96E+08	1.09E+09	9.70E+08
A2	4.30E+08	6.76E+08	7.31E+08	1.40E+09	1.22E+09
A3	5.11E+08	7.36E+08	8.10E+08	1.63E+09	1.28E+09
A4	5.25E+08	6.87E+08	7.50E+08	1.55E+09	1.20E+09
A5	4.17E+08	5.35E+08	5.82E+08	1.22E+09	8.96E+08

#### **4. CONCLUSIONES**

Se observa que el flujo de neutrones térmicos en una caja de elemento combustible normal es mayor en la periferia que en el centro, demostrando la pérdida de energía de los neutrones producidos por la fisión del Uranio en su trayectoria.

El caso contrario, ocurre en la caja de irradiación en la que tenemos un mayor flujo de neutrones térmicos en la zona central, esta caja esta llena de agua (refrigerante) el cual es el moderador de los neutrones en el núcleo del reactor.

#### **5. REFERENCIA**

- [1] Jeraj, R., Glumac, B. Characterization of Irradiation Facilities in the Triga Reactor Core, Nuclear Energy in Central Europe 2000, p 107.1-107.7, September 2001.