

# Medición del factor de pico y la potencia neutrónica de un reactor nuclear

Agustín Zuñiga<sup>1,2,\*</sup>, José Lamas<sup>2</sup>, Esteban Cerrón<sup>2</sup>, Israel Huapaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>2</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Apartado Postal 14-0149, Lima 14, Perú

## Resumen

Para mantener la operación segura de los reactores nucleares es necesario evaluar su operatividad para situaciones extremas, esto se realiza tanto en la etapa de diseño cuanto durante la operación comercial. Una manera de hacerlo es determinar el punto donde la generación de calor es máxima y cuánto mayor es respecto al promedio del núcleo. Ese cociente se denomina el factor de pico (K), usualmente es conocido únicamente por cálculo. Sin embargo algunas veces, hay oportunidad de medirlos, como es el caso cuando los reactores son puestos en servicio y se dispone de núcleos frescos y tiempo para las irradiaciones (50 operaciones a baja potencia y casi 3 meses de trabajo). En este artículo se presentan los resultados de las mediciones realizadas en el reactor peruano RP10, mediante la técnica de activación de monitores metálicos (hojuelas): Factor de pico total  $K_t = 2.9 \pm 0.1$ , factor de pico axial,  $K_a = 1.3 \pm 0.1$ , y factor de pico radial,  $K_r = 2.3 \pm 0.1$ . También se determinó el flujo térmico medio del núcleo,  $\bar{\phi} = 3.7 \pm 0.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y la potencia del reactor para la configuración 14,  $P = 88 \pm 5 \text{ W}$ , correspondiente a la corriente de marcha CM-4,  $3.0 \times 10^{-10} \text{ A}$ .

## Abstract

To maintain the safe operation of nuclear reactors is necessary to evaluate its operations for extreme situations, this is done both in the design phase terms during the commercial operation. One way of doing this is to determine the point where heat generation is highest and how much greater compared to the average core. That ratio is called the peak factor (PF), is usually known only by calculation. But sometimes, there is opportunity to measure it, as when the reactors are put into service and is available fresh cores and time for irradiation (50 operations at low power and almost 3 months). This paper presents the results of the measurements made in the Peruvian nuclear reactor, RP10, using the technique of activation metal monitors (flakes). Factor peak total  $K_t = 2.9 \pm 0.1$ , factor peak axial,  $K_a = 1.3 \pm 0.1$ , and factor peak radial  $K_r = 2.3 \pm 0.1$ . Also we measured the average thermal flux  $\bar{\phi} = 3.7 \pm 0.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , and power reactor in core configuration 14,  $P = 88 \pm 5 \text{ W}$ , corresponding to the current of CM4,  $3.0 \times 10^{-10} \text{ A}$ .

**Palabras claves:** Peak Factor Measurement - Neutronic Power Measurement - Experimental Reactor Physics

## 1. Introducción

Los reactores nucleares deben trabajar de manera segura, para ese fin desde el diseño se consideran situaciones de máxima exigencia para los sistemas de mitigación del calor en las placas combustibles, dado que el máximo accidente que puede ocurrir en un reactor nuclear de investigación es el derretimiento de los elementos combustibles.

Se sabe que los reactores nucleares trabajan como máximo a la potencia nominal de diseño, para el reactor RP-10 se considera 10MW. Esta potencia corresponde al promedio alcanzada en la configuración. Por lo que es natural que en algún punto, este valor sea superado hasta un valor máximo. Hasta cuánto es este máximo respecto al

medio, es una condición de seguridad exigida para la licencia de cualquier configuración nuclear del reactor. Vale decir, se debe probar para el punto de máxima exigencia, que el sistema de remoción de calor está plenamente asegurado.

Conocer la razón de la potencia media al máximo, es decir el factor de forma (K), o factor de pico, se realiza mediante la medición de la distribución de flujo neutrónico térmico en cada punto de la configuración nuclear, conocida esta distribución espacial, es posible rápidamente conocer el medio y el máximo (punto más caliente), y desde allí el factor de forma.

\*Correspondencia autor: azuniga@ipen.gob.pe

En nuestro trabajo esta medición se realizó para la configuración nuclear 14 del RP-10, núcleo fresco, mediante la técnica de activación de indicadores metálicos (hojuelas). Conocer experimentalmente este valor podría ayudar a los calculistas para afinar y evaluar sus modelos.

## 2. Fundamento Teórico

**La potencia neutrónica.** La potencia de operación de un reactor va a quedar definida por las que alcanza el punto máximo (o el canal caliente) y con seguridad está por encima del valor medio. Este cociente entre el máximo y el medio, que resulta, no puede ser mayor que un determinado valor. Sin embargo este puede disminuir si se levanta el cociente, es decir la potencia media, hacer esto es tender a aplanar la distribución de potencia o de flujo neutrónico en el núcleo. Esto puede realizarse por ejemplo con los reflectores o poner en las zonas centrales, donde el flujo alcanza valores mayores, elementos combustibles de menos enriquecimiento o más quemados. Esta gestión de combustible ayuda a mejorar la seguridad y también a disminuir el costo de energía producida por el reactor.

La potencia (energía liberada por unidad de tiempo) producida por las fisiones en el reactor va a corresponder a todas las fisiones que se realicen, es decir, se deben considerar las fisiones térmicas, epitérmicas y rápidas. La expresión final para la potencia resulta.

$$P(W) = \gamma \int \int \Sigma_f(E) \phi(r, E) d^3 r dE$$

que en la versión operativa es la siguiente:

$$P(W) = 1.60 \cdot 10^{13} E_{R} \frac{N_A M^{235}}{A^{235}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} g^{235}(T) \sqrt{\frac{T_0}{T}} \sigma_f^{235} f_D \tilde{\phi} (1 + \alpha_{epi} + \alpha_{rap})$$

Los valores utilizados para el caso de la configuración estudiada fueron:

$$E_R = 192.9 \text{ MeV}, A = 235, N_A = 6.023 \times 10^{23}, M^{235} = n^\circ \text{ placas} \times 17.5 \text{ g} = 5.53 \text{ Kg}, g^{235} = 0.97, T_0 = T, \sigma_f^{235} = 582.2 \times 10^{24} \text{ cm}^2, f_D = 0.935, \alpha_{rap} = 0, I^{235} = 276.3 \pm 2.8 \times 10^{24} \text{ cm}^2$$

Con las definiciones siguientes:

$$\alpha_{epi} = \tilde{\lambda} \frac{I^{25}}{f_D \sigma_f^{235}}$$

$$\lambda = \frac{\phi_{epi}}{\phi_{th}}$$

**Flujo medio.** El flujo neutrónico térmico medio de la configuración, que se emplea en la determinación de la potencia, la definimos como el promedio pesado por la masa en cada caja.

$$\tilde{\phi} = \frac{\sum_j m_j \phi_j}{\sum_j m_j}$$

donde:

$m_j$  : masa de la caja j-ésima, (g);  $\phi_j$  = flujo medio en la caja j-ésima;  $J = n^\circ$  de cajas de la configuración.

La relación nos permite establecer que la potencia es proporcional al flujo medio en cada caja.

**Factor de forma total,  $K_t$**  Es la razón entre el punto máximo con el promedio del núcleo

$$K_t = \frac{P_{maximo}}{P_{nucleo}}$$

$$K_t = \frac{[g(T) A_{th} (1 + \alpha_{epi})]_{max}}{\frac{\sum_i p_i g_i(T) \tilde{A}_{i,th} (1 + \alpha_{i,epi})}{\sum_i p_i}}$$

**Factor de forma axial,  $K_a$**  Es la razón entre el punto máximo con el valor medio de la caja:

$$K_a = \frac{P_{max}}{P_{placa}}$$

**Factor de forma radial,  $K_r$**  Es la razón entre el valor en placa con el valor medio del núcleo:

$$K_r = \frac{P_{placa}}{P_{nucleo}}$$

### 3. Desarrollo Experimental

El procedimiento experimental se inició con la preparación de los monitores metálicos (hojuelas), determinando su masa en una balanza electrónica, con aproximación hasta microgramos e identificándolo con un número o código. Estos monitores se guardaron en sobres sellados de plástico, adjuntando sus características, tales como, peso, diámetro, espesor y código.

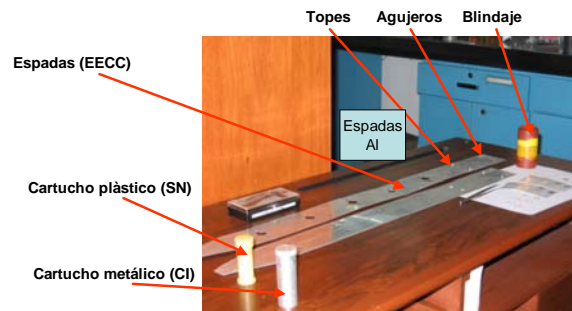
Previamente se construyeron espadas de aluminio, de espesor 2mm, donde se posicionaron los monitores en puntos separados 10.3 cm en la dirección axial (z) y 13 mm en la dirección radial (X), estas espadas, de longitud 92 cm, tenían en la parte superior un tope (a 72 cm) que permitía ingresar en el canal solo hasta la posición establecida por este tope. Igualmente en la parte superior se dispuso de dos agujeros por los que se introdujeron hilos para su manipulación (posicionamiento en la caja y canal definido) desde la boca de tanque situada a 11 metros de altura desde la base del núcleo.

En una sola espada se podía incorporar hasta 11 monitores desnudos, mientras para el caso de bajo cadmio se dejaban vacías posiciones intermedias, para evitar autoabsorción de neutrones, con lo que los monitores bajo cadmio estaban separadas el doble, que los desnudos, es decir 20.6 cm en Z y 2.6 cm en X. En la Figura 1, se muestran los materiales básicos utilizados. En la Figura 2 el esquema del portamuestra en la forma de espada. En la Figura 3 se presenta una vista de planta de un elemento combustible normal mostrando la longitud activa del combustible en la dirección axial (eje-z), 61.5 cm; las longitudes en la dirección radial, 62.75 en el eje X y 81.24 en el eje Y; el ancho de canal 3.3 cm; el número de placas por caja, 16. El monitor testigo se posicionó dentro de una caja de irradiación (PI o CI) en la posición escogida, D34Y, la cual se mantuvo en todas las irradiaciones. De acuerdo a los procedimientos establecidos, el cartucho de aluminio conteniendo el monitor metálico desnudo, se pasó previamente por la prueba de estanqueidad (sumergiéndolo en nitrógeno líquido y no observado emanación de burbujas de aire).

El cartucho con el monitor testigo y las espadas con los monitores (desnudos o bajo cadmio) correspondientes, se posicionaron en las cajas y canales programados antes del

inicio de la operación. Para no cometer confusiones, uno de los responsables del trabajo experimental (grupo de física experimental de reactores) acompañaba a los operadores.

La potencia de operación se programó al orden de 100 vatios, con ello los tiempos de irradiación no superaron los 60 minutos. Llegado al fin de irradiación se extraía primero la caja del monitor testigo en el momento que se hacía scram, mientras que las espadas se procedían cuando el reactor estaba completamente apagado.

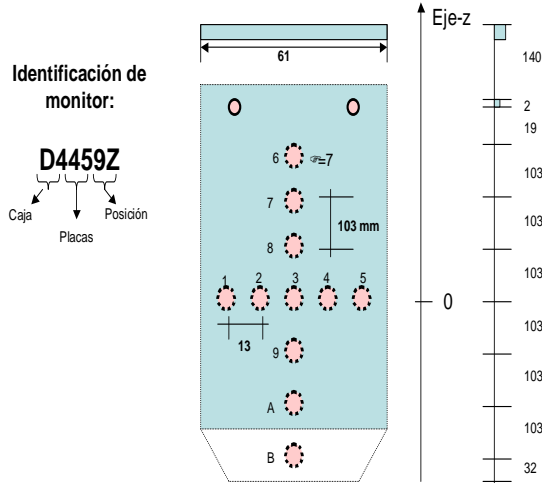


**Figura 1:** Materiales básicos utilizados: espadas de aluminio como portamuestras para la medición de las distribuciones de flujo en los canales de las cajas de elementos combustibles; cartuchos de plástico y aluminio; monitores metálicos; blindajes.

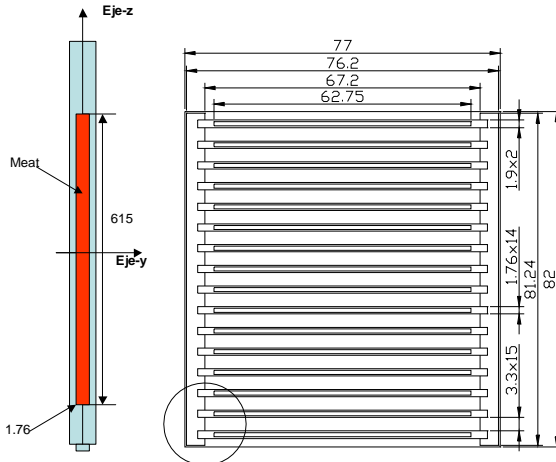
El desmontaje de los monitores se hacía luego de esperar unos minutos para que decaiga la actividad del aluminio. Para la medición de la actividad de los monitores, se los ubicaban en los portamuestras del sistema automático del movimiento de muestras (SAMM), el cual permitía la programación del tiempo de medición por muestra y el número de repeticiones (vueltas hasta que retorne el mismo monitor). Este sistema estaba acoplado a una cadena de medición con detector INa (Tl) 2x2, ubicado dentro de un blindaje adecuado.

La condición para definir el tiempo de medición era que el conteo bajo el fotopico del manganeso, no fuese menor a 10000 cuentas, con ello asegurábamos errores menores al 1%. Todas las actividades se normalizaron con el correspondiente al Testigo. El conjunto de las mediciones eran guardadas en el computador para el tratamiento posterior. Los monitores luego de las mediciones eran devueltos a sus sobres correspondientes.

**Figura 2:** Esquematación de las dimensiones de



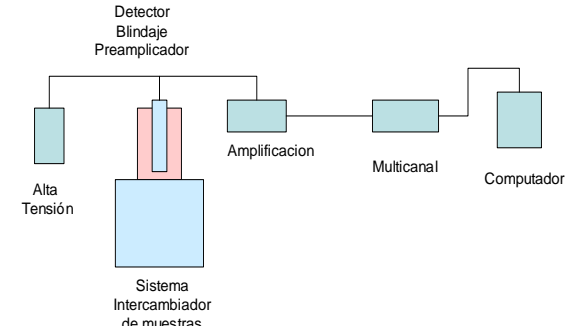
la espada de aluminio, utilizada como portamuestra de los monitores metálicos, desnudos y bajo cadmio.



**Figura 3:** Vista de planta de las dimensiones de una caja de elemento combustible en cuyos canales se ubicaron las espadas portamuestras para determinar las distribuciones de flujo térmico. Las placas tienen un área activa de 615 mm x 1.76 mm.

En la Figura 4 se presenta el esquema de los equipos empleados. No se pudieron ubicar espadas en los elementos combustibles de control por lo que las actividades para estas cajas se tomaron del cálculo, a los que le asignamos un error máximo del 10%. Las mediciones para cubrir todo el núcleo duraron aproximadamente 3 meses.

En la Figura 5 se presenta la configuración nuclear número 14 respecto al cuál se realizaron las mediciones.



**Figura 4:** Esquema del equipo de medición utilizado.

#### 4. Resultados

**Factor de Pico.** Para cada caja de combustible se determinó el valor medio de la activación térmica  $A_{th,j}$ , relativa al testigo, a partir de las distribuciones obtenidas para las direcciones axial z, y radiales, x e y, se promedió el factor de desventaja para el eje X,  $f_{Dx}$ , lo mismo se hizo con el factor de desventaja para el eje Z,  $f_{Dz}$  y la actividad en Y,  $A_y$ , con lo que la activación térmica para la caja resultó como:

$$\tilde{A}_{th,j} = f_{Dx} f_{Dy} A_{th,y}$$

donde

$$f_{Dx} = \frac{A_{th,x,centro}}{\tilde{A}_{th,x,media}}$$

$$f_{Dz} = \frac{A_{th,z,centro}}{\tilde{A}_{th,z,media}}$$

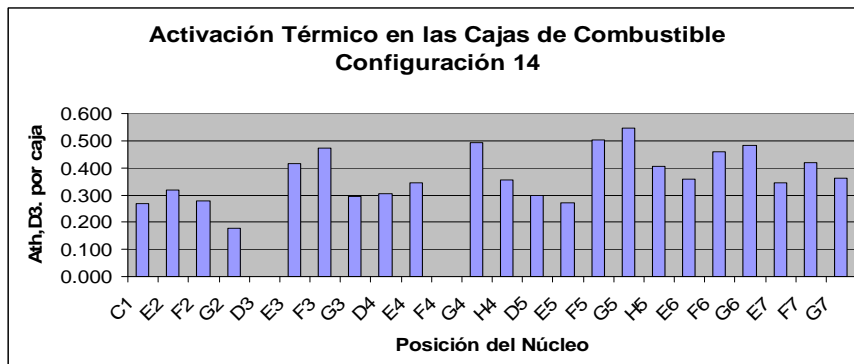
Las actividades medias por caja aparecen en la Tabla 1, con la gráfica correspondiente en la Figura 5.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1			TN 002	NG 004	PI 001	NG 027	PI 002	NG 012		
2				NG005	NN 006	NN 005	NN 007	NC 011		
3		CF 002		PI 003	NC 002	NN 001	NC 003	PI 004		
4			NG 007	NN 013	NN 002	PI 005	NN 003	NN 015	NG 013	
5			NG006	NN 014	NC 004	NN 004	NC 005	NN 016	NG 022	
6				PI 006	NN 008	NN 009	NN 010	PI 007		CF 003
7				NG 010	NN 011	NC 006	NN 012	NG 023		
8				NG 008	PI 008	NG 028	PI 009	NG 020		
9					CF 001				PI 010	
10										

**Figura 5:** Esquema de la configuración nuclear 14. TN: sistema neumático. NG: elementos de grafito. PI: posición de irradiación. NN: elemento combustible normal. NC: elemento combustible de control. CF: cámaras de fisión.

**Tabla 1:** Actividades térmicas medias por caja para l a configuración nuclear 14, correspondientes a una corriente de operación CM4:  $3 \times 10^{-10}$  A.

Posición	Factor Dx	Factor Dz	Activ. Th.y	A.Th.Medía	Error	N° placas
C1						
E2	1.064	0.785	0.383	0.320	0.013	16
F2	1.068	0.827	0.314	0.277	0.011	16
G2	1.070	0.815	0.204	0.178	0.001	16
E3	Elemento de control			0.414	0.041	12
F3	1.037	0.795	0.572	0.471	0.019	16
G3	Elemento de control			0.295	0.025	12
D4	1.084	0.768	0.367	0.306	0.012	16
E4	1.173	0.798	0.370	0.346	0.014	16
F4	Trampa central					
G4	1.168	0.856	0.493	0.493	0.020	16
H4	1.046	0.802	0.425	0.357	0.014	16
D5	1.057	0.769	0.366	0.298	0.012	16
E5	Elemento de control			0.272	0.027	12
F5	1.007	0.749	0.666	0.502	0.021	16
G5	Elemento de control			0.545	0.085	12
H5	1.104	0.782	0.469	0.405	0.016	16
E6	1.192	0.806	0.373	0.358	0.014	16
F6	1.042	0.799	0.554	0.460	0.018	16
G6	1.098	0.794	0.553	0.481	0.019	16
E7	1.080	0.773	0.415	0.347	0.014	16
F7	Elemento de control			0.419	0.042	12
G7	1.083	0.770	0.435	0.363	0.015	16



**Figura 6:** Activación térmica promedio en cada caja de elemento combustible normalizada a la activación de la testigo ubicada en la posición D34Y. También se incluye la posición del neumático (C1).

Desde la Tabla 1, se determina la actividad media de todo el núcleo mediante el peso de masas o del número de placas, resultando:

$$\tilde{A}_{th,nucleo} = 0.376 \pm 0.005$$

El punto de máxima activación térmica resultó en la placa 1 de la caja F5 a un altura de 1.3 cm desde el centro, con una actividad térmica en ese punto (caliente, c) de  $1.137 \pm 2\%$ ,  $\lambda_c = 0.095$ , y  $\alpha_{epi,c} = 0.05$ , y para la placa de  $0.856 \pm 4\%$

Con estos valores los factores de pico obtenidos fueron:

$$K_t = \frac{A_{m,c}(1+\alpha_{epi,c})}{\tilde{A}_{th,nucleo}(1+\alpha_{epi,nucleo})} = \frac{1.137(1+0.05)}{0.376(1+0.09)} = 2.9 \pm 0.1$$

$$K_a = \frac{1.137}{0.8565} = 1.3 \pm 0.1$$

$$K_r = \frac{0.8565}{0.376} = 2.3 \pm 0.1$$

## Flujos neutrónicos

El flujo neutrónico medio en cada caja se determinó a partir de las actividades térmicas promedios normalizadas al testigo y el flujo neutrónico térmico en la posición del testigo (D34Y).

$$\tilde{\phi}_{th,j} = \tilde{A}_{th,j} \phi_{th,D34Y}$$

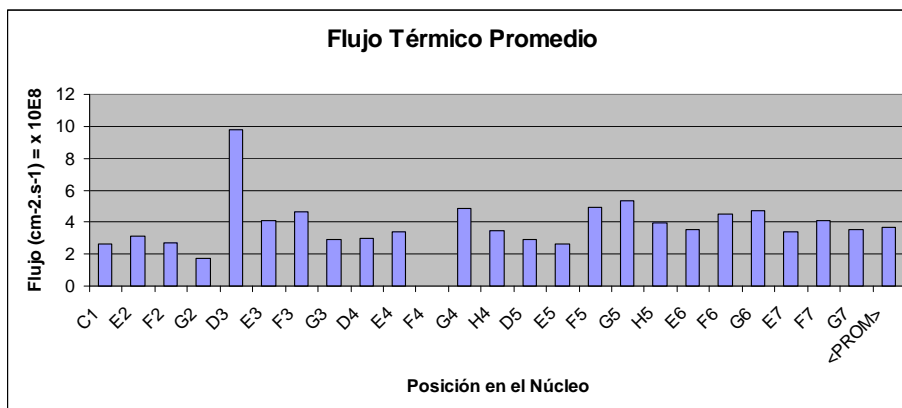
El flujo neutrónico térmico de la posición testigo se obtuvo en base al formalismo de Westcott cuya relación principal se presenta.[4]. La distribución de flujos se presenta en la Tabla 2 y Figura 7.

$$A^B = \phi_{th} g(T) \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_{act} 0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} (1+b\lambda) \left[ G_{th} + r \sqrt{\frac{T}{T_0}} \frac{S_0 G_r}{g(T)} \right]$$

$$\phi_{th,D34Y} = (9.8 \pm 0.5) \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

**Tabla 2:** Flujos neutrónicos térmicos medios por caja para la configuración 14, correspondiente a una corriente de marcha CM-4 de  $3.0 \times 10^{-10}$  A.

Posición	A.Th.Media	Error	s%	RCd	Flujo Térmico x 10E8 (cm-2.s-1)	Error
C1	NEUMATICO				2.64	
E2	0.320	0.013	4.00	6.06	3.14	0.20
F2	0.277	0.011	4.01	5.31	2.72	0.29
G2	0.178	0.001	0.62	6.65	1.75	0.07
D3	TESTIGO (D34)		5.00		9.81	0.49
E3	0.414	0.041	10.00		4.06	0.44
F3	0.471	0.019	4.01	6.25	4.62	0.26
G3	0.295	0.025	8.31	6.55	2.89	0.24
D4	0.306	0.012	3.99	6.48	3.00	0.17
E4	0.346	0.014	3.98	6.63	3.40	0.19
F4	TRAMPA DE FLUJO					
G4	0.492	0.020	4.00	6.55	4.83	0.52
H4	0.357	0.014	4.01	7.12	3.50	0.20
D5	0.298	0.012	4.00	7.56	2.92	0.31
E5	0.272	0.027	10.00		2.67	0.29
F5	0.502	0.021	4.20	6.89	4.93	0.29
G5	0.545	0.055	10.00		5.35	0.58
H5	0.405	0.016	4.00	7.85	3.97	0.23
E6	0.358	0.014	3.99	5.35	3.51	0.20
F6	0.460	0.018	4.00	6.12	4.52	0.49
G6	0.481	0.019	4.01	7.29	4.72	0.27
E7	0.346	0.014	4.01	6.31	3.40	0.14
F7	0.419	0.042	10.00		4.11	0.41
G7	0.363	0.015	4.00	6.42	3.56	0.14



**Figura 7:** Distribución del flujo térmico medio por caja de elemento combustible, tanto normal cuanto de control. Se presenta también el valor en el neumático (C1) y el valor promedio en las cajas (PROM).

### Potencia neutrónica

Para la determinación del  $\tilde{\lambda}$ , se utilizó la relación del índice espectral de Westcott,  $r$ , definida como:

$$r \sqrt{\frac{T}{T_0}} = \frac{\lambda}{1 + \lambda b}$$

y

$$r \sqrt{\frac{T}{T_0}} = \frac{G_{th}}{[R_{Cd} F - 1] \frac{S_0 G_r}{g} + R_{Cd} \left[ \frac{1}{K} - \frac{FW}{g} \right]}$$

En la tabla 2, se presentan los resultados de las razones de cadmio medio para cada caja en base a las irradiaciones desnudas y bajo cadmio realizadas, a partir de ellos, el valor promedio resulta:  $\bar{R}_{Cd} = 6.55 \pm 0.65$  que genera un índice espectral de:

$$r \sqrt{\frac{T}{T_0}} = 0.16$$

## 5. Conclusiones

**a.** El método expuesto para medir los factores de pico mediante la técnica de activación de monitores metálicos es dificultoso, debido al número de irradiaciones, lecturas de monitores y cuidado en la colección y tratamiento de datos. Sin embargo, es factible hacerlo, particularmente durante la puesta en marcha de un reactor, que no estando en operación comercial se dispone de tiempo suficiente.

y la razón de flujo epitérmico a térmico:  $\tilde{\lambda} = 0.19$ . Las constantes utilizadas para el indicador de manganeso fueron:  $G_{th} = 0.98$ ,  $F = 1$ ,  $S_0 = 0.6653$ ,  $G_r = 0.86$ ,  $g(T) = 1$ ,  $1/K = 0.462$ ,  $W = 0$ , ver Ri(80).

El valor medio del flujo térmico resultó:

$$\tilde{\phi}_{th, nucleo} = (3.7 \pm 0.2) \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Con los valores obtenidos se determinó la potencia neutrónica para esta configuración, correspondiente a la corriente de marcha, CM-4,  $3 \times 10^{-10}$  A,

$$P = (88 \pm 5) \text{ W}$$

**b.** Respecto al resultado obtenido del factor de pico total de  $2.9 \pm 0.1$ , se encuentra ligeramente superior al obtenido por cálculo de 2.7, pero dentro de la incertidumbre del 10%. Para disminuir este valor la recomendación práctica es que, las nuevas configuraciones se construyan ubicando elementos de menor quemado en las zonas periféricas y los elementos de mayor quemados, en las regiones centrales.

**c.** El método ha demostrado que la técnica del testigo se hace recomendable cuando se tienen que realizar muchas mediciones.

Quedando la posición referencial, la posición del testigo (sistema neumático), como el punto vigía mientras dure la configuración estudiada. Respecto al cual se puede hacer el seguimiento aproximado de las capacidades de activación de cualquier posición del núcleo. Este resultado puede ser útil, también, para la calibración en potencia, es decir, para elevar niveles de potencia en función a las actividades térmicas del monitor posicionado en el neumático.

**d.** Las mayores fuentes de error en la determinación de los valores medios de las cajas han correspondido a la asunción que en cada placa se considera una sola distribución axial (eje Z), ubicada en el centro de la placa; igualmente una sola distribución radial (eje X), ubicada en el nivel central de la placa. Sin embargo, estimamos que el error no superaría el 5%. Todas estas influencias se pueden comparar con los resultados de cálculo, labor que está pendiente.

**e.** Si tomamos en cuenta que se han medido 21 elementos combustibles, y por cada elemento se han posicionado 6 espadas, como mínimo, resultó en 126 espadas con monitores desnudos, igual cantidad ocurrió para el caso de bajo cadmio. Las irradiaciones fueron distintas para las desnudas y para las de cadmio, por lo que el número de operaciones para las irradiaciones superaron la media centena.

**f.** Una corrección, importante, durante las mediciones se relacionó con la medición del fondo para cada monitor, considerándolo variable, debido a la presencia de relativa de los monitores activos vecinos. Para ello se ubicaron portamuestras vacías cada cinco monitores sean desnudos o bajo cadmio con estas mediciones se hicieron interpolaciones lineales para obtener el fondo de cada monitor. Esto mejoró la determinación de las actividades en los respectivos monitores.

**g.** El método de activación de monitores para la medición de la potencia de un reactor presentado en este trabajo usualmente se realiza solo durante la puesta en marcha, debido a que es prácticamente el único factible, dado que no es aplicable el método del balance térmico, ni el de nitrógeno,

ambos requieren del bombeo del refrigerante. En la puesta en marcha se inicia con el régimen de baja potencia en cuyo caso la refrigeración forzada no está permitido. Es decir el método expuesto se convierte en el único método disponible.

**h.** La dificultad de repetir estas mediciones en un reactor radica en la perspectiva comercial, puesto que se requiere bastante tiempo de operación, por lo que se prefieren otras técnicas de medición tales como el balance térmico y nitrógeno. Sin embargo considerando que estas técnicas se utilizan para medias y altas potencias el método de activación expuesto sigue siendo la más simple y útil para los niveles de baja potencia. También se puede hacer una adecuada superposición de los métodos (balance térmico y activación) para hacer un barrido desde bajas potencias hasta la media y alta y obtener una curva de calibración de potencia la cual es solicitada en el licenciamiento de los reactores nucleares de investigación.

**i.** Los resultados expuestos pueden ser de mucha utilidad para los calculistas, en la comparación de sus modelos. Sin embargo en los estudios directamente relacionados con el modelamiento, las facilidades de baja potencia son mucho más prácticas, tal es el caso del reactor peruano de potencia cero (RP0).

† Este artículo está dedicada a la memoria de la amiga y maestra en física experimental de reactores: María Teresa Bang (Q.E.P.D.) de la Comisión de Energía Atómica de Argentina.

## 6. Referencias

1. Glasstone S, Sesonske A. Ingeniería de reactores nucleares. Ed. Reverte, 1975.
2. Lamarsh J. Introduction to reactor physics. Adison Wesley, 1975.
3. Profio P. Experimental reactor physics. Adison Wesley, 1980.
4. Zuñiga A. Determinación del flujo neutrónico en el reactor RP-10. Informe Interno, 1991.
5. Reactor RP-10, Informe Interno, 1991.