

Medición del flujo neutrónico mediante método de doble monitor desnudo

Jean Rodríguez^{1,*}, Pablo Mendoza²

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Av. Venezuela, Lima 1, Perú

² Instituto Peruano de Energía Nuclear, Dirección de Investigación y Desarrollo, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

Resumen

Se ha implementado el método de doble monitor desnudo para determinar los parámetros del flujo neutrónico térmico y epitérmico en el reactor RP-10 del Centro Nuclear RACSO empleando aleación de Au (1.55 %)-Cu como monitor de flujo. El método aplicado minimiza las dificultades técnicas que presentan métodos como el de diferencia por cadmio, simplificando el análisis y procesamiento de datos experimentales. Se determina el flujo neutrónico térmico y epitérmico, en la posición central del núcleo del reactor RP-10, para una potencia de 1 kW, una diferencia relativa menor al 4 % respecto a los obtenidos mediante la aplicación del método convencional de diferencia por Cd en el formalismo de Westcott. Se discuten las ventajas y desventajas de su implementación.

Palabras clave: Monitores de neutrones; Neutrones epitérmicos; Neutrones térmicos; Reactor RP-10; Flujo de neutrones; Instrumentos de medida

Measurement of neutron flux by bare double monitor method

Abstract

The bare double monitor method has been implemented to determine thermal and epithermal neutron flux parameters in the RP-10 reactor at the RACSO Nuclear Center using Au (1.55 %) -Al alloy as flow monitor. The applied method minimizes the technical difficulties presented by methods such as difference by cadmium, simplifying the analysis and processing of experimental data. The thermal and epithermal neutron flux, at the central position of the RP-10 reactor core is determined for a power of 1 kW, a relative difference less than 4 % with respect to those obtained by applying the conventional method of difference by Cd in the Westcott-formalism. The advantages and disadvantages of its implementation are discussed.

Keywords: Neutron monitors; Epithermal neutrons; Thermal neutrons; RP-10 reactor; Neutron flux; Measuring instruments

1. Introducción

Entre los métodos más empleados para determinar el flujo neutrónico de un reactor nuclear se cuenta el método de diferencia de cadmio [1] consistente en irradiar un monitor desnudo y otro bajo cubierta de cadmio que absorbe los neutrones de energías menores a 0.55 eV.

El monitor de mayor empleo para tal instancia es el Au que ofrece una diversidad de ventajas tales como: un alto grado de pureza estequiométrica, una alta sección eficaz transversal térmica (98.65 b) para la reacción nuclear $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$ y un periodo de semidesintegración conveniente de 2.695 días.

Sin embargo, su empleo ofrece igualmente desventajas pues se activa fuertemente si se aplica en cantidades mayores a miligramos (especialmente en experimentos de activación a largo plazo), requiriendo largos tiempos de decaimiento antes de que pueda medirse correctamente.

Como alternativa se puede disminuir el nivel de potencia del reactor; sin embargo, esto no solo afecta la operación del reactor, sino también influye en los experimentos de los demás usuarios siendo un problema serio cuando se determina el flujo neutrónico a la misma potencia que las muestras que se irradian habitualmente, en el reactor, a >100 kW.

* Correspondencia autor: jeancarlosr1505@gmail.com

Asimismo, la sección transversal elevada de oro puede conducir a un autoapantallamiento neutrónico significativo y por lo tanto tiene que ser corregida matemáticamente.

Pero su aplicación implica también una disconformidad experimental por la necesidad de usar dos operaciones de irradiación simultáneas o ubicar los monitores desnudos alejados de los demás bajo Cd a fin de evitar la perturbación de este al campo neutrónico.

Una alternativa a esta problemática reside en emplear una aleación de Au-Cu como monitor de flujo aplicando el “método de doble monitor desnudo”, empleando aleación de Au-Cu.

Para su aplicación solo se requiere una operación de irradiación, sin necesidad de emplear cubierta de cadmio y con la ventaja adicional de realizar la medición de actividad de cada isótopo en forma simultánea. Mediante esta metodología se mejora el desarrollo experimental simplificando los datos de entrada a comparación del método clásico de diferencia de Cd.

En este trabajo se propone usar el método de doble monitor desnudo para determinar el perfil del flujo neutrónico en el reactor RP-10 en una sola irradiación. Se ha despreciado la contribución del factor de desviación α del flujo neutrónico epitérmico de la ley ideal 1/E debido a que los isótopos Au y Cu son afectados ligeramente por dicho factor de forma α . También los resultados serán contrastados con el formalismo Westcott.

2. Consideración teórica

Para la determinación del flujo neutrónico y específicamente de la tasa de reacción empleamos la convención de Högdahl [2] expresado del modo siguiente:

$$R = g(T)G_T\sigma_0\Phi_0 + G_E I_0 \Phi_E \quad (1)$$

Siendo R la tasa de reacción, G_T y G_E los valores de autoapantallamiento térmico y epitérmico, respectivamente; σ_0 y I_0 son los valores de sección eficaz de absorción térmica e integral de resonancia según referencia [3,4] en tanto ϕ_0 es el flujo térmico convencional relacionado con el flujo térmico ϕ_T , expresado en:

$$\phi_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \phi_T \quad (2)$$

Donde T_0 es la temperatura neutrónica más probable cuyo valor es 293.6 K y T es la temperatura neutrónica. Para usar el método de doble monitor desnudo se aplica la metodología Beckurts y Wirtz [5], que consiste en resolver un sistema de ecuaciones con el flujo térmico y flujo epitérmico como incógnitas, es decir:

$$R_{Au} = a\phi_0 + b\phi_E$$

Donde:

$$a = [g(T)G_T\sigma_0]_{Au} \quad ; \quad b = [G_E I_0]_{Au}$$

$$R_{Cu} = c\phi_0 + d\phi_E \quad (3)$$

$$c = [g(T)G_T\sigma_0]_{Cu} \quad ; \quad d = [G_E I_0]_{Cu}$$

Siendo:

$$\phi_0 = \frac{R_{Au}d - bR_{Cu}}{ad - bc} \quad ; \quad \phi_E = \frac{R_{Cu}a - cR_{Au}}{ad - bc}$$

Los coeficientes a, b, c y d son constantes que dependen fundamentalmente de la geometría y composición del monitor y los subíndices indican el isótopo de interés. La propagación de incertidumbres fue realizada para este método siendo inversamente proporcional $ad - bc$.

En cambio, el método de diferencia de Cd es ligeramente diferente:

$$R = u\phi_0 + v\phi_E$$

$$R_{Epi} = v\phi_E = F_{Cd}R_{Cd} \quad (4)$$

Donde:

$$u = [g(T)G_T\sigma_0]_{Au} \quad ; \quad v = [G_E I_0]_{Au}$$

F_{Cd} es el factor de absorción de neutrones térmicos en el cadmio cuyo valor tiende a 1 para un cobertor de Cd de 1 mm de grosor, lo que implica $R_{Cd} \approx R_{Epi}$. Entonces, el flujo térmico y epitérmico son determinados del modo siguiente:

$$\phi_0 = (r_{cd} - 1) \frac{R_{Cd}}{u} \quad ; \quad \phi_E = \frac{R_{Cd}}{v}$$

Donde la razón de cadmio r_{cd} se define:

$$r_{Cd} = \frac{R}{R_{Cd}} \quad (5)$$

Por otro lado, el formalismo de Westcott [6] es un método tradicional y riguroso en el que se incluye parámetros adicionales para determinar el flujo neutrónico. Esta metodología fue desarrollada e implementada por Gómez J. en el reactor RP-10[7]. Este estudio seguirá ese desarrollo para fines comparativos entre cada método.

3. Parte experimental

Las experiencias se realizaron en el reactor nuclear RP-10 bajo una misma configuración de núcleo en la ranura entre la caja de irradiación CI-E4 y el elemento combustible A-023 (Figura 1), empleándose espada de aluminio de 0.7 mm de espesor considerando que dicha ranura de separación es de 3 mm.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	TN	Be-01	Be-02	Be-03	Be-04	Be-05	Be-06	Be-07	
2	Gr-01	Be-08	CI-C2	NN-032	NC-006	NN-028	BCF	Be-09	Gr-02
3	Be-10	Be-11	NN-027	AS-001	A-022	NC-008	A-010	Be-12	Be-13
4	Be-14	Be-15	A-007	A-017	CI-E4	A-021	A-015	Be-16	Be-17
5	Be-18	Be-19	A-019	NC-007	A-023	AS-005	A-008	Be-20	Be-21
6	Gr-03	Be-22	CI-C6	NN-030	A-018	NN-029	CI-G6	Be-23	Gr-04
7	CI-A7	Be-24	Be-25	Be-26	Be-27	Be-28	Be-29	Be-30	CI-17
8			Gr-05	Gr-06	Gr-07	Gr-08	Gr-09		

TN	Sistema neumático (1)
CI	Posición de irradiación (6)
Be	Berilio (30)
Gr	Grafito (9)
A	Elemento combustible normal (CNEA)
AS/NC	Elemento combustible de control (NUKEM)
NN	Elemento combustible normal (NUKEM)
BCF	Barra de control fina

Figura 1. Configuración de núcleo 44 del reactor RP-10.

Se realizaron dos experiencias a fin de comparar los resultados de los parámetros de flujo neutrónico calculados mediante el método propuesto y el empleado convencionalmente de diferencia de cadmio. En la experiencia 1 se aplicó el método de doble monitor desnudo empleando alambre de Au

(1.55 %)-Cu de 1 mm de diámetro con un peso promedio de 1.8 mg y 3 mm de longitud.

Se colocan 12 alambres de Au (1.55 %)-Cu a lo largo de la espada denominada G1 separada de cada posición en 50 mm, tal como se aprecia en la Figura 2a donde “O” es la referencia de la zona activa. Se colocan también alambres de Au (1.55 %)-Cu en la posición 7A y 7E para evaluar la variación axial del flujo neutrónico tal como se muestra en la Figura 2b.

Para la experiencia 2 se aplicó el método de diferencia de cadmio, empleando hojuelas de Au de 99,995 % de pureza, 4 mm de diámetro con una masa de alrededor de 5 mg y 0.025 mm de espesor. La hojuela bajo cubierta de Cd de 1 mm de espesor y la hojuela desnuda se colocaron en las posiciones 2A y 2C de la espada G2, respectivamente (Figura 3). Estas posiciones son equivalentes a la posición 5 de la espada G1.

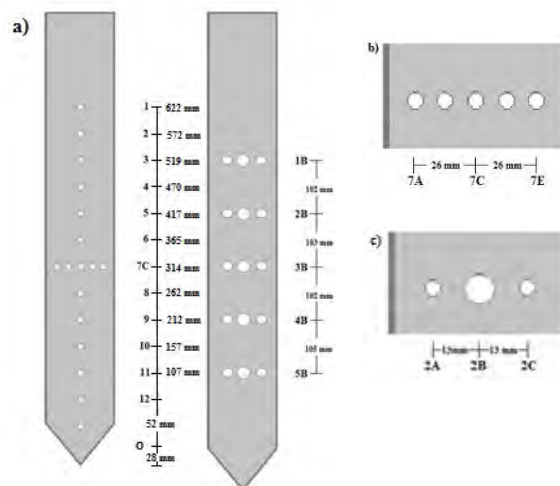


Figura 2. a) Esquema de las posiciones de las muestras en las espadas G1 y G2. b) Esquema de las posiciones laterales de 7C. c) Esquema de las posiciones laterales de 2B.

El diseño de la espada G2 permite colocar monitores en forma axial en columnas identificadas como A, B y C, donde la separación entre los extremos es de 26 mm. En la misma espada G2 se colocó una hojuela de Au bajo cubierta de Cd en la columna 2C tal como se muestra en la Figura 2c.

Ambas espadas se irradiaron en forma consecutiva a una potencia de 1 kW por 2 horas. Las mediciones se realizaron en una cadena de espectrometría gamma de alta

resolución empleando un detector GE (HP) de 70 % de eficiencia relativa.

Para determinar el perfil neutrónico mediante la convención de Högdahl, por el método de doble monitor desnudo, es necesario emplear dos isótopos distintos con diferentes respuestas después de su activación neutrónica. También las energías gamma de cada isótopo deben estar lo suficientemente alejadas una de otra para que el detector pueda diferenciar o evitar solapamiento entre cada pico. En las Tablas 1 y 2 se muestran las constantes de los monitores utilizadas que cumplen con esas características.

Tabla 1. Datos y constantes nucleares de Cu-63 en forma de alambre.

<i>Magnitud</i>	<i>Valor</i>	<i>Error</i>
Masa molar (g/mol)	63.546	0.003
Abundancia isotópica	0.6917	0.0002
Concentración (aleación)	0.9845	0.0001
Energía (keV)	511	-
Yield γ	0.3504	0.003
λ (s ⁻¹)	1.5160E-5	2.387E-9
σ_0 (cm ²)	4.50E-24	2.00E-26
I_{eff} (cm ²)	4.97E-24	8.00E-26
G térmico	0.98	0.01
G epitérmico	0.69	0.01
Eficiencia para la geometría de alambre	5.9092E-3	6.151E-5

Tabla 2. Datos y constantes nucleares de Au-197 en forma de alambre.

<i>Magnitud</i>	<i>Valor</i>	<i>Error</i>
Masa molar (g/mol)	196.9665	0.0001
Abundancia isotópica	1	-
Concentración (aleación)	0.0155	0.0001
Energía (keV)	411.80	0.17
Yield γ	0.9562	0.0006
λ (s ⁻¹)	2.9776E-6	3.315E-10
σ_0 (cm ²)	98.65E-24	9.00E-26
I_{eff} (cm ²)	1.55E-21	28.00E-24
$g(T=20^\circ\text{C})^6$	1.0066	-
G térmico	0.98	0.01
G epitérmico	0.758	0.01
Eficiencia para la geometría de alambre	6.9858E-3	7.273E-5

Las constantes nucleares empleadas para el flujo neutrónico por método de doble monitor desnudo dentro de la convención de Högdahl son mostradas en la Tabla 3. La diferencia entre este monitor y las anteriores radica en su geometría.

Tabla 3. Datos y constantes nucleares de Au-197 en forma de hojuela.

<i>Magnitud</i>	<i>Valor</i>	<i>Error</i>
Concentración	0.99995	0.0001
$g(T=20^\circ\text{C})^6$	1.0066	-
G térmico	0.989	0.01
G epitérmico	0.41	0.01
Eficiencia para la geometría hojuela	3.328E-3	7.273E-5

En el marco del formalismo de Westcott es necesario incluir unos parámetros adicionales los cuales son mostrados en la Tabla 4. En esta convención, uno de los parámetros más importante es el factor μ el cual empalma la zona epitérmica con la zona térmica. Este factor no está incluido en la convención de Högdahl.

Tabla 4. Datos y constantes nucleares en el formalismo de Westcott.

<i>Magnitud</i>	<i>Valor</i>	<i>Error</i>
Energía de corte del Cd (E_{Cd}) (eV)	0.55	0.02
Integral de resonancia epitérmica por debajo de E_{Cd} (cm ²)	7.8E-24	0.5 E-24
Energía del neutrón en equilibrio térmico (eV)	0.0253	0.0002
Factor μ	4.5	0.2

4. Resultados

En la Figura 3 se muestra el perfil de flujo neutrónico térmico y epitérmico para cada posición longitudinal de la espada G1. En ella se observa que la posición más intensa se da a 262 mm de la zona activa del elemento combustible (posición 8) con un flujo térmico de $1.445 \times 10^{10} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ y un flujo epitérmico de $1.709 \times 10^9 \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$. También el perfil neutrónico está desplazado hacia el inferior.

Los resultados con sus respectivas incertidumbres se presentan en la Tabla 4. Las incertidumbres del flujo térmico se mantienen aproximadamente constantes a diferencia de las incertidumbres del flujo epitérmico que

tiende a disminuir ligeramente hacia los extremos de la posición más intensa.

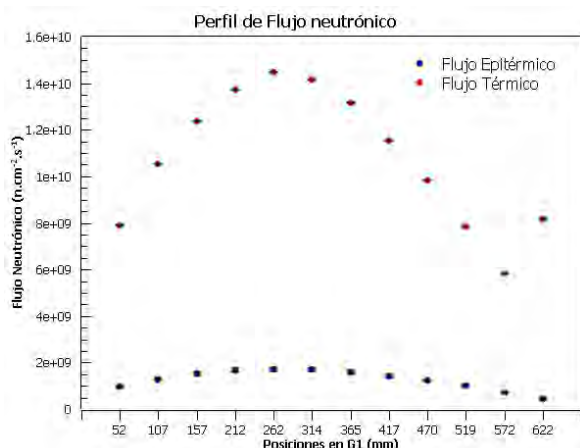


Figura 3. Perfil de flujo neutrónico entre la posición CI- CI-E4 y A-023 del núcleo del reactor RP-10.

Tabla 4. Flujo neutrónico para cada posición en la espada G1 con sus incertidumbres relativas.

Posición (mm)	Flujo Térmico ($\times 10^{10}$ n/cm ² s)	Flujo Epitérmico ($\times 10^9$ n/cm ² s)
622	0.817 ± 2.46%	0.441 ± 6.60%
572	0.583 ± 2.72%	0.720 ± 4.36%
519	0.786 ± 2.72%	0.991 ± 4.31%
470	0.982 ± 2.72%	1.218 ± 4.34%
417	1.154 ± 2.71%	1.411 ± 4.36%
365	1.314 ± 2.70%	1.585 ± 4.38%
314	1.418 ± 2.70%	1.692 ± 4.40%
262	1.445 ± 2.70%	1.709 ± 4.41%
212	1.373 ± 2.70%	1.657 ± 4.38%
157	1.236 ± 2.71%	1.510 ± 4.36%
107	1.053 ± 2.71%	1.287 ± 4.36%
52	0.791 ± 2.70%	0.941 ± 4.42%

En la Figura 4 se observa la variación axial del flujo térmico y epitérmico, siendo notoria en la componente térmica.

En Tabla 5 se muestra los valores de los flujos neutrónicos obtenidos en esas posiciones y que varían en un 12 % a 20 % con respecto a la posición central 7C.

También se irradiaron hojuelas de Au desnudas y bajo Cd en la posición 2B de la espada G2, bajo la misma condición de irradiación anterior. Esa posición es equivalente a la posición 5 de la espada G1.

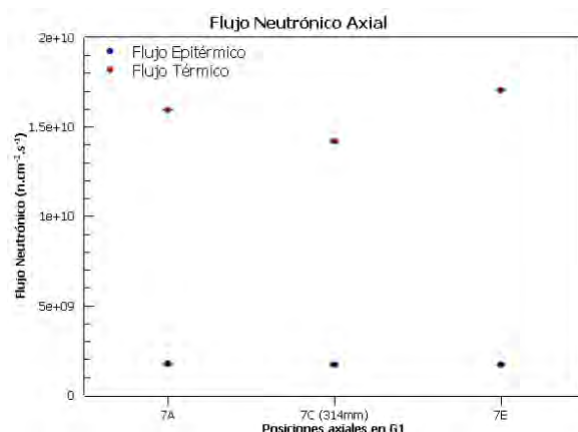


Figura 4. Flujos térmicos y epitérmicos en la posición 7 de la espada G1 en dirección axial.

Tabla 5. Flujo térmico y epitérmico en la posición 7 de la espada G1 con sus incertidumbres relativas.

Posición en la Espada G1	Flujo Térmico ($\times 10^{10}$ n/cm ² s)	Flujo Epitérmico ($\times 10^9$ n/cm ² s)
7A	1.594 ± 2.68%	1.722 ± 4.58%
7C	1.418 ± 2.70%	1.692 ± 4.40%
7E	1.706 ± 2.65%	1.691 ± 4.76%

En la Tabla 6 se muestra los resultados del flujo térmico y epitérmico obtenidos por ambos métodos en la convención de Högdahl. Adicionalmente se presenta los resultados de flujo neutrónico en el formalismo del Westcott determinados con los datos de Au con y sin cobertor de Cd.

Tabla 6. Comparación de flujo neutrónico entre la posición 5 en la espada G1 y su equivalente en la posición 2B de la espada G2 con sus incertidumbres relativas.

Método	Espada	Flujo Térmico ($\times 10^{10}$ n/cm ² s)	Flujo Epitérmico ($\times 10^9$ n/cm ² s)
Dif. Cd en Au	G2	1.33 ± 4.09%	1.38 ± 3.47%
Doble monitor	G1	1.15 ± 2.71%	1.41 ± 4.36%
Westcott	G2	1.25 ± 3.04%	1.29 ± 6.47%

Se observa que el valor de flujo epitérmico obtenido por los métodos de doble monitor y diferencia de Cd tienen una diferencia relativa de un 9.3 % y 7 %, respectivamente, con respecto al formalismo de Westcott. Mientras que para el flujo térmico se obtiene una diferencia relativa de un 8 % y 6.4 %.

5. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran una diferencia relativa entre el método propuesto y el método convencional de diferencia de cadmio del 3.4 % y 3.9 %, respectivamente. En cuanto al flujo neutrónico térmico comparando con el flujo neutrónico térmico obtenido por el formalismo de Westcott, asumiendo una variación lineal de flujo neutrónico axial y los valores de los flujos epitérmicos están dentro del margen del error del flujo epitérmico calculado con la metodología de Westcott.

La incertidumbre calculada por el método propuesto para el flujo térmico y epitérmico es menor al 3 % y 5 % respectivamente, siendo el tiempo de irradiación el parámetro que más influye en el cálculo de la incertidumbre. Un incremento en el tiempo de irradiación disminuye esta fuente de incertidumbre, pero implica considerar medidas para minimizar el tiempo muerto de conteo, así como un mayor tiempo de decaimiento para el caso de reutilizar el material.

Esta situación se mejora disminuyendo en dos magnitudes la concentración de Au presente en la aleación Au-Cu empleada, lo que haría posible evaluar el flujo neutrónico a una mayor potencia. También una extensión a este trabajo es aplicar el método de doble monitor desnudo dentro del formalismo de Westcott de tal manera de aprovechar la comodidad de determinar el flujo neutrónico en una sola irradiación sin perder la rigurosidad del caso.

En la Figura 3 se muestra que la media de la zona activa del elemento combustible establecido en 308 mm (eje z) no coincide con el valor máximo del perfil de flujo térmico obtenido. También se observa un desplazamiento alrededor de 5 cm por debajo de la media indicando que la distribución axial del flujo depende de las posiciones de las barras de control, cuando éstas se encuentran en una posición intermedia tienden a desplazar el flujo a la parte inferior de la zona activa. En el presente caso, las barras de seguridad están extraídas al 100 %, la BC1 totalmente extraída y la barra de control (BC2) con un porcentaje de extracción del 56 %.

Según los valores obtenidos mostrados en la Tabla 4, la relación de flujo térmico a epitérmico (f) es de 8.2 ± 0.2 sin considerar el punto código m1 que se encuentra en la zona del reflector. El valor f es consistente al hallado mediante el método de diferencia de cadmio de 9.6 (Tabla 6).

Una ventaja de esta metodología, usando la aleación de Au-Cu, es que se mide las tasas de activación de cada radioisótopo de forma simultánea a diferencia del método de k_0 -INAA realizado por Mohamed Ali [9] donde determina las tasas de activación de Au-198, Zr-95 y Zr-97 por separado. La metodología propuesta no determina directamente el parámetro (corrección de comportamiento no ideal del flujo epitérmico) α , no obstante, se puede obtener mediante cálculo iterativo similar al método de “razón de Cd para multimonitores” desarrollado por Díaz *et al.* [10] donde se emplea una serie de monitores (Au-198, Co-60, Sm-113m, Zr-97, Zn-69m, Zn-65 y Zr-95), aunque resulta laborioso el tratamiento de datos.

Otra alternativa de cálculo iterativo de α es el método de “monitor dual propuesto” por Yücel and Karadag [11] usando una relación de cadmio de la tasa de activación de los radioisótopos Au-198 y Mo-99 en varias irradiaciones con y sin cobertor de cadmio y en distintas facilidades de irradiación asumiendo un campo neutrónico equivalente para cada irradiación, situación que implica un monitoreo constante en el tiempo. Todavía la determinación del parámetro α continúa siendo procedimental y computacionalmente laborioso. Sin embargo, la desviación de la ley 1/E para los isótopos usados no es importante, tal como reporta Menezes *et al.* [12] donde el parámetro α promedio fue 0.0049 disminuyendo las integrales de resonancias de Cu y Au en 3 % y 1 %, respectivamente, siendo despreciable su contribución al flujo neutrónico, aunque obviamente esta perspectiva cambia para posiciones de irradiación donde el parámetro α es muy diferente de cero.

6. Conclusiones

El método de doble monitor desnudo simplifica los datos de entrada, los procesos de irradiación y medición. No obstante, para un empleo extensivo es necesario disminuir en dos magnitudes la concentración del Au en

la aleación. El método propuesto tranquilamente se puede incorporar al formalismo de Westcott.

7. Agradecimientos

Al Instituto Peruano de Energía Nuclear por las facilidades prestadas para la realización de la presente investigación. A Cienciactiva del CONCYTEC mediante el convenio de gestión 024-2013.

8. Referencias

- [1] Alcalá Ruiz F. Notas sobre medida de flujos neutrónicos. JEN 566. Junta de Energía Nuclear: Madrid; 1984.
- [2] Högdahl OT. Neutron absorption in pile neutron activation analysis: Determination of copper and gold in silver. In: International Atomic Energy Agency. Proceedings of a Symposium on Radiochemical Methods of Analysis. Vol. 1; 1964 October 19-23; Vienna: Austria; 1965. p. 23-40.
- [3] Baard JH, Zijp WL, Nolthenius HJ. Nuclear data guide for reactor neutron metrology. Netherlands: Kluwer Academic Publisher; 1989.
- [4] Laboratoire Nationale Henri Becquerel [homepage de Internet]. Recommended data. [actualizado el 24/06/2016]. Disponible en: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm
- [5] Beckurts KH, Wirtz. Neutron physics. Berlin: Springer-Verlag New York Inc.; 1964.
- [6] Westcott CH, Walker WH, Alexander TK. Effective cross sections and cadmium ratios for the neutron spectra of thermal reactors. In:

2nd United Nations International Conference of the Peaceful Uses of Atomic Energy. A/CONF.15/P/2002. Geneva, 23 May 1958. 16 p.

[7] Gómez Barria J. Determinación del flujo neutrónico en la interface núcleo-columna térmica para configuración 20 del RP-10 por activación de hojuelas de ¹⁹⁷Au y ⁵⁷Ni. Informe de prácticas pre-profesionales. IPEN, Lima; 2000.

[8] Holden NE. Temperature dependence of the Westcott g-factor for neutron reactions in activation analysis. Pure Appl. Chem. 1999; 71(12):2309-2315.

[9] Moawad Soliman MA. Enhancements and health-related studies of neutron activation analysis technique [Thesis PhD]. Cairo: University of Ain Shams, Faculty of Science; 2012.

[10] Díaz Rizo O, Herrera Peraza E, Lopez Reyes MC, *et al.* Epithermal neutron flux characterization of the Triga Mark III reactor, Salazar, Mexico, for use in INAA. J. Radioanal. Nucl. Chem. 1997; 220 (1): 95-97.

[11] Yücel H and Karadag M. Experimental determination of the α -shape factor in the $1/E1+\alpha$ epithermal-isotopic neutron source-spectrum by dual monitor method. Annals of Nuclear Energy. 2004; 31(6):681-695.

[12] Menezes MA, Leal AS, Meireles SP, Radojko J. Neutron flux parameters in the Triga Mark I IPR-R1 research reactor, CDTN/CNEN, for k_0 -INAA method. In: International Nuclear Atlantic Conference-INAC, November 24-29; Recife: Brazil; 2013.