

# DETERMINACIÓN DE LA SENSIBILIDAD DE LOS DETECTORES DE NEUTRONES AUTOENERGIZADOS (SPND) DE VANADIO REALIZADOS EN EL REACTOR RA-3

Anaya, G.<sup>(1)</sup> [oanaya@ipen.gob.pe](mailto: oanaya@ipen.gob.pe); Estryk, G.<sup>(2)</sup> [estrik@cae.cnea.gov.ar](mailto: estrik@cae.cnea.gov.ar);  
Miller, M.<sup>(2)</sup> [miller@cnea.gov.ar](mailto: miller@cnea.gov.ar); Zarza, L.<sup>(2)</sup> [zarza@cae.cnea.gov.ar](mailto: zarza@cae.cnea.gov.ar)

(1) Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima, Perú  
(2) Comisión nacional de Energía Atómica, Buenos Aires, Argentina

## RESUMEN

En el presente trabajo se resume la determinación experimental de la sensibilidad absoluta (corriente eléctrica del detector por unidad de flujo neutrónico térmico) de los detectores de neutrones auto – energizados (SPND) de vanadio, fabricados por la CNEA, los cuales serán colocados en la Central Nuclear de Atucha I.

En primer lugar, se realizó la determinación del índice espectral epitérmico  $\phi$  en una posición central del núcleo del RA-3 usando la técnica de la relación de cadmio por el método de activación de hojuelas (en este caso de oro) y aplicación del formalismo de Westcott.

El flujo térmico absoluto se determinó a partir de la irradiación de hojuelas de <sup>59</sup>Co conjuntamente con el SPND a calibrar, en la misma posición donde se irradió el oro. Se midió la corriente eléctrica de respuesta del SPND y, de dicho valor y del flujo neutrónico térmico absoluto promedio se determinó la sensibilidad del SPND, obteniéndose:

$$I_{net} / \langle \phi_{th} \rangle = 5.719 \times 10^{-21} [A / (n. cm^{-2}. s^{-1})]$$

## 1. INTRODUCCION

Un método para la determinación del flujo neutrónico, en un punto del núcleo de un reactor, es la exposición al campo neutrónico de sondas de material conocido.

Si irradiamos la sonda durante un tiempo  $t = t_{ir}$  y luego de retirarla del reactor esperamos un tiempo  $t = t_e$  su actividad estará expresada por:

$$A_{(t_e)} \equiv A_{\infty} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{ir}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_e} \quad (1)$$

donde:  $A_{\infty} = N \cdot \sigma \cdot \phi$ , representa la actividad que se obtendría exponiendo a la hojuela de sección eficaz  $\sigma$  durante un tiempo “infinito” a

una radiación neutrónica  $\phi$ ; siendo  $\lambda$  la constante de decaimiento del radioisótopo formado y  $t_o = t_{ir} + t_e$  es el tiempo equivalente transcurrido desde el inicio de la irradiación hasta el inicio de la medición de la actividad.

La actividad de la hojuela sometida al espectro neutrónico  $\phi$  (tanto térmico como epitérmico) durante un tiempo “infinito”, viene expresada, según formalismo de Westcott, por:

$$A_{\infty}^{desnuda} \equiv N \cdot \phi_{th} \cdot \left[ \sqrt{\frac{T_o}{T}} \cdot \sigma_o \cdot g_{(T)} \cdot \left( \frac{\sqrt{\pi}}{2} + \frac{2}{\sqrt{\mu}} \cdot \phi \right) + \phi I' \right] \quad (3)$$

donde  $g_{(T)}$ : es el factor de corrección de la sección eficaz si difiere de  $1/v$ .  
 $I'$ : Integral de resonancia reducida  
 $\mu$ : Constante que depende medio donde esta inmerso la hojuela; para el caso del H<sub>2</sub>O es 4.  
 $T, T_o$ : Temperatura neutrónica en °K (grados Kelvin), y  $T_o = 293.6$  °K.  
 $\sigma_o$ : Sección eficaz de captura neutrónica de velocidad  $V_o = 2200$  m/s y a la temperatura de 20.6 °C.  
 $N$ : Número de átomos por unidad de masa del blanco, que se activan.  
 $\phi_{th}$ : Flujo neutrónico térmico.

$$\phi \equiv \frac{\phi_{epi}}{\phi_{th}} \quad (4)$$

Para separar la contribución epitérmica considerada en la ecuación (3), es necesario eliminar la componente térmica, encapsulando la hojuela bajo cadmio, obteniéndose la siguiente correlación:

$$A_{\infty}^{Cd} \equiv N \cdot \phi_{epi} \cdot \left[ I_{Cd}^{1/v} + F \cdot (I' - \Delta I_{cd}) \right] \quad (5)$$

donde  $\Delta I_{cd}$ ,  $I'$ ,  $I_{Cd}^{1/v}$  son integrales de resonancia,  $F$  es el factor de corrección que considera la fracción de neutrones que realmente llegan dentro del cadmio y  $\phi_{epi}$  es el flujo neutrónico epitérmico.

Con las ecuaciones (3) y (5) podemos encontrar la "Relación de Cadmio", de la siguiente forma:

$$R_{Cd} \equiv \frac{A_{\infty}^{denuda}}{A_{\infty}^{Cd}} \quad (6)$$

La Relación de Cadmio se obtiene por la medición de la actividad de las hojuelas irradiadas.

Reemplazando las ecuaciones (3) y (5) en la ecuación (6), obtenemos:

$$R_{Cd} \equiv \frac{1 + r \cdot \frac{S_o}{g(r)} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_o}}}{r \cdot \sqrt{\frac{T}{T_o}} \left[ \frac{F(S_o - W)}{g(r)} + \frac{1}{K} \right]} \quad (7)$$

Finalmente deben considerarse correcciones adicionales, tales como: el auto-blindaje que es el resultado de la absorción de los neutrones dentro de la hojuela, tanto de la región térmica ( $G_{th}$ ) como de la región resonante ( $G_r$ ) y el factor  $\varepsilon$  de absorción de neutrones por la parte lateral de la hojuela. Introduciendo estos factores en la ecuación (7) y despejando r se obtiene la siguiente relación:

$$r \equiv \sqrt{\frac{T_o}{T}} \cdot \frac{G_{th}(1+\varepsilon)}{\left[ (FR_{Cd}-1) \cdot \frac{S_o G_r}{g(r)} + R_{Cd} \left( \frac{1}{K} \frac{FW}{g(r)} \right) \right]} \quad (8)$$

Luego, con este valor de r podemos calcular:

$$\varphi \equiv \frac{r}{1-r \cdot b}, \quad b \equiv \frac{4}{\sqrt{\pi} \cdot \mu}, \quad W \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\Delta I}{\sigma_o},$$

$$\frac{1}{K} \equiv \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{E_o}{E_{Cd}}} \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{I_{Cd}^{1/v}}{\sigma_o \cdot g(r)}$$

Despejando el flujo  $\phi$  de la ecuación (6) y sustituyendo estos factores, se obtiene:

$$\phi_{th} \equiv \frac{A_{\infty} \sqrt{\frac{T}{T_o}}}{N \sigma_o \cdot g(r) \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left[ G_{th}(1+\varepsilon) + \varphi \left( b + \frac{S_o G_r}{g(r)} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_o}} \right) \right]} \quad (9)$$

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

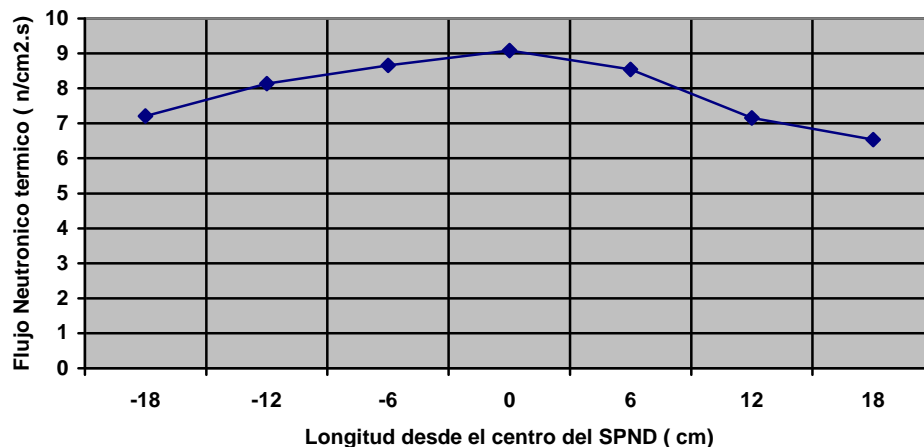
El detector de neutrones auto-energizado (SPND) a ser calibrado en el presente trabajo, fue fabricado por CNEA, utilizando como elemento emisor el  $^{51}\text{V}_{23}$ , el colector y las partes metálicas de cable de inonel 600 y como aislante el MgO. A continuación se presentan algunas características específicas del detector:

Longitud del Emisor	24 cm
Diámetro del Emisor	1.4 mm
Diámetro externo del colector	3.0 mm
Longitud del cable	15 m
Diámetro del cable	1.1 mm

Los datos característicos del  $^{51}\text{V}_{23}$  son: abundancia isotópica 99.75 %, sección eficaz microscópica de absorción térmica: 4.9 barns, vida media: 225 s y energía  $\beta^-$  máxima: 2.47 Mev.

En la primera parte, se irradiaron un conjunto de hojuelas de oro diluidas al 0.1143% en aluminio, durante 60 minutos a una potencia de 66.6 Kw. En la segunda parte de la experiencia se colocó el SPND a ser calibrado, en una espada de aluminio acompañado de hojuelas de  $^{59}\text{Co}$  (99.999% de pureza), colocando todo este conjunto dentro de una caja de irradiación especial. La misma fue colocada en la posición donde fueron irradiadas las hojuelas de oro. La irradiación se llevó a cabo durante 30 minutos a una potencia aproximada de 33.3 Kw. La medición de la actividad de las hojuelas fueron realizadas con un detector Teledyne Brown Engineering S-88-1 2"x2" NaI(Tl) con un ADIT B51B101W fotomultiplicador, un preamplificador Canberra 2007p, un Spectrum Master, productos gama y un intercambiador de muestras automático INC. G3200 AUTO. Se realizaron quince juegos de medidas para minimizar los errores estadísticos.

# FLUJO NEUTRONICO TERMICO



## 3. RESULTADOS

De las hojuelas de oro, se calcularon las razones (relaciones) de cadmio y el índice espectral  $\phi$  para la posición de irradiación, utilizándose el formalismo de Westcott, obteniéndose los siguientes resultados:

POSICION	Rcd	r	$\phi$
1	2.98	0.0287	0.0296
2	2.85	0.0307	0.0318
3	2.82	0.0313	0.0324
4	2.86	0.0305	0.0316
5	2.97	0.0289	0.0299
6	3.11	0.0270	0.0278
7	3.22	0.0257	0.0265

De las actividades de las hojuelas de  $^{59}\text{Co}$  y con los valores obtenidos del oro, se calcularon los flujos neutrónicos térmicos absolutos puntuales, utilizándose el formalismo de Westcott. Los resultados obtenidos de los flujos de neutrones térmicos fueron los siguientes:

El flujo neutrónico promedio de la región activa del SPND (longitud de 24 cm), se obtuvo integrando en la figura anterior desde -12 hasta 12 cm, obteniéndose el siguiente valor:

$$\langle \phi_{th} \rangle = 8.48 \times 10^{11} \text{ n. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12)$$

La respuesta del SPND al campo electromagnético  $\gamma$  residual que existe en el

núcleo del reactor a potencia cero, dió una corriente eléctrica  $I_0 = -0.85 \times 10^{-9} \text{ A}$ ; y a la potencia aproximada de 33 Kw, la respuesta del SPND, generó una corriente eléctrica  $I = 4 \times 10^{-9} \text{ A}$ . Corrigiendo con  $I_0$  se obtuvo una corriente neta de:

$$I_{neta} = 4.85 \times 10^{-9} \text{ A} \quad (13)$$

Con los resultados (12) y (13), se determinó la sensibilidad del SPND, obteniéndose:

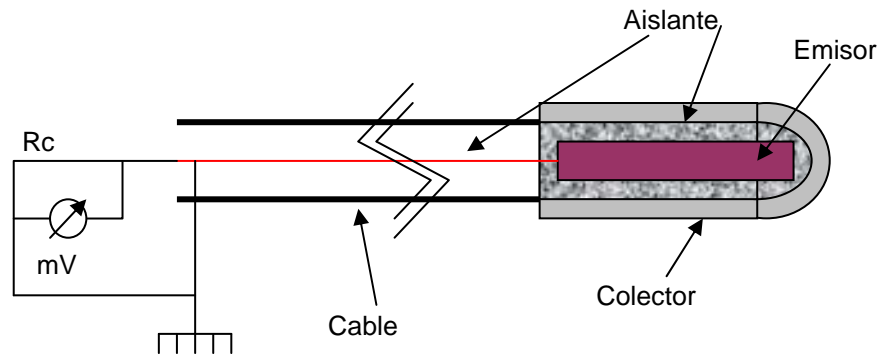
$$I_{neta} / \langle \phi_{th} \rangle = 5.719 \times 10^{-21} \text{ (A.n}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s)}$$

## 4. CONCLUSIONES

De los resultados, podemos mencionar que la técnica de activación neutrónica es adecuada para la calibración de los SPND, como lo demuestra la tendencia del flujo neutrónico térmico obtenido y mostrado en la fig. 1. En nuestra experiencia, la exposición del SPND a un flujo neutrónico térmico promedio de  $\langle \phi_{th} \rangle = 8.48 \times 10^{11} \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , muestra una sensibilidad en corriente por unidad de flujo neutrónico térmico que está dentro del rango de

$$I_{neta} / \langle \phi_{th} \rangle = 5.719 \times 10^{-21} \text{ (A.n}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s)}$$

respuesta de detectores estándares internacionales similares.



**Figura 1.** Esquema de un SPND.

## 5. REFERENCIAS

- [1]. Beckurts, K.H. and Wirtz, K.. Neutron Physics. Springer Verlag (1964).
- [2]. IAEA. Neutron Fluence Measurements. Technical Reports Series N°107, IAEA (1970).
- [3]. Zijp, W. L. And Baard, J.H. Neutron Data Guide for Reactor Neutron Metrology. ECN 70, Netherlands Energy Research Foundation (1979).
- [4]. Miller, M., Estryk, G., Roqueta, D. Quintana, J., Zarza, L. Sensitivity and Linearity Measurements of Vanadium Self-powered Neutron Detectors made in CNEA, Argentina (1998).