



## OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA GAMMA DE LOS ISÓTOPOS FORMADOS EN LA COLUMNA TÉRMICA DEL REACTOR RP-10 EN OPERACIÓN MEDIANTE ESPECTROMETRÍA GAMMA

Javier Gómez B.<sup>a\*</sup>, Héctor Miranda C.<sup>a</sup>, Claudia Aparicio O.<sup>a</sup>, Melchor Llosa D.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Cálculo, Análisis y Seguridad, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima-41, Perú.

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Ap. Postal 14-0149, Lima, Perú.

### Resumen

La columna térmica es una de las facilidades de irradiación del reactor peruano RP-10; por sus múltiples aplicaciones es indispensable su caracterización, siendo la más importante la medición de dosis de radiación mixta gamma-neutrón, en el cual se utilizan detectores termoluminiscentes, por ello es indispensable conocer la energía media de radiación gamma. En este trabajo se detalla la obtención experimental de esta energía media mediante el uso de un detector semiconductor de GeHP (Canberra), debidamente protegido, el cual permite detectar todos los picos de energía gamma de los elementos formados al operar el reactor a diferentes potencias.

PACS: 28.41.-i; 28.41.Qv; 28.50.-k; 28.50.Dr; 29.30.-h; 29.30.Kv

Palabras Claves: Columna Térmica, blindaje, espectrometría gamma.

### Abstract

The thermal column is one of the facilities of irradiation of the peruvian reactor RP-10, due to its multiples applications it is essential its characterization, being the most important the measurement of the mixed gamma-neutron radiation dose, in which thermoluminescent detectors are used because of this it is essential to know the mean energy of the gamma radiation. In this work the experimental procedure to measure this mean energy is detailed; for this a properly protected GeHP (Canberra) semiconductor detector is used and allows the detection of all the gamma radiation peaks emitted from isotopes formed in the reactor at different operating power levels.

Keywords: Thermal column, shielding, gamma spectrometry.

### 1. Introducción

Los reactores nucleares son fuentes de radiación mixta<sup>1,2</sup> (neutrones, gamma, alfa, etc), y para la medición de estas radiaciones se utilizan equipos complejos. En el reactor peruano de investigación RP-10 se caracterizan las facilidades de irradiación y se calibran los equipos para ello. Para realizar las mediciones de tasa de dosis de neutrones y gamma se utilizan entre otros detectores los TLDs 600 y 700; para ello fue necesario encontrar la energía media de la radiación gamma. En la parte 2 se detalla la parte experimental de la medición del espectro gamma debido a la radiación mixta que ocurre en la columna térmica por el núcleo del RP-10. En la sección 3 se presentan los resultados.

### 2. Aspecto Experimental

#### 2.1 Descripción del Sistema de Espectrometría Gamma

El sistema de espectrometría gamma (Fig. 1) está conformado por un detector semiconductor tipo P unido a un criostato (balón de nitrógeno líquido) para mantener la temperatura adecuada de operación del detector, un pre-amplificador, un amplificador, una fuente de alto voltaje (fijada a 3000 V) y asociado a una computadora que contiene una interfase multicanal Accuspec y el software Genie 2000<sup>3</sup>.

#### 2.2 Obtención de la Curva Eficiencia-Energía para el Detector Semiconductor GeHP

Se instaló sistema de espectrometría gamma

\* Corresponding author. e-mail: [jigb76@yahoo.com](mailto:jigb76@yahoo.com)

como se muestra en la Fig.1. Como fuentes patrones para la calibración se utilizó Am-241, Ba-133, Co-60, Co-57, Cs-137, Na-22 y Eu-152; para distancias fuente – detector de 20, 25 y 30 cm.

La lectura se realizó colocando por separado cada fuente frente al detector para un tiempo de conteo de 60 minutos y se registro el área neta bajo el fotopico característico de cada radioisótopo.

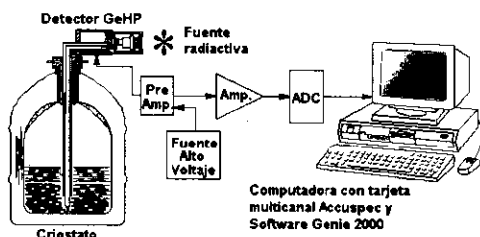


Fig.1. Esquema del sistema de espectrometría gamma.

### 2.3 Protección del Detector Semiconductor GeHP

El detector semiconductor de GeHP (modelo 7229P - Canberra), por ser un detector de radiación gamma tipo p, no es apropiado para la detección de fotones gamma en radiaciones mixtas (neutrón – gamma), para ello se acondiciono la protección del detector semiconductor de los neutrones que activarían los materiales que forman parte del detector, sobre todo el cristal semiconductor.

En la Fig.2 se muestran los materiales para proteger (blindar) al detector de GeHP del daño por efecto de la interacción con los neutrones, se utilizó 12 cm de espesor de parafina para moderar los neutrones rápidos, que es un espesor apropiado<sup>1</sup>, y una película de cadmio de 1 mm para absorber los neutrones térmicos de la columna térmica y los moderados por la parafina, además de 10 cm de plomo para atenuar la intensa radiación gamma y no provocar la saturación del detector.

### 2.4 Ubicación del Detector y la Cadena de Espectrometría Gamma en la Columna Térmica

Se ubicó el sistema de medición de espectrometría gamma en una de las cinco cavidades de la columna térmica y se eligió la cavidad de mayor uso en las múltiples aplicaciones que es la central (5) y que esta lleno de aire (Figura 3) para realizar la medición de la energía media.

### 2.5 Medición Experimental del Espectro Gamma de la Columna Térmica

En la Fig. 2 se presenta la cadena de espectrometría gamma utilizada para la adquisición

de datos de los fotones gamma de la columna térmica. Las mediciones se realizaron cada 10 minutos en cada operación del reactor (Potencia = 10, 70, 170 kW) tomando un total de 10 datos en cada potencia y una medición de fondo antes de la operación.

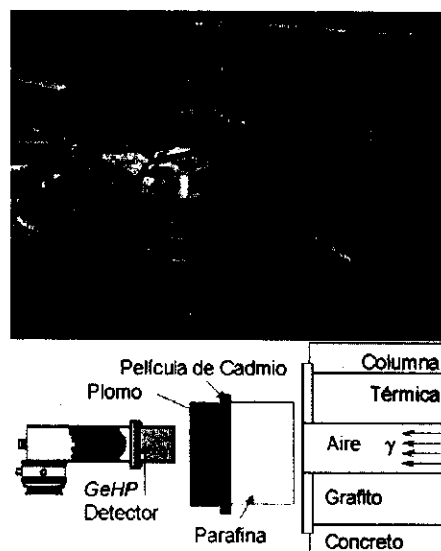


Fig.2. Esquema de la ubicación de los materiales del blindaje del detector semiconductor GeHP.

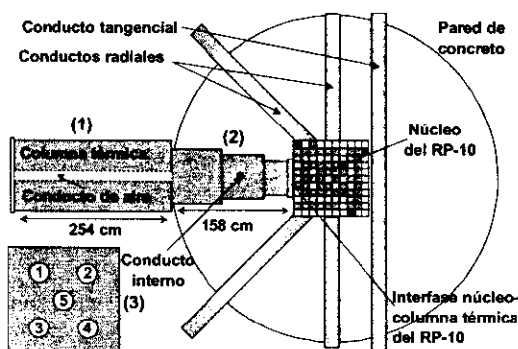


Fig.3. Representación de las ubicaciones de los diferentes detectores en la zona interna y externa de la columna térmica del RP-10.

## 3. Resultados y Discusión

La variación de la eficiencia del sistema en función de la energía se tiene dos comportamientos: de 50 a 122,3 keV es creciente, cuya función representativa es cuadrática y para energías de 122,3 a 1500 keV, es decreciente, cuya función es de tipo exponencial<sup>4</sup>.

En la Tabla 1, se lista las funciones analíticas de eficiencia dependientes del rango de energía de los

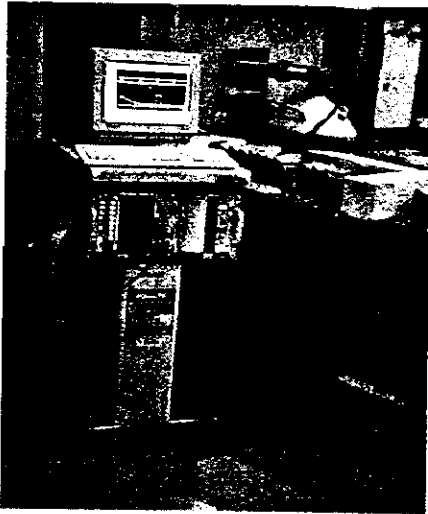


Fig.4. Cadena de espectrometría gamma asociada al detector semiconductor de GeHP

fotopicos, para las diferentes distancias fuente – detector.

En la Fig.5, se observa las distribuciones de la eficiencia relativa en función de la energía en el rango de 50 a 1500 keV para las diferentes distancias fuente – detector.

El análisis del espectro gamma que se obtuvo, se realizó con la tarjeta multicanal Genie 2000 y la librería Stdlib.nlb para identificar los picos de los diferentes radionúclidos; además se utilizó como referencia el reporte técnico 295 de la IAEA [5] para la identificación y depuración de fondo.

La Fig.6 muestra el espectro gamma de una medición de fondo en la columna térmica, en la que se puede observar los distintos materiales que compone la columna térmica como el acero inoxidable, grafito, aire y algunos productos de fisión.

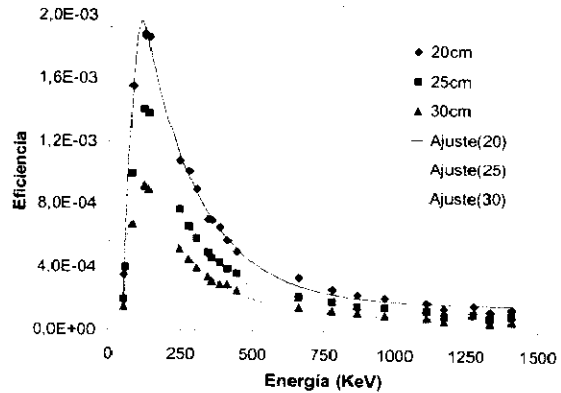


Fig.5. Distribución de la eficiencia relativa en función de la energía para distancias fuente – detector de 20, 25 y 30 cm.

La Fig.7 muestra los espectros de la columna térmica a distintas potencias de operación; se distingue claramente la emisión de fotones gamma de 14,08 y 122,37 keV del Mn-57; 510,66 keV del Fe-53 y 1171,71 con 1330,7 keV del Co-60, activados en los materiales de acero inoxidable de la columna térmica en la interfase de la zona externa e interna, y el I-135 como producto de fisión proveniente de los elementos combustibles. Además, se observan fotones gamma de la activación del C-11 del grafito, y del N-13 y O-15 del aire que adicionan en cuentas al fotopico de 510,66 keV.

La energía media de la radiación gamma en la columna térmica se calculó mediante la ecuación del valor medio (Ec. 1) y su incertidumbre (Ec. 2) para cada operación:

$$\bar{E} = \frac{\sum_0^i E_i C_i}{\sum_0^i C_i} \quad (1)$$

Tabla 1. Funciones analíticas (ajuste de las curvas de la eficiencia en función de la energía experimentales).

Distancia Fuente – Detector (cm)	Energía (keV)	Función de ajuste
20	53,10 – 122,30	$\epsilon = -0,00415 + 1,1202 \times 10^{-4} E - 5,13147 \times 10^{-7} E^2$
	122,30 – 1408,60	$\epsilon = 1,63004 \times 10^{-4} + 0,00175 \exp\left[-\frac{(E - 122,3)}{200,49819}\right]$
25	53,10 – 122,30	$\epsilon = -0,00253 + 6,5667 \times 10^{-5} E - 2,74559 \times 10^{-7} E^2$
	122,30 – 1408,50	$\epsilon = 1,1914 \times 10^{-4} + 0,00131 \exp\left[-\frac{(E - 122,3)}{178,14143}\right]$
30	53,00 – 122,30	$\epsilon = -0,00162 + 4,31214 \times 10^{-5} E - 1,83175 \times 10^{-7} E^2$
	122,30 – 1408,60	$\epsilon = 8,1659 \times 10^{-5} + 8,42626 \times 10^{-4} \exp\left[-\frac{(E - 122,3)}{190,3525}\right]$

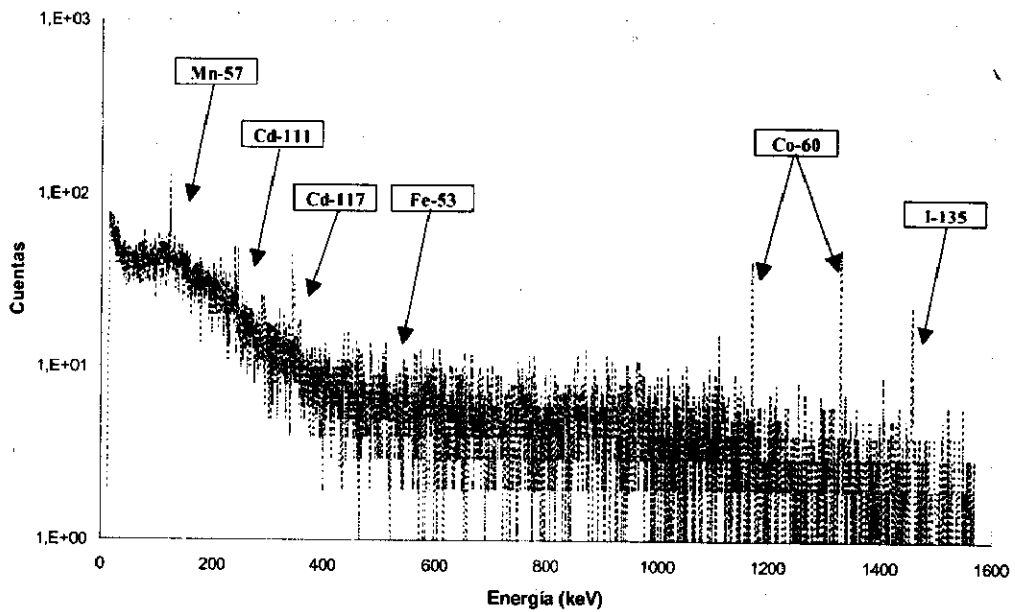


Fig. 6. Espectro gamma del fondo (reactor apagado) de la columna térmica.

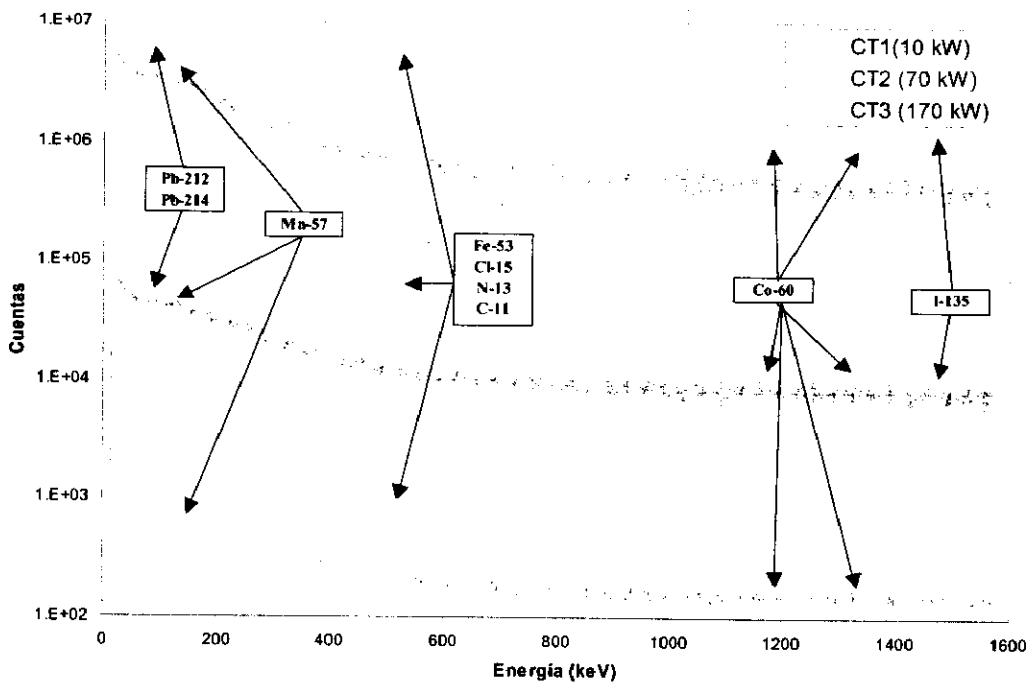


Fig. 7. Espectro gamma de la columna térmica en operación

$$\sigma_E = \sigma_{E_i}^2 + \frac{\left( \sum_0^i E_i C_i - \sum_0^i E_i \sum_0^i C_i \right)^2}{\left( \sum_0^i C_i \right)^4} \sigma_C^2 \quad (2)$$

La ecuación (1) nos da valores de: 506,78 keV para una potencia de 10 kW, 510,65 keV para 70 kW y 458,42 keV para 170 kW.

En promedio la energía nos da un valor de:

$$(491,95 \pm 25,58) \text{ keV}$$

En la Tabla 2 se lista los radioisótopos formados por la interacción de los neutrones con los diferentes materiales de la columna térmica, la mayoría de ellos

tienen una vida media de minutos y algunos son productos de fisión del U-235.

Tabla 2. Radioisótopos formados en la columna térmica por operación del RP-10.

Material	Abundancia Isotópica (%)	Reacción	Radioisótopo	T <sub>1/2</sub>	σ <sub>act</sub>	Energía (keV)
Fe-57	2,19	(n,p)	Mn-57	1,59 m	270 μb	122; 136
Fe-54	5,80	(n,2n)	Fe-53	8,53 m.	15,5 mb	377,2; 511
O-16	99,75	(n,2n)	O-15	2,03 m.	5,3 μb	511
N-14	99,64	(n,2n)	N-13	9,96 m.	30 μb	511
C-12	98,89	(n,2n)	C-11	20,3 m.	4,2 μb	511
Cd-110	12,40	(n,γ)	Cd-111	48,7 m	100 mb	245,4
Co-59	100,00	(n,γ)	Co-60	5,2 a	39 b	1173; 1332
U-235	0,72	Pf*	I-135	6,6 h	-	1457
U-235	0,72	Pf*	Cd-117	2,49 h	-	345

\* Productos de fisión

#### 4. Conclusiones

La importancia de este trabajo está en su utilidad como alcance para la protección radiológica del personal de experimentación y operación que transitan en las cercanías de las facilidades de irradiación del RP-10; puesto que la tendencia de la energía media de la radiación gamma (a la salida de la columna térmica) en función de la potencia es exponencial como se observa en la Fig.6. Además se debe tener en cuenta que existen blindajes adecuados para estas energías y que la columna térmica permanece cerrada cuando no se realizan experimentos en ella.

La mayoría de los radioisótopos formados son de los materiales de los que esta hecho el reactor nuclear. Es debido a que la sección eficaz de activación (σ<sub>act</sub>), mostrada en la Tabla 2, de algunos materiales es muy alta, que su activación es elevada en comparación a la actividad de los elementos formados por la fisión nuclear del uranio-235 que se encuentra en los combustibles nucleares.

#### Referencias

[1] IAEA, "Current status of Neutrons capture therapy" IAEA-TECDOC-1223. (2001).  
 [2] V. Gessaghi, [Dir. E. Villarino], "Diseño de un sistema sintonizador de espectro para tratamiento terapéutico por captura neutrónica

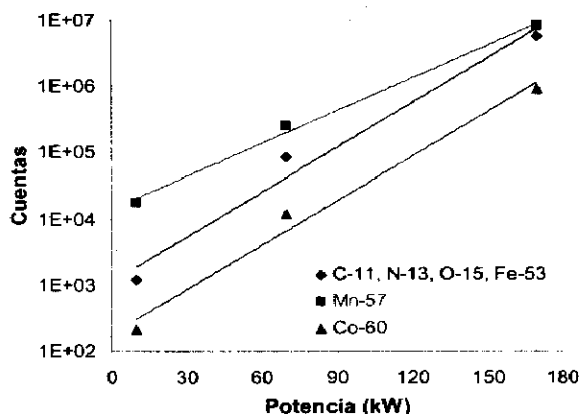


Fig.6. Tendencia exponencial de los radioisótopos formados en la columna térmica por la interacción de los neutrones en la operación del RP-10.

en boro" Instituto Balseiro. p. 109 Tesis de Ingeniería Nuclear. (1997).

[3] Genie 2000 Gamma Analysis Software. <http://www.canberra.com/products/835.asp>  
 [4] Camberra Catalog Ed. 12: "Standard Electrode Coaxial Ge Detector".  
 [5] Technical Report 295, Measurement of Radionuclides in Food and the Environment International Atomic Energy Agency, Radionuclide Data, p 122-144, Vienne, (1989).