

# Análisis por activación neutrónica de gamma inmediato usando fuentes de neutrones de Am-Be

Marco Munive<sup>1</sup> [mmunive@ipen.gob.pe](mailto:mmunive@ipen.gob.pe), José Solís<sup>1,2</sup> [jsolis@ipen.gob.pe](mailto:jsolis@ipen.gob.pe)

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

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Tupac Amaru 210, Lima, Perú

## Resumen

El análisis por activación neutrónica de gamma inmediato (PGNAA) se puede aplicar al análisis en línea, en aplicaciones médicas e industriales. Esta técnica se vuelve más viable si la fuente de neutrones es portátil. Se está implementando un sistema PGNAA usando dos fuentes de neutrones Am-Be (5 Ci) para la detección de nitrógeno, la cual tendría aplicaciones médicas como medición corporal de proteínas, y aplicaciones industriales como la detección de explosivos y drogas. En el presente trabajo, se detalla el diseño de blindaje y la detección de la radiación gamma. Se ha logrado detectar los fotones gamma correspondiente al nitrógeno e hidrógeno de una muestra de urea diluida en agua.

## Abstract

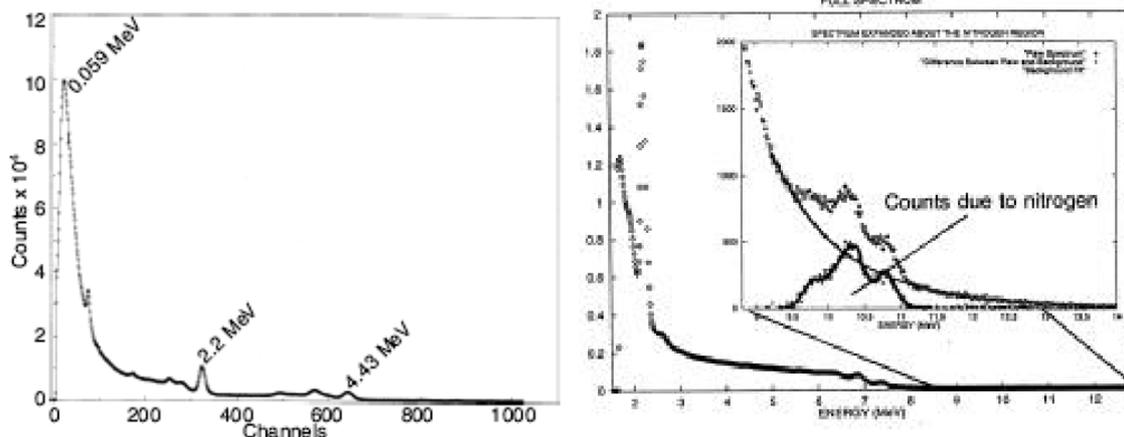
The prompt gamma neutron activation analysis (PGNAA) can be applied to the on-line analysis in medical and industrial applications. This technique becomes more viable if the neutron source is portable. A PGNAA system was implemented using two neutron sources of Am-Be (5 Ci) for the nitrogen detection, which would have applications in medicine, as corporal measure of proteins, and industrial like the detection of explosive and drugs. In this work, we detail the design of the shielding and the detection of the gamma radiation. We have detected the gamma photons of nitrogen and hydrogen in a sample of urea diluted in water.

## 1. Introducción

El análisis por activación neutrónica (AAN) es una técnica nuclear de análisis químico que permite la determinación cuantitativa de un gran número de elementos y presenta, para cierto tipo de elementos y matrices, considerables ventajas frente a otros métodos analíticos. Esta es una técnica no destructiva y se basa en la transformación de los elementos estables presentes en un material, en isótopos radiactivos. Esto se realiza principalmente en tres etapas: primero se irradia la muestra con neutrones en el núcleo del reactor, luego se obtienen los espectros gamma de las muestras radiactivas y en la tercera y última etapa los espectros gamma son procesados. Las energías de los fotopicos espectrales son características e identifican los elementos presentes en la muestra y las áreas de los fotopicos son proporcionales a las concentraciones de los elementos en la muestra. Estos fotones emitidos después de la irradiación se conocen como fotones gamma

retardados. El análisis por activación neutrónica de gamma inmediato (PGNAA) se basa en la detección de los fotones gamma producidos de la interacción de los neutrones con la materia, y que tienen una vida media del orden de  $10^{-15}$  s. Estos fotones también tienen energías típicas, por ejemplo en el caso de la siguiente reacción nuclear  $^{12}\text{C}(n, \gamma) ^{12}\text{C}^*$  se emite un fotón gamma característico de 4.7 MeV. Para el caso del hidrógeno y nitrógeno, también se emiten fotones característicos de 2.24 MeV y 10.8 MeV, respectivamente. La intensidad de los fotopicos en el espectro gamma nos dará la concentración del elemento en la muestra.

En la Figura 1 se observan espectros PGNAA de muestras que contienen H, Be (Fig. 1a) y N (Fig. 1b).



**Figura 1.** Espectros PGNAA de una muestra que tiene a) H y Be, y b) N obtenidas usando una fuente de neutrones Am Be [2, 4].

La determinación de los gamma inmediatos producto de la captura de neutrones en seres vivos es una de las posibilidades de medición no destructiva de determinados elementos componentes de la estructura humana; por ejemplo, nitrógeno, cloro, calcio, fósforo, cadmio, etc., siendo una técnica de diagnóstico y hasta de terapia para aplicaciones médicas, entre las aplicaciones podríamos resaltar:

- Osteoporosis, Osteopenia, medida de calcio a cuerpo completo.
- Medida de cadmio y mercurio
- Medida de nitrógeno a cuerpo completo, estado proteico

El presente informe detalla el avance en la implementación de la técnica PGNAA usando dos fuentes de  $^{241}\text{Am-Be}$ .

## 2. Sistema PGNAA

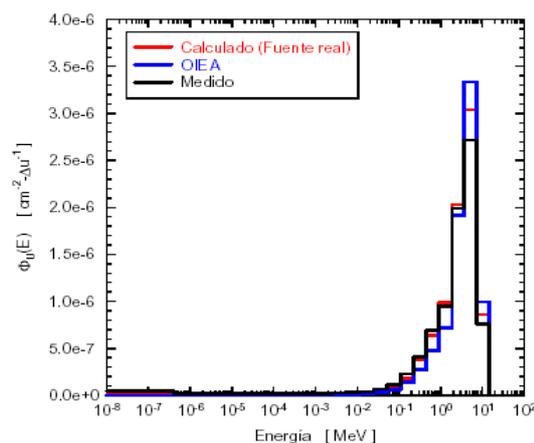
La descripción del sistema implementado se puede dividir en tres partes la fuente de neutrones, el blindaje y la geometría de detección.

En relación a la fuente de neutrones se uso un radioisótopo de  $^{241}\text{Am-Be}$ , de 5 Ci (185 GBq), este radioisótopo tiene un espectro energético mayoritariamente en el rango de neutrones rápido (Fig. 2).

### 2.1 Diseño del sistema

Al usar una fuente de neutrones se debe de tener en cuenta que materiales se usarán en el blindaje biológico. Este debe de contener materiales hidrogenados y combinarse con materiales densos ya que la fuente que se usara es emisora de neutrones y fotones gamma. Para lograr mejor eficacia en el diseño del blindaje se uso el código de

simulación MCNP 4b. Determinándose la mejor distribución de los materiales de blindaje y lograr que la tasa de exposición o de dosis para ambos campos (neutrones y fotones gamma) sea la mas baja posible, de modo que no sobrepase los limites anuales permisibles que es de  $40 \mu\text{Sv/h}$ .



**Figura 2.** Espectro de Neutrones de  $^{241}\text{Am-Be}$  [3].

Se han colocado las dos fuentes Am Be separadas 130 cm y alineadas en un eje vertical una sobre otra. Cada fuente se coloca dentro de un recipiente de polietileno borado, y este a la vez dentro de un cilindro de parafina (Fig. 3). Cada cilindro posee un colimador cilíndrico concéntrico. El cilindro inferior tiene una pared de 20cm y una altura 55 cm, y la longitud del colimador es 15 cm. El cilindro superior posee una pared de 20cm y una altura de 50 cm, y la longitud del colimador es 12 cm. Ambos cilindros están rodeados de parafina, plomo y concreto, y a la altura de la separación entre ambos cilindros se tiene un portamuestra de

33x24x16 cm. A 15 cm del eje se ha construido dos ambientes de paredes de polietileno y polietileno dopado con LiF de 2.5 cm de espesor y rodeada con plomo de 5cm a excepción de la pared colindante al recinto. Estos ambientes albergarán a los detectores de fotones gamma tipo centelleo NaI (TI) de 3”x3”, el cual esta conectado a una cadena de medición gamma.

### 2.2 Proceso de detección

El proceso de medida comienza con la obtención del espectro de gamma inmediato que es producto de la interacción de los neutrones con el material que esta en el recinto. Si no hay objeto alguno, el espectro a registrar sería el del aire, y se obtendría el pico característico del hidrógeno, el principal elemento del aire. A este espectro le denominamos fondo y el pico de hidrógeno se utiliza para calibrar el sistema. En el recinto se coloca la muestra de interés. La calibración en energía del sistema se realiza con una fuente de calibración de  $Co^{60}$ , la geometría utilizada es de dos fuentes opuestas y un detector, pero cabe detallar que la bibliografía también menciona otras posibilidades como dos o más detectores convenientemente distribuidos[5,6] o una combinación de detectores NaI, BGO, GeHP, son algunas posibilidades.

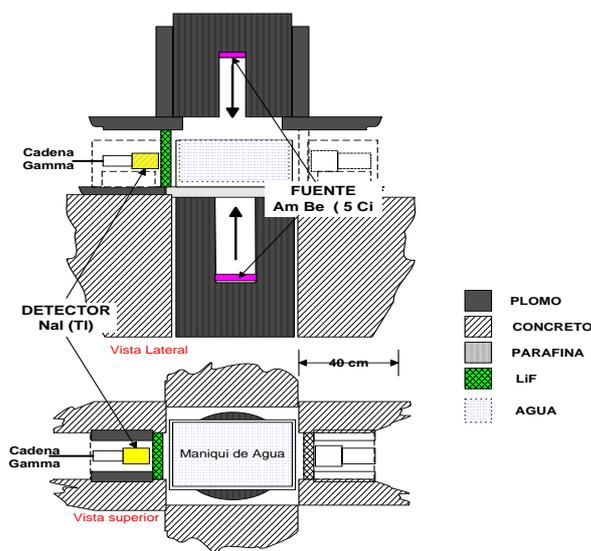


Figura 3. Esquema del diseño de la facilidad de PGNAA usando neutrones de neutrones de Am Be.

## 3. Resultados

### 3.1 Monitoreo de neutrones y fotones

Según los resultados dados por la simulación, y los datos colectados por un monitoreo experimental, se determina que el diseño del blindaje es el óptimo para la experiencia, ya que la tasa de dosis para neutrones promedio alrededor del blindaje es menor de 1 mrem/h para neutrones y para fotones no es mayor a  $2 \mu Sv/h$  (Tabla 1), los cuales están dentro de lo permitido reglamentariamente.

Tabla 1. Valores de monitoreo de dosis alrededor del blindaje de la fuente de neutrones.

Tasa de dosis	Valor máximo	Valor promedio	En posición del experimentador (2 m)
Neutrones <sup>1</sup> (mrem/h)	<b>1.50</b>	<b>&lt; 1.0</b>	<b>&lt; 0.5</b>
fotones <sup>2</sup> (uSv/h)	<b>1,60</b>	<b>0.70</b>	<b>0.35</b>

1 detector de neutrones Victoreen, Modelo 488<sup>a</sup>, Serie 548, calibrado Octubre - 2005

2 detector de fotones marca FAG, modelo: FH40F4 s/n 002458, calibrado octubre-2005

### 3.2 Tasa de dosis en el maniquí de agua

Al interior del recinto se tiene que los parámetros de importancia son el flujo de neutrones y la tasa de dosis en campos mixtos. El flujo de neutrones térmicos esta entre  $1,2 \times 10^4$  y  $2,3 \times 10^4$  n.s<sup>-1</sup>, y la tasa de dosis para fotones esta entre 4 y 9 mSv/h, y la tasa de dosis de neutrones esta entre 6 y 15 mrem/h. En la Figura 4 se observa el mapeo de la tasa de dosis de campos mixtos dentro del maniquí.

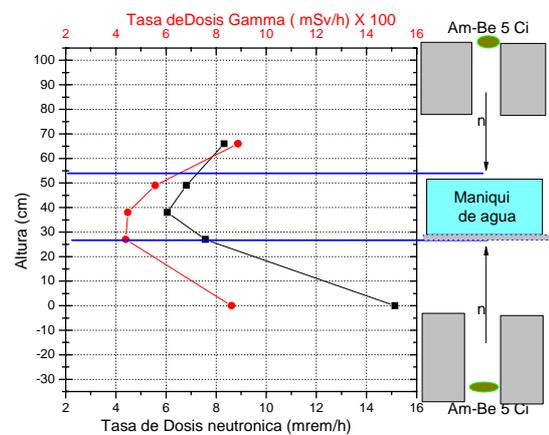
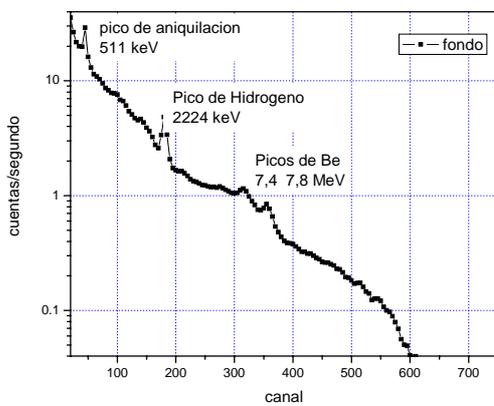


Figura 4. Mapeo de tasa dosis para campos mixtos., variación de la tasa dosis en función de la separación de colimadores.

### 3.3 Obtención del espectro de gamma inmediato

Los primeros resultados relevantes fue la obtención del espectro de radiación gamma del fondo, es decir sin ninguna muestra. En la Figura 5 se aprecia claramente los picos de fotones típicos esperados, tales como en 0,511 MeV pico de aniquilación, en 2,24 MeV correspondiente al hidrógeno, en 7,4 MeV y 7,8 MeV pico de Berilio (originados en la fuente). Los picos correspondientes al Americio no se logran observar ya que el fondo gamma del lugar en el cual se encuentra establecida la experiencia no lo permite.



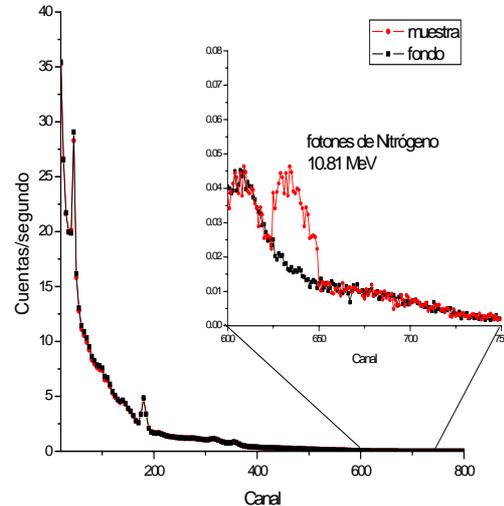
**Figura 5.** Espectro de gamma inmediato, sin muestra (fondo), según configuración, con moderador de neutrones.

Teniendo la configuración, detallada líneas arriba, el procedimiento para poder ver si este sistema es apropiado para poder registrar la concentración de nitrógeno en diferentes muestras. Se uso diferentes concentraciones de urea  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  diluida en un volumen de agua. La presencia de nitrógeno se hará más notoria cuanto la concentración de urea se incremente, esto produce una mayor cantidad de gammas inmediatos registrados en un rango energético de 9 a 11 MeV, llamada región de nitrógeno, frente a una región de hidrógeno (2,0 a 2,5 MeV) casi invariante, debido a que se mantiene el mismo volumen de agua en la solución (Fig. 6).

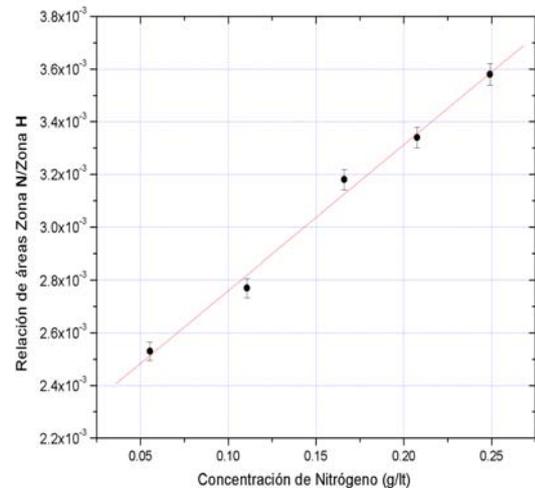
*Condiciones: Volumen de agua en maniquí: 16,54 L  
Masa de urea usada: 2.0 - 8.5 kg, que equivale a 0.86 a 3.91 kg de nitrógeno,  
Tiempo de colección de espectro: 2 h*

Se ha obtenido una relación lineal entre la concentración de nitrógeno en el volumen

colocado en el recinto y la tasa de contaje de la región del nitrógeno, expresado como un cociente entre el área de las regiones nitrógeno e hidrógeno (Fig. 7). Esto refleja que el sistema puede monitorear la variación de nitrógeno en un volumen determinado.



**Figura 6.** Fotones de gamma inmediato de una muestra de urea diluida en agua (400g/lit), colectada en la posición de mejor detección del sistema implementado para PGNAA, se aprecia la región de nitrógeno.



**Figura 7.** Variación lineal de la concentración de nitrógeno en maniquí de agua de 16,54 L en función de la relación de fotones detectados en las zonas nitrógeno e hidrógeno.

### 4. Conclusiones

- Debido a la baja eficiencia de detección en los rangos de alta energía, el centelleo no es un detector idóneo, por lo que se debe probar con un detector semiconductor y un detector BGO.
- Si se requiriese hacer de esta aplicación algo que se derive en una aplicación médica, se deberá de medir la dosis para campos

mixtos sobre un maniquí, para así determinar si el beneficio del uso de esta fuente, supera al detrimento que involucra su uso. Las medidas de las dosis de neutrones y gamma no se realizaron con técnicas estándar, las cuales implican el uso de TLD, lo cual se tiene que hacerse para determinar la aplicabilidad de esta técnica en la medicina.

- El uso de la técnica de PGNA, nos ha permitido determinar el nitrógeno, aunque aun esta pendiente el proceso de cuantificación que deriva a la determinación nitrógeno corporal y esto a determinar la concentración de proteína en seres vivos.

- El diseño establecido para la detección de la radiación gamma inmediato, nos lleva ha establecer mejoras en cuanto a aumentar la fluencia de neutrones, para ello se recomienda el uso dos o más detectores de centelleo y de este modo sensar el nitrógeno en el menor tiempo posible, lo cual implica menor dosis que se podría suministrar a la muestra.

- La aplicación de esta técnica podría extrapolarse a la detección de otros elementos de interés tales como Cloro, Fósforo, Boro, Cadmio y Mercurio, los cuales tienen una ventaja al emitir fotones de menor energía en comparación al nitrógeno, lo cual lleva a tener una mejor eficiencia de detección.

## 5. Referencias

[1]. M. Munive, O. Baltuano, Y. Ravello, *Implementación de la Técnica de Análisis por Activación Neutrónica por Gammas Inmediatos (PGNA)*. Informe Interno, Dpto. de Física PRDT -IPEN 2005.

[2]. R. Mendez, M. P. Iñiguez, *Response Components of LiF: MgLi around a Moderated Am-Be Neutron Source*. Radiation Protection Dosimetry 98(2) (2002): 173-178.

[3]. ICRU, *Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry*. ICRU Report 51, Bethesda, Maryland (1993).

[4]. M. N. Thompson, R. P. Rassool, *Application of Neutron-capture to Elemental Analysis*. The School of Physics, The University of Melbourne, Parkville Vic. Australia.

[5]. Haiying Wang, Ch. M. Waana, *IVNAA Investigation of Factors affecting The Background in the Measurement of Nitrogen*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 151(2) (1991): 293-299.

[6]. Prompt-Gamma Neutron Activation. [www.bcm.edu/bodycomplab/pgmainpage.htm](http://www.bcm.edu/bodycomplab/pgmainpage.htm)