

## CÁLCULO DE LA RESPUESTA DEL DETECTOR $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$

**Karen A. Guzmán-García<sup>1</sup>, Eduardo Gallego-Díaz<sup>1</sup>, Héctor R. Vega-Carrillo<sup>2</sup>, Juan A. Gonzalez<sup>3</sup>, Alfredo Lorente-Fillol<sup>1</sup>, Sviatoslav Ibáñez-Fernández<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Energética, ETSI Industriales Universidad Politécnica de Madrid  
C. José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, España.

<sup>2</sup> Unidad Académica de Estudios Nucleares, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.  
C. Ciprés 10, Fracc. La Peñuela, 98068 Zacatecas, Zac.

<sup>3</sup> Laboratorio de Ingeniería Nuclear, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid  
Campus Ciudad Universitaria, C. Profesor Aranguren 3, 28040, Madrid, España

### RESUMEN

Mediante métodos Monte Carlo se ha estimado la respuesta de un detector de centelleo para neutrones. El detector consiste en 4 bloques de polimetil metacrilato (PMMA) (330 x 230 x 40 mm) en cuyas superficies de contacto tiene un capa de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  de 0.017cm. Los neutrones se detectan a través de los centelleos producidos en el  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  por las partículas producidas durante la captura de neutrones en el  $^{10}\text{B}$ , que está enriquecido al 96%. Los pulsos de luz son conducidos a través del PMMA hasta un tubo fotomultiplicador.

Con el código MCNPX versión 2.6.0, se calcularon las respuestas para 29 fuentes monoenergéticas de neutrones y para el  $^{252}\text{Cf}$  y el  $^{241}\text{AmBe}$ . En los cálculos se estimaron las reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  y la fluencia de neutrones en cada capa de la zona activa del detector. Debido a que la sección eficaz para la reacción  $(n, \alpha)$  depende de la energía del neutrón incidente, el estudio se extendió para la versión moderada del detector; así, se agregaron bloques de polietileno de alta densidad de diferentes espesores: 10, 12, 20, 24, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 mm. A raíz de la escasez del  $^3\text{He}$ , este tipo de detectores se puede usar como una alternativa a los monitores, tipo pórtrico, para la detección de material nuclear especial.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los monitores de radiación tipo pórtrico (RPMs) son utilizados para la localización del tráfico ilícito de materiales nucleares especiales en puntos de acceso en las fronteras de los países. Estos monitores incluyen sistemas de alta sensibilidad a los neutrones [1]. La principal razón de incluir detectores de neutrones es para la detección de materiales, como el plutonio, que se pueden usar para la construcción de dispositivos de destrucción masiva. Los detectores que se usan con mayor frecuencia en los RPMs son contadores proporcionales gaseosos de  $^3\text{He}$ , debido a que tienen una alta eficiencia de detección, bajo fondo y una excelente discriminación gamma [2].

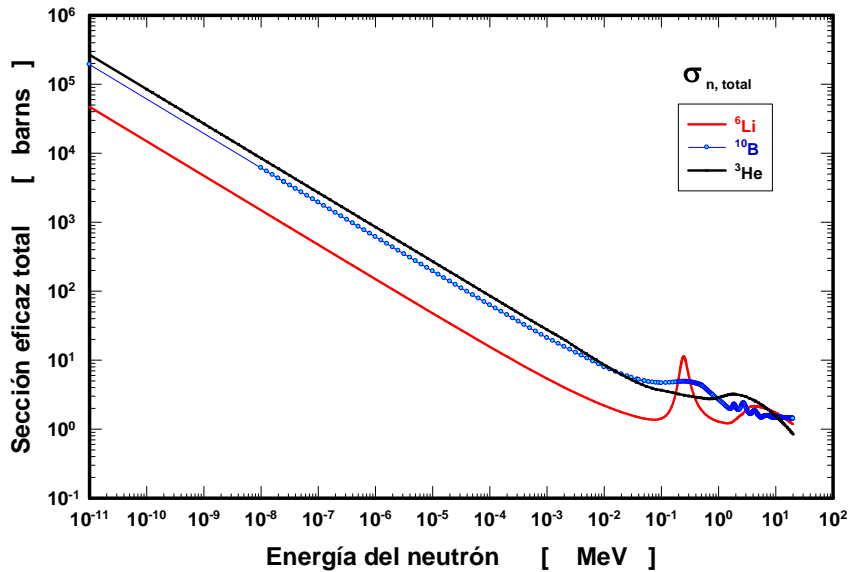
Desde el ataque del 11 de Septiembre 2001 en los Estados Unidos de Norte América, EUA, la demanda del  $^3\text{He}$  se ha incrementado drásticamente debido al aumento en la demanda del  $^3\text{He}$  propiciado por la puesta en marcha de los programas de seguridad de los EUA, y otros países, en su lucha contra el terrorismo nuclear. Esta demanda de  $^3\text{He}$  ha ocasionado una escasez y

---

<sup>1</sup> E-mail del Autor. [ingkarenguzman@gmail.com](mailto:ingkarenguzman@gmail.com)

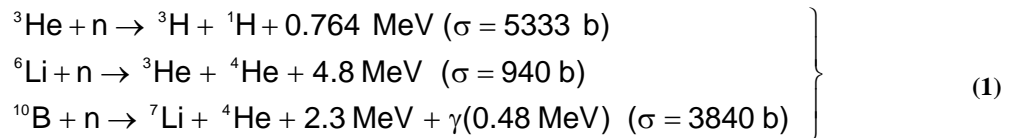
un aumento de su precio. Así púes, es importante encontrar alternativas que sustituyan los detectores de  $^3\text{He}$  con características similares y a menor costo [3,4].

Debido a su sección eficaz los isótopos  $^{10}\text{B}$  y el  $^6\text{Li}$  son una alternativa para la construcción de detectores de neutrones de gran dimensión. En la Figura 1, se muestran las secciones eficaces del  $^6\text{Li}$ , el  $^{10}\text{B}$  y el  $^3\text{He}$ , para neutrones térmicos las secciones eficaces del  $^{10}\text{B}$  y el  $^6\text{Li}$  son aproximadamente el 70% y el 17% de la sección eficaz del  $^3\text{He}$ .



**Figura 1. Sección eficaz ( $\sigma$ ) barns  $^3\text{He}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^6\text{Li}$**

La probabilidad de interacción entre los neutrones térmicos y estos isótopos depende de la sección eficaz [5]. En la ecuación 1 se muestran las reacciones nucleares que intervienen la detección de neutrones.



A pesar de la sección eficaz del  $^6\text{Li}$  no es una buena opción debido a que en la naturaleza su abundancia es 7.5%. Para contar con una buena cantidad de este isótopo hay que usar procesos de enriquecimiento que lo encarecen. Por otro lado, la abundancia del  $^{10}\text{B}$  es 19.8% por lo que su enriquecimiento es menos costoso. En 1954, Koontx *et al.* reportaron la alta eficiencia, para la detección de neutrones, del  $^{10}\text{B}$  en comparación con otros materiales. [6, 7]

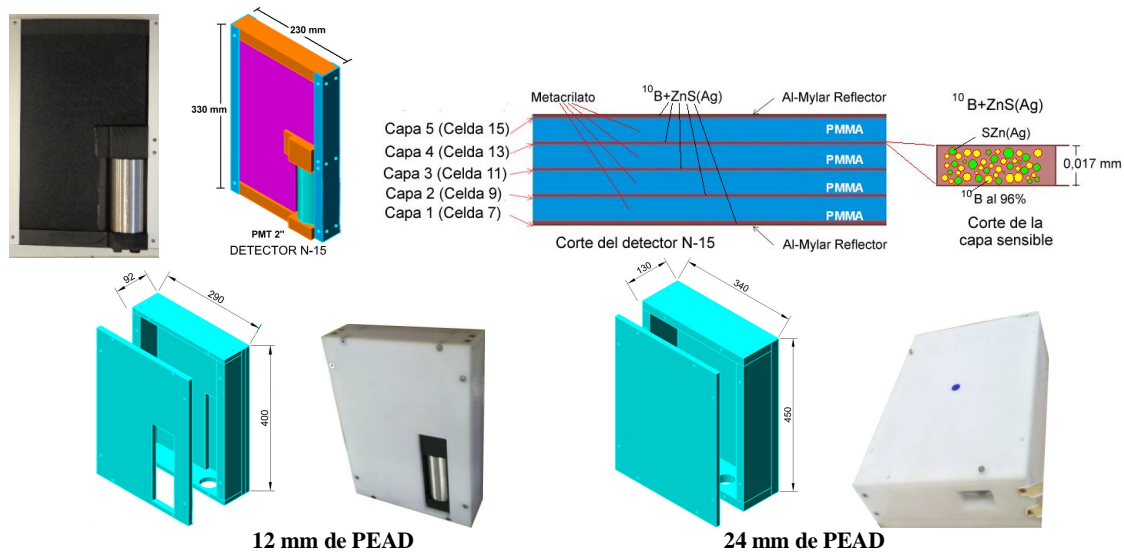
Debido a su alta eficiencia de detección el ZnS(Ag) es uno de los más viejos centelladores inorgánicos usados para la detección de partículas  $\alpha$ , sin embargo, debido a que absorbe su propia luminiscencia no pueden ser usados en espesores mayores a 25 mg/cm<sup>2</sup>. Este centellador se puede usar para detectar neutrones si se le agrega  $^{10}\text{B}$  o  $^6\text{Li}$  ligados a algún material ópticamente transparente como el Polimetil metacrilato PMMA. [6,8]

La escasez del  $^3\text{He}$  y la necesidad de contar con RPMs para la detección de materiales nucleares especiales, han propiciado el desarrollo de diferentes alternativas que deben ser evaluadas. El objetivo de este trabajo fue determinar la respuesta a los neutrones de un detector de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ , bajo diferentes condiciones. La respuesta se determinó mediante métodos Monte Carlo con el código MCNPX 2.6.0 [9]

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción de Detector N-15

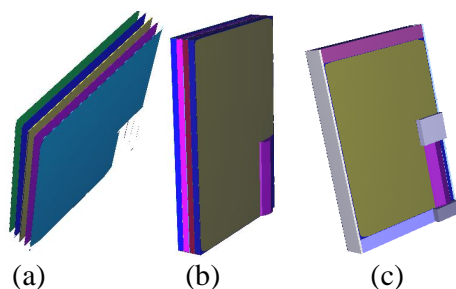
El detector N-15 es un sistema de detección de neutrones de centelleo comercial “nDet-Brick” fabricado por BridgePort [10]. Cuenta con un fotomultiplicador y su electrónica digital integrada. El detector tiene geometría rectangular con dimensiones exteriores de 23 x 33 x 4 cm. La zona sensible del detector está formada por 5 placas transparentes de 0.017 mm de espesor hechas de una mezcla de  $^{10}\text{B}$ , enriquecido al 96%, y del centellador de  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ ,  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Las placas o láminas están depositadas entre 4 placas de PMMA de 8 mm de espesor que actúan como guía de luz y moderador, rodeado de un reflector de Aluminio Mylar, como se muestra en la Figura 2. Este detector tiene dos moderadores de Polietileno de Alta Densidad, PEAD, de 12 y 24 mm de espesor.



**Figura 2. Detector N-15  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$**

## 2.2. Descripción del modelo MCNPX

En la elaboración del modelo del detector se incluyeron las cinco zonas sensibles del detector, los cuatro bloques de PMMA, el tubo fotomultiplicador, que se modeló como un tubo de cristal al vacío, así como todos los componentes que puedan influir en el transporte de los neutrones en el detector [11]. En la Figura 3 se muestran los componentes modelados y el modelo completo.



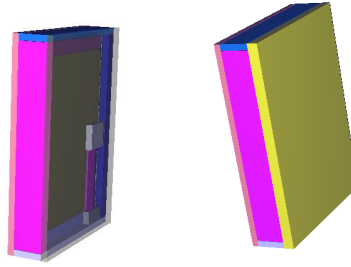
**Figura 3. (a) Zonas sensibles de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ , (b) bloques de PMMA y (c) detector completo N-15**

La respuesta del detector se calculó con el código MCNPX, para 29 fuentes monoenergéticas de neutrones con valores que van desde  $10^{-9}$  a 20 MeV en distintas condiciones del detector desnudo y variando el espesor de moderadores de polietileno de alta densidad, PEAD.

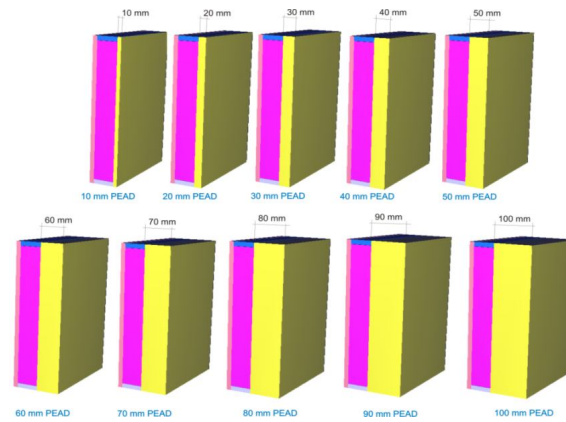
La fluencia de neutrones se calculó en cada una de las celdas de la zona sensible del detector (celda 7, 9, 11, 13 y 15) mediante el tally f4. La cantidad de reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  en el  $^{10}\text{B}$  se calcularon mediante el producto de la fluencia de neutrones en las celdas (tally 4) y la sección eficaz de la reacción (107) [11, 12].

También se calcularon las respuestas para dos fuentes de neutrones de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$  con distintos espesores de PEAD. Los espesores de polietileno que se modelaron en los distintos casos fueron de 12 y 24 mm ya que el sistema tiene estos moderadores. En la figura Figura 4 se muestran los modelos y las imágenes del sistema con los moderadores de PEAD. Este cálculo se extendió para otros espesores de PEAD (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 mm) en la cara frontal y 24 mm en las otras superficies del detector, los modelos de estos casos se muestran en la Figura 5.

En los cálculos se utilizaron las librerías de las secciones eficaces ENDF/B-VI, y el tratamiento  $S(\alpha, \beta)$  para incluir el efecto del moderador para neutrones de baja energía [13]. Por cada cálculo el número de historias que se usaron permitieron obtener una incertidumbre menor al 3%. Se realizaron un total de 403 modelos con distintas condiciones y un total de 2.015 datos de reacciones ocurrientes en el  $^{10}\text{B}$  y 2.015 graficas de fluencia neutrónica para cada uno de los casos. Debido a las restricciones del espacio en este trabajo se muestran los resultados más representativos.



**Figura 4. Moderadores de polietileno de 12 y 24**



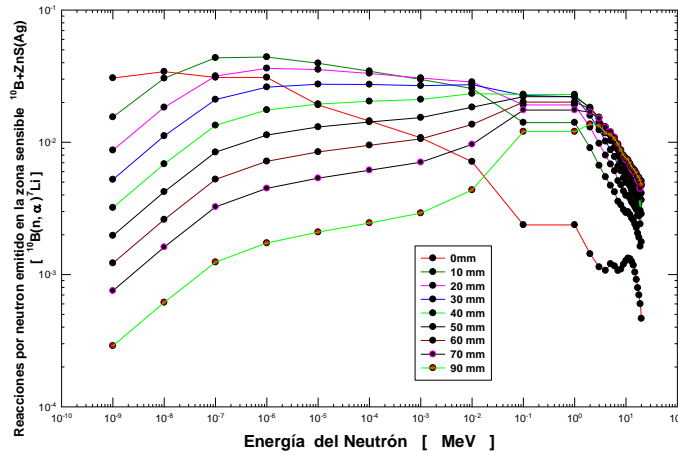
**Figura 5. Moderadores de polietileno (10-100 mm)**

### 3. RESULTADOS

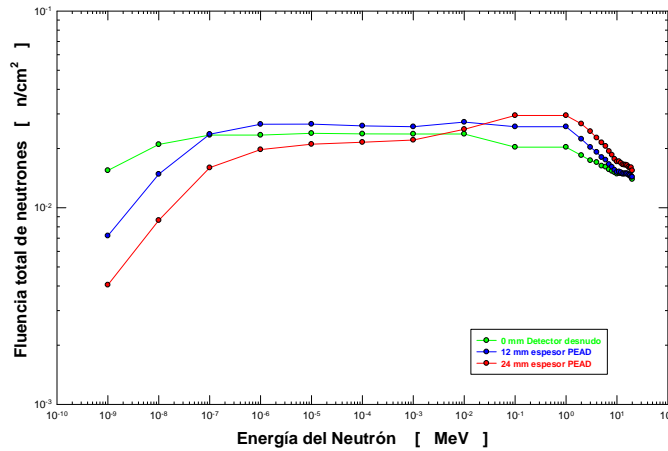
En la Figura 6 se muestra la respuesta del detector para nueve espesores de PEAD, la grafica muestra el número de reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  que ocurren en el  $^{10}\text{B}$  del compuesto en las zonas sensibles del detector  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Se observa que las funciones más constantes en el intervalo  $10^{-7}$  a 1 MeV son las que se obtienen con los espesores de PEAD de 30 y 40 mm. La respuesta del caso sin PEAD (0 mm) tiene aproximadamente la misma forma que la sección eficaz del  $^{10}\text{B}$ . Conforme el espesor aumenta la respuesta para neutrones de baja energía disminuye, pero aumenta la respuesta para funciones de energía más grande. Este comportamiento es similar al reportado en el caso de espectrómetro de esferas Bonner [14].

En la Figura 7 se muestra la respuesta a la fluencia en las zonas sensibles del detector para los casos de 0 (detector desnudo), 12 y 24 mm de PEAD. Para neutrones de energía menor a  $10^{-7}$  MeV, la mayor respuesta se obtiene con el detector desnudo y la menor se obtiene cuando se usa el mayor espesor de PEAD. A bajas energías los neutrones tienen una mayor probabilidad de ser absorbidos por el polietileno. De  $10^{-7}$  a  $10^{-2}$  MeV la mayor cantidad de neutrones se obtiene con el espesor de 12 mm de PEAD y para neutrones de energía mayor a  $10^{-2}$  MeV la

mejor respuesta se obtiene con el espesor de 24 mm de PEAD. En este comportamiento se refleja la capacidad de moderación del PEAD.



**Figura 6. Respuesta  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  del detector N-15 con moderadores de PEAD de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 mm de espesor frontal**



**Figura 7. Respuesta de la fluencia del detector N-15 con moderadores de PEAD de 0, 12 y 24 mm de espesor**

En la Figura 8 se presenta la función respuesta  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  del detector desnudo, con 12 y 24 mm de PEAD, la importancia de esta grafica es que muestra las respuestas del detector con los moderadores construidos físicamente.

En la Tabla 1 se muestran los resultados del número de reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  que ocurren en el detector con espesores de 0, 12 y 24 mm de PEAD así como el detector ante los neutrones del  $^{252}\text{Cf}$ . En las dos últimas columnas se incluyen el total de las reacciones y el la

fluencia total de neutrones en todas las capas sensibles del detector. Para el caso de la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$ , estos mismos resultados se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 1. Flujo total y número de reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  totales y en cada celda del detector desnudo, 12 y 24 mm de PEAD ante una fuente de  $^{252}\text{Cf}$**

cm	$R(n, \alpha)_{\text{celda7}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda9}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda11}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda13}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda15}}$	$R(n, \alpha)_{\text{Total}}$	$\Phi_{\text{Total}}$ (n/cm <sup>2</sup> )
0	$1.078 \times 10^{-4}$	$2.067 \times 10^{-4}$	$1.425 \times 10^{-3}$	$2.732 \times 10^{-4}$	$1.188 \times 10^{-4}$	$2.191 \times 10^{-3}$	$1.742 \times 10^{-2}$
12	$1.296 \times 10^{-3}$	$1.468 \times 10^{-3}$	$6.864 \times 10^{-3}$	$1.472 \times 10^{-3}$	$1.256 \times 10^{-3}$	$1.235 \times 10^{-2}$	$2.322 \times 10^{-2}$
24	$2.410 \times 10^{-3}$	$2.540 \times 10^{-3}$	$1.180 \times 10^{-2}$	$2.633 \times 10^{-3}$	$2.512 \times 10^{-3}$	$2.188 \times 10^{-2}$	$2.641 \times 10^{-2}$

**Tabla 2. Flujo total y número de reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  totales y en cada celda del detector desnudo, 12 y 24 mm de PEAD ante una fuente de  $^{241}\text{AmBe}$**

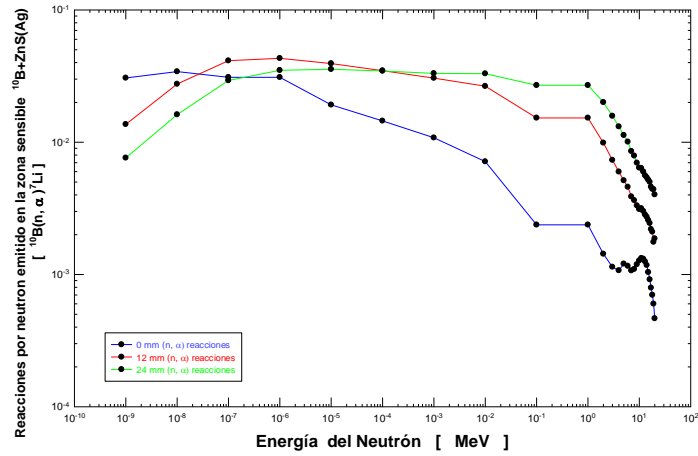
cm	$R(n, \alpha)_{\text{celda7}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda9}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda11}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda13}}$	$R(n, \alpha)_{\text{celda15}}$	$R(n, \alpha)_{\text{Total}}$	$\Phi_{\text{Total}}$ (n/cm <sup>2</sup> )
0	$9.815 \times 10^{-5}$	$1.976 \times 10^{-4}$	$1.048 \times 10^{-3}$	$2.085 \times 10^{-4}$	$1.185 \times 10^{-4}$	$1.671 \times 10^{-3}$	$1.588 \times 10^{-2}$
12	$8.689 \times 10^{-4}$	$9.813 \times 10^{-4}$	$4.596 \times 10^{-3}$	$9.861 \times 10^{-4}$	$8.499 \times 10^{-4}$	$8.282 \times 10^{-3}$	$2.014 \times 10^{-2}$
24	$1.739 \times 10^{-3}$	$1.823 \times 10^{-3}$	$8.407 \times 10^{-3}$	$1.867 \times 10^{-3}$	$1.776 \times 10^{-3}$	$1.561 \times 10^{-2}$	$2.319 \times 10^{-2}$

La eficiencia de detección,  $\varepsilon$ , se determinó mediante la ecuación 2.

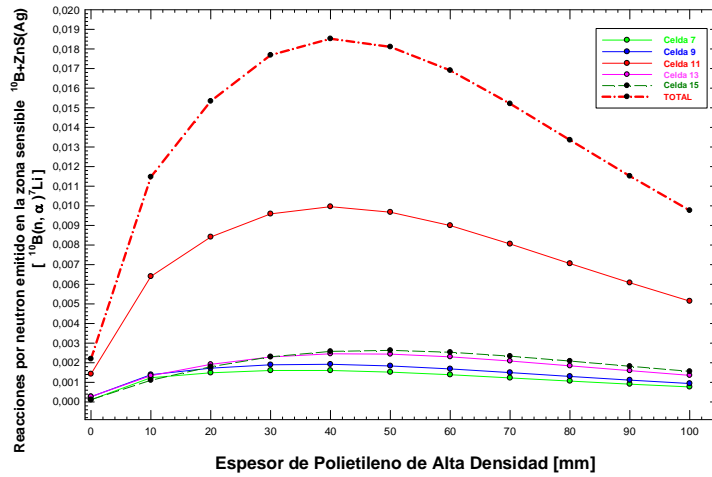
$$\varepsilon = \frac{R(n, \alpha)}{\Phi} \quad (2)$$

Las respuestas del número de reacciones, en las celdas sensibles del detector con distintos espesores de PEAD, ante neutrones del  $^{252}\text{Cf}$  se muestran en la Figura 9, donde también se incluyó la respuesta total (todas las celdas sensibles). El mayor número de reacciones se presentan cuando se usa un espesor de 40 mm de PEAD, donde se observa que la fluencia de neutrones es de  $0.0208 \text{ n/cm}^2$  por cada neutrón que emite la fuente y produce 0.0185 reacción (n,  $\alpha$ ), lo que representa una eficiencia del 88.9%.

La cantidad de reacciones (n,  $\alpha$ ) del detector en función del espesor de PEAD, ante los neutrones del  $^{241}\text{AmBe}$  se muestra en la Figura 10. El mayor número de reacciones (0.0138) suceden con un espesor de 50 mm de PEAD y la fluencia de neutrones es de  $0.0182 \text{ n/cm}^2$ , por cada neutrón que emite la fuente, lo que representa una eficiencia del 75.8%. Para el caso del  $^{241}\text{AmBe}$  la mayor eficiencia se presenta con 50 mm de espesor del PEAD, mientras que para el caso del  $^{252}\text{Cf}$  ocurre con 40 mm, esto se debe a que la energía promedio de los neutrones del  $^{241}\text{AmBe}$  es de aproximadamente 5 MeV y del  $^{252}\text{Cf}$  es de 2 MeV [15], por lo tanto los neutrones del  $^{241}\text{AmBe}$  requieren de una mayor cantidad de PEAD para ser termalizados.

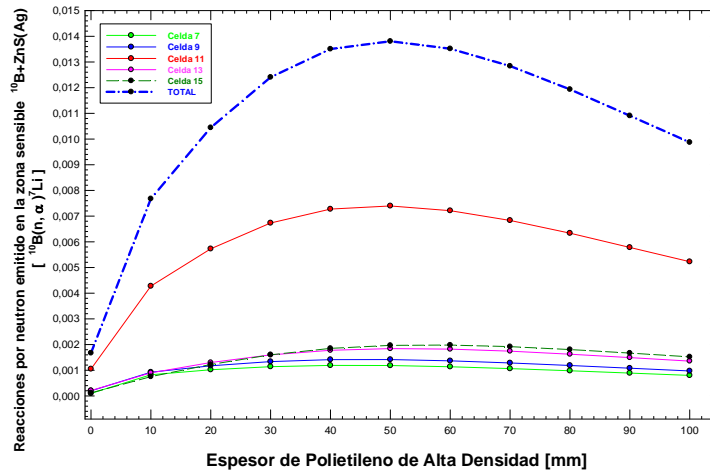


**Figura 8. Respuesta  $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$  del detector N-15 con moderadores de PEAD de 0, 12 y 24 mm de espesor**



**Figura 9. Respuesta  $^{10}\text{B}(\text{n}, \alpha)$  del detector N-15 con moderadores de PEAD de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 mm de espesor frontal, ante una fuente de  $^{252}\text{Cf}$**





**Figura 10. Respuesta  $^{10}\text{B}(n, \alpha)$  del detector N-15 con moderadores de PEAD de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 y 90 mm de espesor frontal, ante una fuente de  $^{241}\text{AmBe}$**

#### 4. CONCLUSIONES

Mediante cálculos Monte Carlo se han calculado la fluencia de neutrones y las reacciones  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  que ocurren en el detector N-15, ante fuentes monoenergéticas de neutrones. Los cálculos se hicieron para el caso del detector desnudo y con once espesores de PEAD. También se calcularon las respuestas del detector ante neutrones del  $^{252}\text{Cf}$  y del  $^{241}\text{AmBe}$ , principalmente para el caso desnudo y con dos espesores de PEAD 12 y 24 mm, y se extendió de 10-100 mm de PEAD. Para el caso del detector desnudo la fluencia de neutrones para el detector desnudo es aproximadamente constante

- Para las fuentes monoenergéticas el número de reacciones varía con la energía del neutrón y el espesor del PEAD.
- La mayor cantidad de reacciones para neutrones de energía menor a  $10^{-7}$  MeV ocurren con el detector desnudo, para este mismo caso la menor cantidad de reacciones ocurre para neutrones de energía mayor a  $2 \times 10^{-2}$  MeV. Conforme el espesor del PEAD aumenta la respuesta a los neutrones de baja energía disminuye y aumenta para neutrones de mayor energía.
- La eficiencia óptima del detector ante los neutrones de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  se presenta cuando se usan 40 mm de PEAD, esta eficiencia es del 88.9%.
- La eficiencia óptima del detector ante los neutrones de la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  se presenta cuando se usan 50 mm de PEAD, esta eficiencia es del 75.8%.

## 5. AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (México), CONACyT, por la beca para realizar estudios de Posgrado en el extranjero (Madrid, España).

## 6. REFERENCIAS

1. Kouzes, R.T., Ely, J.H., Lintereur, A.T., Siciliano, E.R., Stromswold, D.C., Woodring, M. L., “Alternative Neutron Detection Testing Summary”, Pacific Northwest Report **PNNL19311**, PP. 1-47 (2010).
2. Kouzes, R.T., Siciliano, E.R., Ely, J.H., Keller, P.E., McConn R.J., “Passive neutron detection for interdiction of nuclear material at borders”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **584**, pp. 383-400 (2008).
3. Zeitelhack, K, “The  $^3\text{He}$  supply crisis and alternative techniques to  $^3\text{He}$  based neutron detectors for neutron scattering applications”, *Report on the meeting of detector experts held at FRM II*, Grenoble, France, 7-8 de Julio, 1-20 (2009).
4. Shea, D.A., Morgan, D., “The Helium-3 Shortage: Supply, Demand and Options for Congress”, *Congressional Research Service, CRS Report for Congress*, Diciembre 22, (2010).
5. Balem, C., “Technical Testing of the STRIDE Stanchion Detector System”, *Department of physics, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surry*, Doctoral dissertation, (2010).
6. Koonts, P.G., Keepin, G.R., Ashley, J.E., “ ZnS(Ag) Phosphor Mixtures for Neutron Scintillation Counting”, *Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California*, LA-1663, (1954)
7. McMillan, J., Marsden, E., “Neutron Detectors for Security Applications” *19<sup>th</sup> International Workshop on Vertex Detectors-VERTEX 2010*, June 06-11, 2010, 1-5
8. Lee, S.K., Kang, Sh. Y., Jang, D.Y., Lee, Ch.H., Kang, S. M., Kang, B.H., Lee, W.G., Kim, Y.K., “ Comparison of New Simple Methods in Fabricating ZnS(Ag) Scintillators for Detecting Alpha Particles” *Nuclear Science and Technology*, **1**, pp. 194-197 (2011)
9. Pelowitz, D.B., “MCNPX User’s Manual Version 2.5.0”, *Los Alamos National Laboratory*, Reporte LA-Cp-05-0369. Los Alamos NM, EUA, (2005)
10. BridgePort Instruments, LLC, Neutron Detector System R2D-nDet, Device-Specific data Sheet, R2D-nDet-15 ds 1095, **03** (2013)
11. Guzmán-García, K.A., Mendez-Villafañe, R., Vega-Carrillo, H.R., “Neutron field characteristics of CIEMAT’s Neutron Standards Laboratory”, *Applied Radiation and Isotopes*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.10.028j>, (2015).
12. Vega-Carrillo, H.R., Barquero, R., Mercado, G. A., “Passive neutron area monitor with CR39”, *International Journal of Radiation Research*, **11**, pp. 149-153 (2014).
13. Vega-Carrillo, H.R., Guzmán-García, K.A., Gallego, E., Lorente, A., “Passive neutron area monitor with pairs of TLDs as neutron detector”, *Radiation Measurements*, **69**, pp. 30-34 (2014).
14. Mazrou, H., Idiri, Z., Sidahmed, T. “MCNP5 evaluation of a response matrix of a Bonner Sphere Spectrometer with a high efficiency  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$  detector from 0.01 eV to 20 MeV neutrons”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **284**, pp. 253-263 (2010).
15. Vega-Carrillo, H.R., Manzanares, E., Hernández-Dávila, V.M., Mercado, G.A., Gallego-Díaz, E., Lorente-Fillol, A. “Características dosimétricas de fuentes isotópicas de neutrones”, *Revista Mexicana de Física*, **51**, pp. 494-501 (2005).