



Revista Internacional de Investigación e Innovación  
Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

**Detectores de Neutrones de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  como alternativa a los detectores de  $^3\text{He}$  instalados en los Monitores de Radiación tipo Pórtico RPM's**

**Neutron Detectors  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  as an alternative to  $^3\text{He}$ -based installed in the Radiation Portal Monitors, RPM's**

Guzmán-García, K.A.<sup>a</sup>, Vega-Carrillo, H.R.<sup>b</sup>, Gallego E.<sup>a</sup>, González J.A.<sup>c</sup>, Lorente A.<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Industriales, Departamento de Ingeniería Energética, C. José Gutiérrez. Abascal, 2, 28006, Madrid España  
[ingkarenguzman@gmail.com](mailto:ingkarenguzman@gmail.com), [eduardo.gallego@upm.es](mailto:eduardo.gallego@upm.es),  
[alfredo.lorente@upm.es](mailto:alfredo.lorente@upm.es)

<sup>b</sup> Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Estudios Nucleares, C. Ciprés 10, 98068, Zacatecas México  
[rvega@uaz.edu.mx](mailto:rvega@uaz.edu.mx), [fermineutron@yahoo.com](mailto:fermineutron@yahoo.com)

<sup>c</sup> Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Caminos Canales y Puertos, Laboratorio de Ingeniería Nuclear, Campus Ciudad Universitaria, C. Prof. Aranguren, 3, 28040 Madrid España  
[juan.a.gonz.gonz@gmail.com](mailto:juan.a.gonz.gonz@gmail.com)

**Innovación tecnológica:** Alternativa a los escasos detectores de  $^3\text{He}$  para detección de  $^{239}\text{Pu}$ .

**Área de aplicación industrial:** Protección Radiológica y Seguridad Nacional.

Recibido: 24 enero 2016.

Aceptado: 10 octubre. 2016.

### Resumen

Los sistemas de detección llamados “*Radiation Portal Monitors*” RPMs o Monitores de Radiación tipo Pórtico habitualmente instalados en zonas fronterizas, son un conjunto de detectores gamma y de neutrones; el uso de detectores gamma se justifica para el control de presencia inadvertida de fuentes radiactivas y la colocación de detectores de neutrones para la detección de los llamados Material Nuclear Especial (SNM), como el  $^{239}\text{Pu}$ , utilizado para la construcción de armas de destrucción masiva. Los detectores de neutrones empleados habitualmente son contadores proporcionales de  $^3\text{He}$ , pero debido a la escasez de  $^3\text{He}$ , reportada desde 2009, se han hecho diferentes investigaciones para encontrar alternativas de detección, buscando características similares a estos equipos ya instalados. El objetivo de este trabajo fue el estudio de un detector de centelleo de ZnS dopado con Ag con una mezcla con  $^{10}\text{B}$  de alto enriquecimiento,  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Mediante Métodos Monte Carlo, código MCNPX se ha estimado la respuesta de un detector de gran dimensión calculando las

reacciones de  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  en el  $^{10}\text{B}$  para 29 fuentes monoenergéticas de neutrones y se ha comparado con modelos anteriores. Se ha modelado en las mismas condiciones de medición para validar modelo. El detector fue fabricado por la empresa BridgePort Instruments LLC, se determinó las cuentas por segundo por cada nano gramo de  $^{252}\text{Cf}$  a 200 cm. Con estos resultados se concluye que los detectores de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  son una interesante alternativa a los detectores de  $^3\text{He}$ . Se avanza para mejorar en geometría y composición en busca el detector óptimo para ser equiparable a los de  $^3\text{He}$ .

**Palabras Claves:** Material Nuclear Especial SNM, MCNPX, Neutrones,  $^{10}\text{B}$ , Detección.

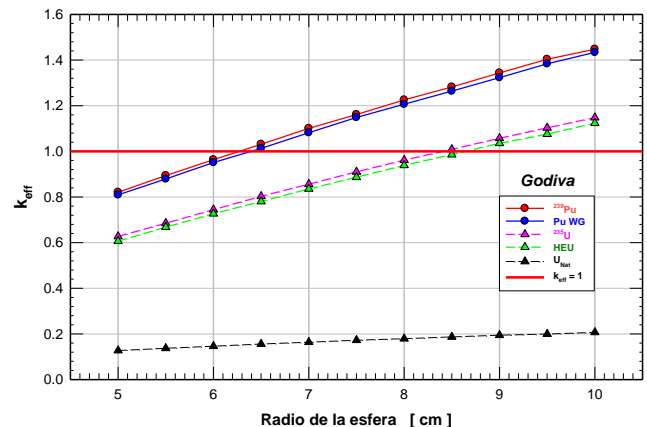
### Abstract

The Radiation Portal Monitors, RPM, detection systems, include sets of gamma and neutron detectors, for Special Nuclear Materials, SNM, and detection, installed in border areas to combat nuclear terrorism. Usually the employed neutron detectors are  $^3\text{He}$  proportional counters, but due to the storage of  $^3\text{He}$ , reported since 2009, they have been made different researches to find alternative detection, seeking similarity to those already installed equipment with  $^3\text{He}$  features. The aim of this work was the study of a scintillation detector  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  mixed with highly enriched  $^{10}\text{B}$ ,  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Using Monte Carlo methods, MCNPX code, the response of the detector for neutrons was estimated, calculated the number of  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  reactions for 29 monoenergetic neutron sources. It has been modeled under the same measurement conditions to validate model. The detector was manufactured by BridgePort. The detector response was estimated and the model was validated correctly reproducing the detector response to counts per second. With these results we conclude this detectors  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  are an interesting alternative for replace the  $^3\text{He}$  detectors. Progress is being made to improve geometry and composition looking for the optimal detector equated to the  $^3\text{He}$  detector.

**Key words:** Special Nuclear Material SNM, MCNPX, Neutrons,  $^{10}\text{B}$ , Detection.

### 1. Introducción

Los monitores de radiación tipo pórtilo RPMs, son instalados en aduanas para el control de tráfico ilícito e incontrolado de material radiactivo y nuclear, ya que como se muestra en la Figura 1 la cantidad de material nuclear para producir un artefacto de destrucción masiva es prácticamente pequeño.



**Figura 1.** Factor de multiplicación efectivo de esferas de distintos radios con diferentes materiales nucleares (PUWG, HEU,  $^{235}\text{U}$ ).

A raíz de los atentados del 11 de Septiembre de 2001 estos equipos se instalaron en distintos puntos estratégicos de afluencia de personas y vehículos de

transporte, cargamento o particular, y su demanda incremento notoriamente [1]. Los detectores de neutrones que se instalan en los RPMs son contadores proporcionales de gas de  $^3\text{He}$ , caracterizados por su alta eficiencia de detección y bajo fondo. En 2009 se reportó una escases importante de  $^3\text{He}$  lo cual motivo a la búsqueda de alternativas que asemejaran sus características [2].

El objetivo de este trabajo fue estudiar un detector de neutrones de centelleo de  $\text{ZnS(Ag)}$  con  $^{10}\text{B}$ ,  $^{10}\text{B}+\text{ZnS(Ag)}$  N-48, mediante métodos Monte Carlo, código MCNPX, donde se determinó su función respuesta ante 29 fuentes mono energéticas de neutrones con energías desde  $10^{-9}$  a 20 MeV.

También, se evaluó su desempeño mediante mediciones en condiciones similares de operación, dentro de RPMs, y modelos MCNPX.

## 2. Materiales y Equipos

### 2.1. Detectores de centelleo de neutrones $^{10}\text{B}+\text{ZnS(Ag)}$

Los isótopos  $^3\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$  y el  $^{10}\text{B}$  son los más utilizados para la detección de neutrones ya que se caracterizan por tener una buena sección eficaz en su reacción con los neutrones térmicos, produciendo partículas secundarias cargadas que permiten su detección midiendo la señal producida por los productos de su reacción. El  $^{10}\text{B}$  tiene una sección eficaz mayor que el  $^6\text{Li}$  de un 70% y 17% con respecto al  $^3\text{He}$  [3].

El centelleador más utilizado para la detección de partículas  $\alpha$  es el  $\text{ZnS(Ag)}$  debido a su alta eficiencia de detección [4]. A raíz de la escasez de  $^3\text{He}$  existe interés a nivel mundial de buscar alternativas. Una opción es usar detectores de centelleo  $\text{ZnS(Ag)}$  mezclado con  $^{10}\text{B}$ ,

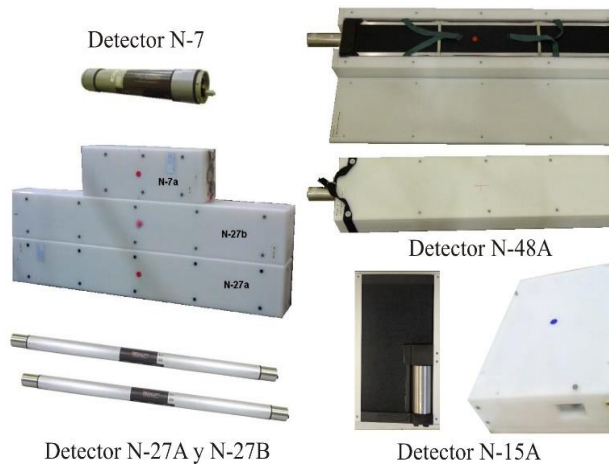
donde la detección de los neutrones se realiza de manera indirecta por la reacción  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ , en el  $^{10}\text{B}$  emitiendo una partícula  $\alpha$  detectada por el  $\text{ZnS(Ag)}$ . Es decir el  $^{10}\text{B}+\text{ZnS(Ag)}$  no es encontrado de manera natural se ha de producir sintéticamente.

En su transporte en el centelleador  $\text{ZnS(Ag)}$ , las partículas  $\alpha$  lo excitan produciendo fotones (centelleos) que se conducen hacia el tubo fotomultiplicador, PTM, por medio de una guía de luz, en este caso de polimetil metacrilato, PMMA, donde se convierten en pulsos de corriente cuya rapidez se correlaciona con los neutrones incidentes mediante el ajuste de parámetros en el discriminador de impulsos por gammas.

Debido al tiempo de centelleo y a la distancia recorrida no todas las reacciones producidas llegan a PTM por lo que es necesario caracterizarlos. Los detectores de neutrones en la Universidad Politécnica de Madrid, UPM, son una serie de detectores de distintas geometrías fabricados por la empresa BrigePort Instruments LLC, denominados internamente; N-7, N-27A, N-27B, N-15A, N-15B y N-48, mostrados en la Figura 2, donde el número identifica la longitud en pulgadas del detector.

Los detectores pueden ser de geometría cilíndrica y rectangular. Cada detector tiene incorporado un moderador de polietileno de alta densidad, HDPE, que modera y termaliza los neutrones con el fin de propiciar la reacción con el  $^{10}\text{B}$ .

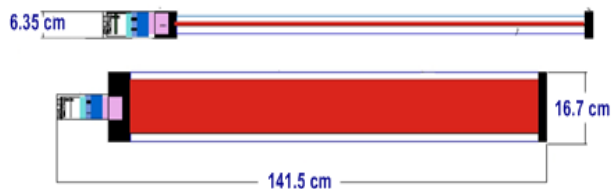
En este trabajo se estudió la respuesta del detector con mayor superficie longitudinal denominado N-48, con moderador HDPE de 25+50 [mm], es decir 50 mm en sus laterales excepto el frontal de 25 mm de HDPE.



**Figura 2.** Detectores de neutrones  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ , distintas geometrías, con y sin moderador de HDPE (Imagen propia de detectores en la UPM, BridgePort Instruments LLC [5]).

**2.2. Descripción del detector N-48**

El detector de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  comercialmente llamado R2DNT, fabricado por BridgePort [5] identificado como N-48, mostrado en la Figura 3, es de geometría rectangular de dimensiones exteriores de 141.5 x 16.7 x 6.35 [cm].

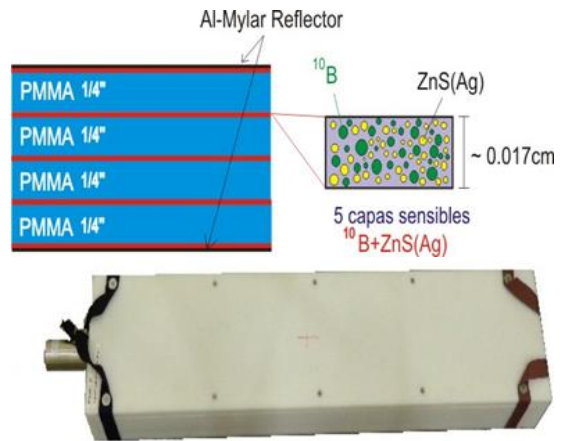


**Figura 3.** Esquema del Detector N-48.

El detector está fabricado por 5 láminas transparentes de 120 x 15.2 x ~ 0.017 cm de espesor de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  depositadas en placas de PMMA, de 0.635 cm de espesor.

El PMMA actúa como guía de luz y a su vez de moderador, rodeado todo de una capa de aluminio Al Mylar de aproximadamente 8µm, que actúa como reflector. Este detector se rodea de un moderador de HDPE, de 0.94 gr/cm<sup>3</sup> de 50 mm en todos sus lados excepto el frontal

que es menor siendo de 25 mm de espesor, como se observa en la Figura 4.



**Figura 4.** Esquema del interior del Detector N-48  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ . Fotografía del detector completo con HDPE 25+50 [mm] [5].

**3. Métodos Experimentales**

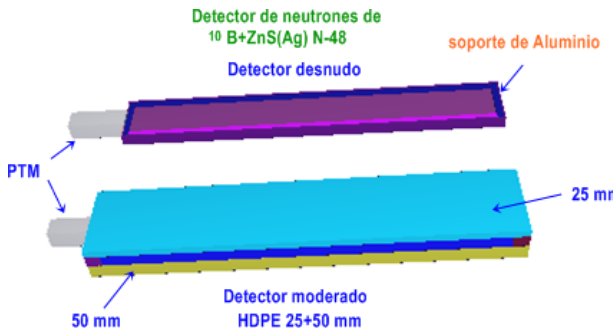
**3.1. Descripción del Modelo MCNPX cálculo de la respuesta**

El método Monte Carlo es un método aleatorio, no determinista, que permite resolver problemas físicos y matemáticos mediante números aleatorios que se usan para muestrear funciones de distribución. Emula el transporte de la radiación mediante un conjunto de historias, cada historia inicia en su aparición y termina en su desaparición. Resuelve la versión integral de la ecuación de transporte [6]. El MCNPX es un código utilizado para calcular en energía continua el transporte de neutrones, fotones y electrones en geometría de tres dimensiones, es utilizado ampliamente en física nuclear.

Mediante el código Monte Carlo MCNPX [7] se determinó la respuesta del detector N-48 para 29 fuentes mono energéticas de neutrones en condiciones ideales. En la modelación se incluyeron todos los componentes del detector importantes en el transporte de la radiación, como los soportes de aluminio, el moderador de

HDPE.

El PTM se modeló como un tubo de vidrio al vacío. Y se determinó la respuesta con las 29 fuentes mono energéticas para dos condiciones: el detector; desnudo y con moderador de HDPE de 25+50 [mm], Figura 5.



**Figura 5.** Modelo MCNPX NR-48  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ , desnudo y con moderador de HDPE 25+50 [mm].

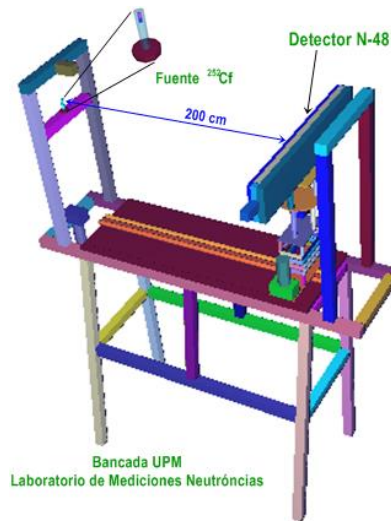
Se utilizaron fuentes mono energéticas de neutrones con la finalidad de conocer la respuesta del detector en el rango de energías desde  $10^{-9}$  a 20MeV, para esto se desarrollaron 29 cálculos para detector desnudo y 29 para detector Moderado, 56 cálculos en total.

### 3.2. Descripción del Modelo MCNPX condiciones similares medición (con fuentes de $^{252}\text{Cf}$ )

Se realizaron otros modelos bajo condiciones reales de medición, Laboratorio de medidas neutrónicas y Laboratorio de Ingeniería Nuclear, LIN-UPM.

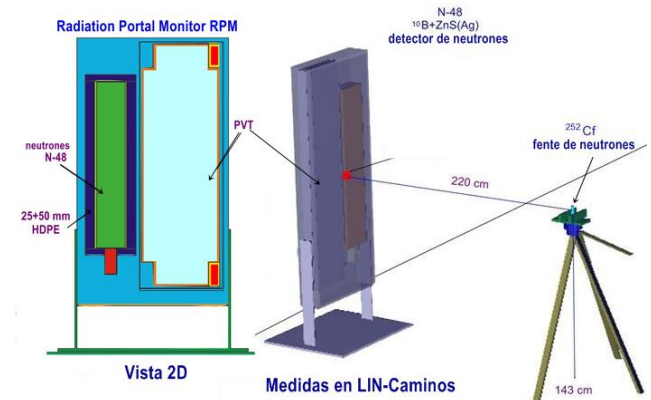
Para ello el modelo del detector se acoplo al modelo de la sala de calibración y bancada del Laboratorio de Medidas neutrónicas, UPM, LMN-UPM [8], Figura 6, con dos fuentes de  $^{252}\text{Cf}$ , con el fin de compararlo con los resultados experimentales y los datos

proporcionados por el fabricante.



**Figura 6.** Modelo MCNPX N-48  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ , ante fuentes de  $^{252}\text{Cf}$ .

Se realizó un modelo detallado del N-48 en conjunto con un detector VT para detección gama, es decir en un RPM, en las mismas condiciones a las realizadas en las medidas en seguida descritas, Figura 7.



**Figura 7.** Modelo MCNPX N-48-RPM  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ , ante fuentes de  $^{252}\text{Cf}$ .

La cantidad de reacciones de  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  del  $^{10}\text{B}$  se calcularon mediante el producto de la fluencia de neutrones de cada celda de la zona sensible del detector y la sección eficaz de la reacción (n, $\alpha$ ) [9]. El



número de historias fue suficiente para obtener una incertidumbre menor al 3%. Se usaron las bibliotecas ENDF/B-VI donde se incluyó el tratamiento (S,β) para incluir el efecto de moderador en los neutrones de bajas energías [10].

### 3.2. Medidas en el Laboratorio de Ingeniería Nuclear, LIN- UPM.

Se realizaron medidas estáticas con dos fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  de  $10\mu\text{Ci}$ , las cuales se posiciona de manera manual en el punto de irradiación. Cada una tiene dimensiones de 7.8 de  $\varnothing$  por 10 mm de longitud. Las fuentes tienen un doble encapsulado de acero y se manipulan dentro de un soporte de polietileno, Figura 8.



Figura 8. Fuentes de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$ .

Las medidas se realizaron en el LMN-UPM, sobre la bancada a 200 cm tal y como se muestra en la figura 9.



Figura 9. N-48 sobre la bancada del LMN-UPM ante fuentes de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$  a 200 cm.

Otras medidas se realizaron en el LIN - UPM a 220 cm de distancia, con el detector N-48 dentro del RPM como se muestra en la Figura 9, en conjunto con un detector de PVT para la detección gamma, Figura 10.



Figura 9. RPM, Monitor de Radiación Tipo Pórtico, Medidas estáticas en el LIN-Caminos UPM.

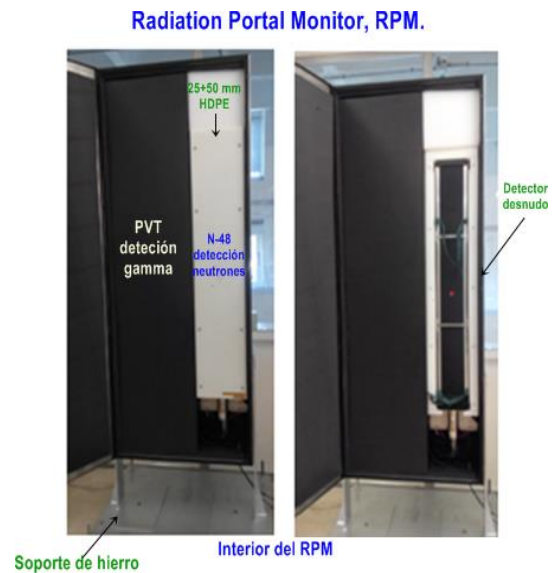


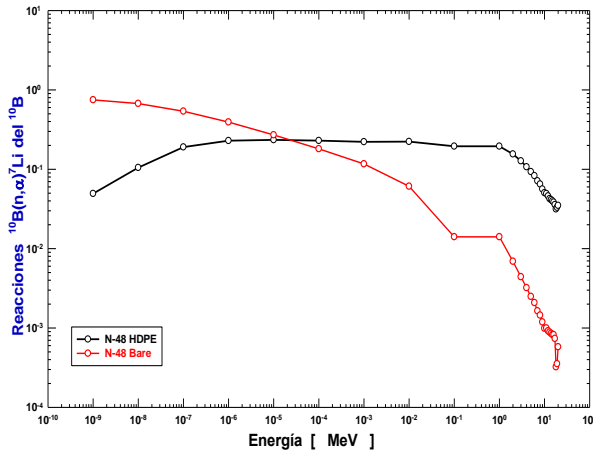
Figura 10. RPM, Monitor de Radiación Tipo Pórtico, diseñado por la UPM.

## 4. Discusión y Resultados

### 4.1 Respuesta del detector N-48

En la Figura 11 se muestra la función respuesta  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  del detector en condición desnuda y con HDPE de 25+50

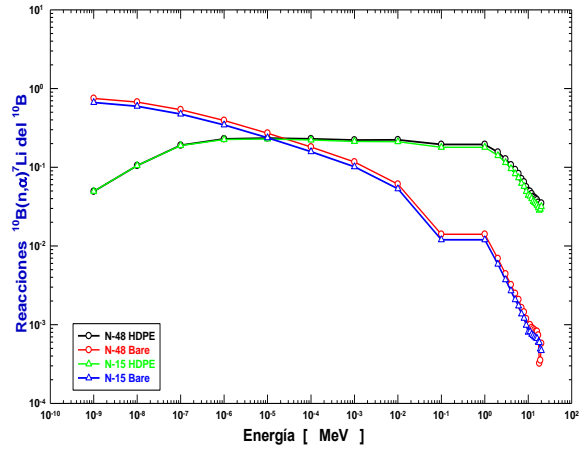
mm, ante 29 fuentes mono energéticas de  $10^{-9}$  a 20 MeV, la figura muestra los resultados del detector N-48 en condición desnuda y con moderador de HDPE.



**Figura 11.** Respuesta del detector N-48,  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  en función de la energía del neutrón.

Los neutrones de mayor energía se moderan propiciando su interacción con el  $^{10}\text{B}$  lo que demuestra la importancia de moderación del HDPE lo que resulta una respuesta más lineal en el mayor rango de energías, lo que coincide con estudios previos [11,12].

En la Figura 12 se muestra la función respuesta  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  del detector en condición desnuda y moderada de dos detectores, N-48 y N-15 [11], con la finalidad de comparativa de respuesta en ambos detectores.



**Figura 12.** Respuesta del detector N-48 y N-15,  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  en función de la energía del neutrón HDPE.

En su forma, la respuesta del detector N-48 es similar al detector N-15, pero es ligeramente mayor en el número de reacciones ocurrentes en el  $^{10}\text{B}$ .

El Fabricante BridgePort Instruments LLC, reporta que en N-48 tiene una eficiencia de detección por cada nano gramo de Californio de 1.77 cps/ng de  $^{252}\text{Cf}$  a 200 cm, tomando en cuenta que 1 ng de  $^{252}\text{Cf}$  emite 2100 n/s [5].

**Tabla 1.** Medidas en cps/ng  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ .

	Medidas cps/ng $^{252}\text{Cf}$	MCNPX $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$
LMN	$1.78 \pm 0.09$	$3.679 \pm 0.20$
LIN	$1.92 \pm 0.15$	$3.981 \pm 0.10$

De los cálculos Monte Carlo a las medidas la diferencia se atribuye a que no todas los centelleos producidos por las reacciones alcanzan al PTM para dar una cuenta. Por lo tanto la eficiencia del ZnS(Ag) es aproximadamente del 48% que es menor al del N-15 de 53% [12] ya que éste es más grande y la distancia recorrida es más larga y el centelleo termina antes de llegar

al PTM.

#### 4.2 Resultados de medidas estáticas con fuentes de $^{252}\text{Cf}$ y Modelo, compartiva.

Las medidas estáticas realizadas en el LIN-UPM con el N-48 en el RPM a 2.2 m ante las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  se cuantificaron  $1.9 \pm 0.1$  cps/ng de  $^{252}\text{Cf}$ , el valor se aproxima al reportado por el fabricante, más sin embargo cualquier variación debe tomarse en cuenta que la posición de los detectores con respecto al suelo puede sufrir variaciones significativas, que el detector ahora está en conjunto dentro del RPM y existen elementos que influyen en el transporte de los neutrones y las medidas se han realizado a 20 cm más alejada de las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$ , sobretodo la cercanía del RPM con la pared, lo cual aumenta la retro dispersión de los neutrones [13].

#### 5. Conclusiones

Mediante métodos Monte Carlo se determinó la respuesta de un detector de neutrones de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  cuya eficiencia del centelleador se determinó de un 48% aproximadamente. Este detector es capaz de detectar  $\sim 1.9$  cps/ng de  $^{252}\text{Cf}$  a 220 m, muy cercano a las 2.5 cps/ng de  $^{252}\text{Cf}$  a 200 cm [14] que por norma se sugiere para ser equiparable los detectores de  $^3\text{He}$ , lo que resulta que estos detectores son una alternativa prometedora para suplir dichos detectores, una mejora en su geometría, o cantidad de  $^{10}\text{B}$  en espesor podrá aumentar la eficiencia de detección del detector, incluso la caracterización in-situ es muy importante por la retro-dispersión de los neutrones que aumenta al eficiencia de detección.

El mismo modelo en el LIN pero a 200 cm de distancia de las fuentes de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$  al detector N-48 en el LIN se determina una eficiencia de  $2.14 \pm 0.06$  cps/ng de  $^{252}\text{Cf}$  a 200 cm

#### 7. Agradecimientos

La primera autora K.A Guzmán-García, agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, (CONACyT) y al Consejo Zacatecano de Ciencia Tecnología e Innovación, (COZCyT), por la beca para realizar estudios de posgrado en Madrid, España.

#### 8. Bibliografía

- 1.- Kouzes, R.T., Siciliano, E.R., Ely, J.H., Keller, P.E., McConn, R.J. (2008). “*Passive neutron detection for interdiction of nuclear material at borders*”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 584, 383-400.
- 2.- Cooper, R., Greenfield, D., Rhodes, N., Engers, R., Zetelhack, K., Guerard, B., Kemmerling, G., Kiselev, O., Smith, G., Soyama, K., Wilpert, T., Klein, M., Defendi, Ll. (2009). “*The  $^3\text{Helium}$  supply crisis and alternative techniques to  $^3\text{Helium}$  based neutron detectors for neutron scattering applications*”. Report on the Meeting of Detector Experts. FRM II, Grenoble, France. Pp. 1-20.
- 3.- Balem C. (2010). “*Technical Testing of the STRIDE Stanchion Detector System*”. Master of Science Dissertation. University of Surrey, UK.
- 4.- Koontz, P.G., Keepin, G.R., Ashley, J.E. 1955. “*ZnS(Ag) Phosphor mixtures for neutron scintillation counting*”. The Review of Scientific Instruments 26, 352-356.
- 5.- BridgePort Instruments, LLC. 2012. “*Neutron Detector System R2D-nDet, Device-Specific data Sheet*”. R2D-nDet-48, 03.<http://www.bridgeportinstruments.com/>
- 6.-Metropolis, N. (1987). “*The beginning of the Monte Carlo Method*”. Los Alamos Science 15: 125 - 130.



7.-Pelowitz, D.B., (2008). “*MCNPX User’s manual*” Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-05-0369, Los Alamos, N.M.

8.-Vega-Carrillo, H.R., Gallego, E., Lorente, A., Rubio, I.P., Méndez R. (2004). “*Neutron features at the UPM neutronics hall*”. Radiation Protection Dosimetry. 110(1-14):73:9.

9.- Vega-Carrillo HR; Barquero R; Mercado GA. (2014). “*Passive neutron area monitor with CR39*”. International Journal of Radiation Research 11, 149-153.

10.- Vega-Carrillo HR; Guzmán-García KA; Gallego E; Lorente A. (2014). “*Passive neutron area monitor with pairs of TLDs as neutron detector*”. Radiation Measurements 69, 30-34.

11.-Guzmán-García, K.A., Vega-Carrillo, H.R., Gallego, E., Lorente, A., Méndez, R., González, J.A., Ibañez-Fernandez, S., (2016). “*Study of a  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  neutrón detector as an alternative to  $^3\text{He}$ -based detectors in Homeland Security*”. Applied Radiation and isotopes, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.03.015i>.

12.-Guzmán-García, K.A., Vega-Carrillo, H.R., Gallego, E., Lorente, A., Méndez, R., González, J.A., Ibañez-Fernandez, S. (2015). “*Cálculo de la respuesta del detector de neutrones de  $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$  con el código MCNPX*”. 4to congreso conjunto de la Sociedad Española de Protección Radiológica, SEPR, Sociedad Española de Física Medica, SEFM, Valencia, España 23-26 Junio 2015, Memorias.

13.- Vega-Carrillo, H.R., Manzanares-Acuña E., Iñiguez, M.P, Gallego E., Lorente A., (2007). “*Study of room-return neutrons*”. Radiation Measurements, 42:413-419.

14.- ANSI. 45. 32, (2006). “*American National Standard for Evaluation and Performance of Radiation Detection Portal Monitors for Use in Homeland Security*”. IEEE National Committee on Radiation Instrumentation, N42.