

Detector de $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ para detección del tráfico ilícito de SNM en aduanas, como alternativa a los detectores de ^3He instalados en los RPM's

Karen A. Guzmán-García¹, Eduardo Gallego¹, H.R. Vega-Carrillo², Juan A. González¹, Alfredo Lorente¹

¹ Universidad Politécnica de Madrid
ETS Industriales, Departamento de Ingeniería Energética
C. José Gutiérrez Abascal, 2, 28002
913363112 extensión 119

ingkarenguzman@gmail.com

² Universidad Autónoma de Zacatecas, México
Unidad Académica de Estudios Nucleares
Calle Ciprés 10, Fraccionamiento La Peñuela, 98060

Resumen – *En la Seguridad Nacional, una de las principales líneas de defensa contra el terrorismo nuclear en las fronteras, es el control de las mercancías y de las personas que entran y salen por las aduanas de cada país, con Monitores de Radiación tipo Pórtico, "Radiation Portal Monitors, RPM's". Estos dispositivos forman parte de una de las líneas de defensa que se instalan en distintas partes del mundo, para detectar los Materiales Nucleares Especiales, "Special Nuclear Materials" SNM. Los RPM's son un conjunto de detectores que miden las emisiones gamma y neutrones de las mercancías o de las personas cuando pasan, sin detenerse, por las aduanas. Los detectores de neutrones utilizados en los RPM's son contadores proporcionales de gas de ^3He de grandes dimensiones, colocados dentro de una caja de polietileno de alta densidad que actúa como moderador de neutrones, y que se caracterizan por su alta eficiencia de detección de neutrones. En el año 2009, tras el inicio de una crisis mundial en el abastecimiento de ^3He , se comienza la búsqueda de nuevas tecnologías como alternativa a estos detectores. El objetivo principal de este trabajo es el estudio de la detección de neutrones de gran superficie, para suplementar o para sustituir los detectores de ^3He que se instalan actualmente en los RPM's. El detector de $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$, se basa en detectores de centelleo de partículas α , de $\text{ZnS}(\text{Ag})$, mezclado con ^{10}B de alto enriquecimiento. Los neutrones reaccionan en el detector, $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, emitiendo una partícula α y un núcleo de ^7Li de retroceso, que son detectados por el $\text{ZnS}(\text{Ag})$. Mediante métodos de Monte Carlo, con el código MCNP6, se ha estimado la respuesta de una nueva geometría y configuración de detector llamado, N-15 plus, en cps/ng de ^{252}Cf a una distancia de 200 cm, calculando las reacciones que ocurren en el ^{10}B . El modelo se configuró en condiciones muy similares a las de operación en las aduanas, es decir instalado en el exterior. El nuevo modelo N-15 plus, se basa en el detector ya construido y medido, N-15, donde se proponen mejoras en su configuración, para aumentar la eficiencia de detección. Al comparar los resultados obtenidos, se aprecia claramente la importancia de estos cambios, pues alcanzan y mejora la eficiencia fijada por la norma ANSI N42.35 de 2.5 cps/ng ^{252}Cf a 200 cm. Estos resultados, verifican que los detectores de neutrones de $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ son una alternativa interesante y válida para remplazar los detectores de ^3He .*

1. INTRODUCCIÓN.

Los Monitores de Radiación tipo Pórtico, RPM, instalados actualmente en las fronteras de Estados Unidos con Canadá y México, y en otras partes del mundo, son un conjunto de detectores de emisiones gamma, normalmente de PVT o $\text{NaI}(\text{TI})$ y detectores de neutrones, que son tubos presurizados de ^3He . El uso de los detectores de neutrones se justifica para la detección de Material Nuclear Especial, SNM, como el ^{239}Pu (Kouzes *et al* 2008). La implementación de los RPMs, se incrementó notablemente a raíz de los atentados del 11 de Septiembre 2001, como una medida

preventiva ante ataques terroristas; esta medida propició, desde 2009, una importante escasez de ^3He , ya que el departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos usa gran parte de ^3He para los RPMs instalados en su país (Kouzes *et al* 2010).

Por ello surge la necesidad de búsqueda de alternativas para reemplazar los detectores de ^3He . Los detectores de ^3He se caracterizan por su buena eficiencia en la detección de los neutrones, por su bajo fondo y por su insensibilidad ante la radiación gamma, lo que representa que su probabilidad para dar falsas alarmas de detección de neutrones, debido a campos de radiación gamma, es casi despreciables (Kouzes *et al* 2009).

En la Universidad Politécnica de Madrid, se han estudiado distintas geometrías de detectores de neutrones $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$, formado por una mezcla de centelladores de $\text{ZnS}(\text{Ag})$, con ^{10}B de alto enriquecimiento y fabricados por la empresa BridgePort Instrument, Austin Texas EEUU. En base a los estudios previos del detector nDetBrick, N-15, diseñado inicialmente para mochilas, (Bridgeport, 2013), se analiza una nueva configuración y geometría de un nuevo modelo N-15 plus.

El objetivo de este trabajo es determinar la respuesta de un sistema de detección de neutrones con tres detectores, N-15 plus A,B y C, ante una fuente de ^{252}Cf a 200 cm de distancia, en un RPM completo en conjunto con detectores de PVT, bajo condiciones similares de operación en los RPM's en puntos aduanales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El detector N-15 plus, está basado en el detector N-15, nDetBrick, con mejoras en la composición del $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ y en la guía de luz de polimetil metacrilato, PMMA. Esta propuesta de mejora, está basada en resultados de estudios y medidas previas realizadas en el detector N-15.

El N-15 tiene un fotomultiplicador y su electrónica digital integrada con adquisición de datos en un PC, vía USB eMorpho MCA. Tiene una geometría rectangular, con dimensiones exteriores de 232 x 360 x 65 mm. La zona sensible a los neutrones, del $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$, está formada por 5 capas transparentes de ~ 0.17115 mm de espesor, que tienen una mezcla de ^{10}B de alto enriquecimiento, con un centelleador de $\text{ZnS}(\text{Ag})$ sensible a partículas α . Los impulsos de luz se propagan por 4 placas de polimetil metacrilato, PMMA, de 1/4" (0.635 cm) que actúa como guías de luz y como moderador adicional, rodeado en el exterior por un reflector de ~ 8 μm de espesor de Al-Mylar.

Con el fin de mejorar la eficiencia de detección el detector está rodeado con polietileno de alta densidad, HDPE, de 0.94 gr/cm³, con dimensiones de 24 mm en la superficie frontal, 48 mm en los demás extremos del detector tal y como se observa en la Figura 1.

Las dimensiones del moderador se han seleccionado, para poder colocar los nuevos detectores de $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$, en los espacios que ocupan actualmente los detectores de ^3He en los RPM's.



Figura 1. Configuración nDetBrick, interior exterior y moderador, construidos.

2.1. Modelo MCNP6

Para determinar la respuesta del detector se usaron métodos Monte Carlo con el código MCNP6 versión 6.1 (Pelowitz *et al* 2014). Se construyó el modelo del sistema de detección de neutrones usando las características básicas del detector N-15, los cambios que se realizaron se basan en los resultados de previos estudios realizados al N-15 para mejorar los resultados de los estudios anteriormente, llamándolo N-15 plus. En el modelo se incluyeron los detalles de los materiales y su composición elemental.

El detector N-15 plus, tiene la misma geometría rectangular de 232 x 360 mm, pero se incrementó porcentaje del ^{10}B de la capa sensible del detector $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ en un 30% y se aumento el grosor de las placas de PMMA de 6.35 mm a 8 mm, pues en estudios anteriores se aprecia un incremento hasta del 14% en su eficiencia total, como se observa en la Tabla 1 (Guzmán-García *et al* 2016). A pesar que las placas de 10 mm muestran una respuesta mejor en eficiencia se seleccionan las placas de 8 mm para que el espesor total del detector no sea muy alto, como se observa en la Figura 2.

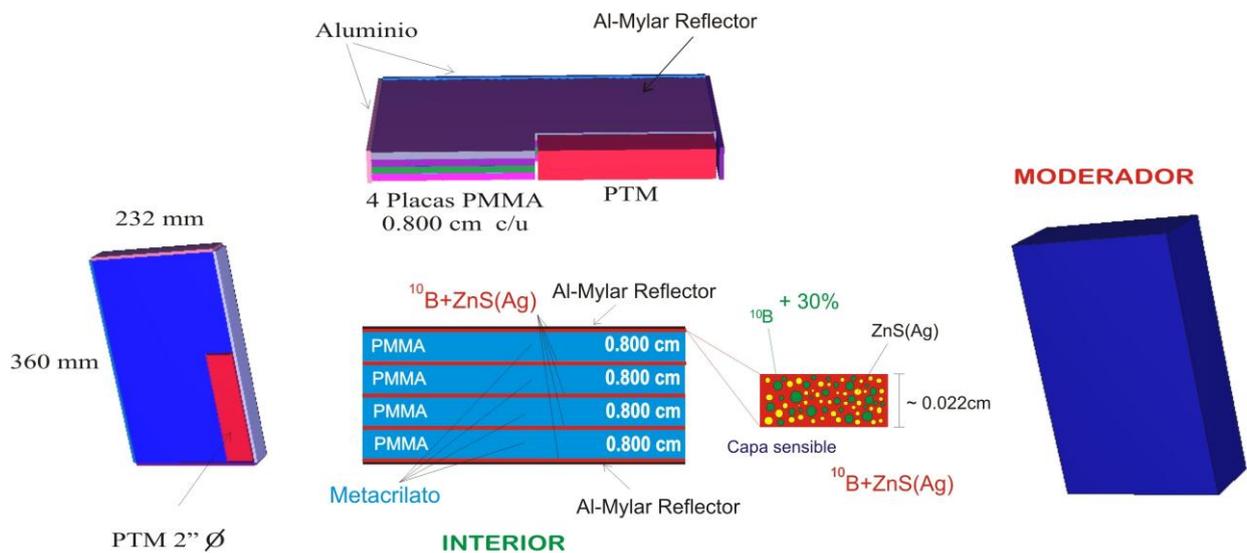


Figura 2. Configuración (modelo MCNP6) nuevo detector N-15plus, exterior, interior y moderador

Tabla 1. Respuesta del detector nDetBrick, N-15, con distintos espesores de PMMA y moderado con 24 + 48 mm de HDPE.

PMMA espesor [cm]	Detector N-15 variando PMMA MCNPX cps/ng ^{252}Cf	~ % respecto al espesor PMMA N-15
0.300	0,575 ± 0.023	-14,29
0.400	0,619 ± 0.024	-7,70
0.500	0,635 ± 0.025	-5,30
0.600	0,670 ± 0.026	-0,09
0.635	0,671 ± 0.026	-
0.700	0,695 ± 0.027	+3,60
0.800	0,726 ± 0.028	+8,23
0.900	0,736 ± 0.028	+9,77
1.000	0,764 ± 0.029	+13,89

Para poder sustituir los detectores de ^3He actualmente ya instalados en distintos pórticos, es necesario que el detector, además de cumplir con características similares de detección, sea también un reemplazo físico, es decir que ocupen el mismo espacio que actualmente usan los detectores de ^3He ; éstos son contadores proporcionales rodeados con HDPE con dimensiones de 25 mm en el frente y 50 mm de espesor en los demás laterales, es decir dentro de una caja de HDPE, lo cual tres detectores N-15 plus entran dentro de esta caja de moderador de HDPE.

Por esta razón se han seleccionado estas dimensiones para el moderador de polietileno del detector. De esta manera, no es necesario modificar la estructura de hierro de los pórticos, ni los moderadores, cuando se tenga que cambiar los detectores de ^3He por tres detectores N-15 plus.

Con el MCNP6, se realizó un modelo completo de RPM, con detectores de PVT para la detección de rayos gamma y con detectores de neutrones N-15 plus. El RPM consta de dos detectores PVT y tres N-15 plus (A,B,C) de $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$, dentro de un soporte de hierro. En el modelo se incluye el moderador de alta densidad de 0.95 gr/cm^3 y para los detectores PVT su blindaje de Plomo y su soporte de aluminio. Esta geometría se muestra en la Figura 3.

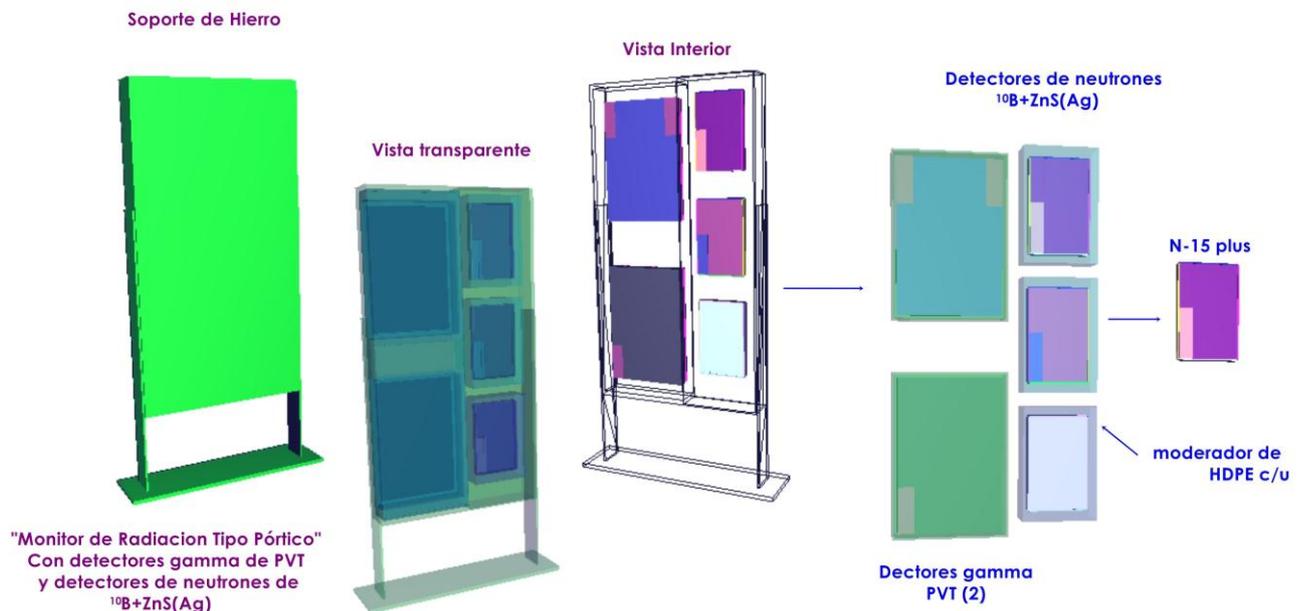


Figura 3. Modelo sistema completo de RPM's con detectores PVT (2) y detectores de neutrones de $^{10}\text{B}+\text{Zs}(\text{Ag})$ (N-15 plus A, B y C)

En la configuración de los detectores N-15 plus en el RPM, es importante su posición respecto al suelo, y de acuerdo a estudios anteriores, se verifica que su eficiencia es más alta cuando está el centro del detector está a 75 cm del suelo (Guzmán-García *et al* 2016). Las variaciones de las eficiencias en cps/ng ^{252}Cf , se pueden observar en la Tabla 2. La separación entre los centros de los detectores N-15 plus es de 50 cm. Los detectores de PVT también están centrados en el lateral derecho.

Hay que mencionar que el estudio realizado previamente sobre la importancia de la distancia entre el centro del detector y el suelo, se modelo en condiciones básicas, es decir: modelando solo el aire, el suelo, el detector y el moderador. Las fuentes de ^{252}Cf tenían un moderador HDPE de 0.7 cm, y estaba situadas frente al detector a 200 cm a una altura del suelo de 100 cm (Guzmán-García *et al* 2016). Estos valores son diferentes a este modelo actual, donde la muestra está a una altura del suelo de 140 cm, y donde no se consideró otros elementos de importancia como la estructura del soporte y el blindaje de hierro, los detectores de PVT ni su blindaje de plomo.

Tabla 2. Respuesta en cps/ng de ^{252}Cf del detector nDetBrick, N-15, a distintas distancias con respecto al suelo.

[cm]	125	100	75	50	25
cps/ng ^{252}Cf	0.81 ± 0.05	0.85 ± 0.05	0.86 ± 0.05	0.83 ± 0.05	0.78 ± 0.04

El modelo se ha realizado en condiciones parecidas a las operativas de los pórticos, es decir, está situado en el exterior donde solo se toma en cuenta en suelo, las fuentes de neutrones son de californio ^{252}Cf , según la recomendaciones dadas en estudios realizados en el Pacific Northwest National Laboratory, PNNL, y en otros estudios de alternativas a los ^3He (Kouzes *et al* 2010). Para comparar los resultados con los obtenidos con otros detectores, el modelo de las fuentes se ha hecho como lo hacen en el PNNL; donde las fuentes de neutrones de ^{252}Cf están rodeadas con un espesor de plomo de 0.5 cm, con una densidad de 11.35 gr/cm^3 y con un espesor de polietileno de alta densidad de 2.5 cm con una densidad de 0.95 gr/cm^3 . Las fuentes se han colocado sobre un trípode a una distancia de 200 cm del centro geométrico del RPM y a 140 cm de altura del suelo, como se muestra en la Figura 4.

Para estudiar la mejor respuesta del RPMs, los detectores de neutrones se han colocado tanto en posición vertical como en horizontal.

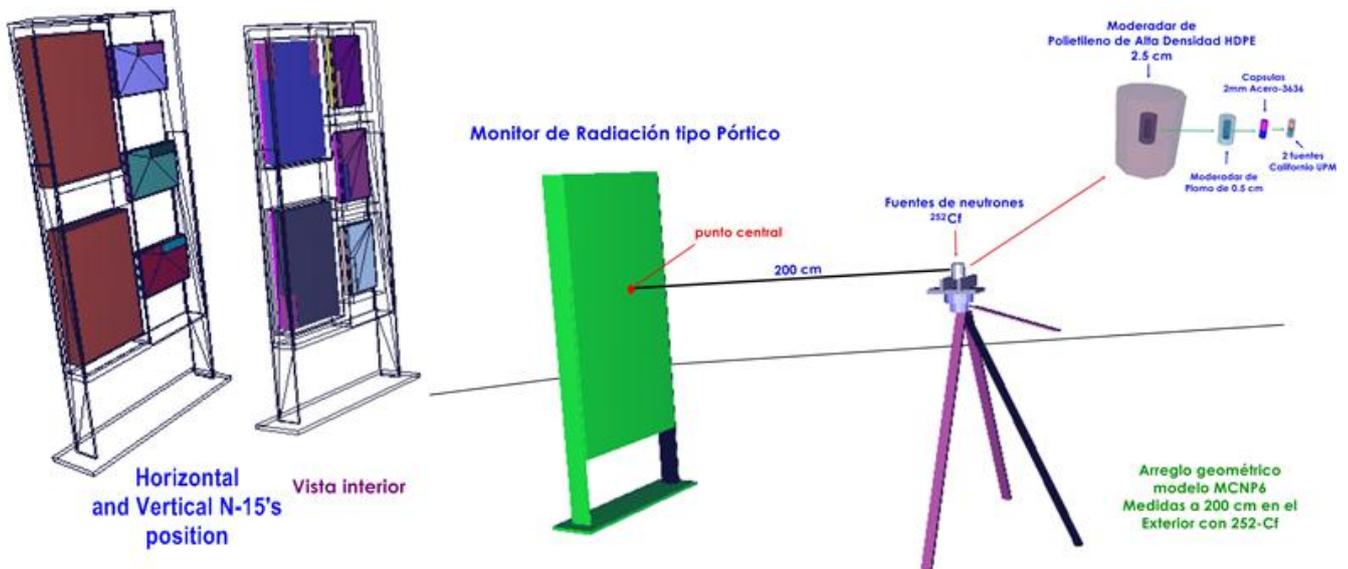


Figura 4. Modelo del RPM con el nuevo sistema de detector de neutrones (N-15 plus A, B y C) ante fuentes de ^{252}Cf a 200 cm.

La respuesta de los detectores, se determinó por la cantidad de reacciones de $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ en el ^{10}B se calcularon mediante el producto de la fluencia de neutrones en cada celda con el contabilizador "tally" F4 y la sección eficaz de la reacción (107) (n, α) (Vega-Carrillo *et al* 2013), esta respuesta es dada por neutrón emitido, para determinar las cuentas por segundo por cada nano gramo de ^{252}Cf ; para el cálculo de la eficiencia de detección (Guzmán-García *et al* 2016) se asumió que la rapidez de emisión de neutrones del ^{252}Cf es de $2,430 \text{ n/seg}$ (Vega-Carrillo, 1988).

En los cálculos Monte Carlo la cantidad de historias fue suficiente para obtener un error estadístico menor al 3%; se utilizaron las secciones eficaces de la librería ENDF/B-VI. En los cálculos se incluyó el tratamiento $S(\alpha, \beta)$ para incluir el efecto del moderador para neutrones de bajas energías (Guzman-Garcia *et al.*, 2015).

3. RESULTADOS

En la Tabla 3, se muestra la respuesta de cada uno de los detectores en la posición indicada en la figura 3. Se nota que los detectores con mayor eficiencia son los más cercanos al suelo, en el N-15 plus C es el detector que se encuentra más retirado del suelo, esto se debe a la retro dispersión de los neutrones (Vega-Carrillo *et al* 2007). La suma total de las cps/ng ^{252}Cf en los tres detectores se acerca a las 2.5 cps/ng ^{252}Cf necesarias (Kouzes *et al* 2008) para ser considerado alternativa de reemplazo de los detectores de ^3He .

Tabla 3. Respuesta de los detectores de neutrones en un RPM ante fuentes de ^{252}Cf a 200cm

N-15 plus	cps/ng ^{252}Cf (Verticales)	cps/ng ^{252}Cf (horizontales)
N-15-A	0.82 ±0.04	0.81 ±0.04
N-15-B	0.86±0.05	0.85±0.05
N-15-C	0.71±0.04	0.70±0.04
TOTAL	2.39 ± 0.09	2.36 ± 0.09
	~2.5 cps/ng ^{252}Cf	~2.4 cps/ng ^{252}Cf

En la Tabla 4, se muestra la respuesta del detector nDetBrick, N-15 (fabricado), sin los cambios realizados en el N-15 plus en donde se observa que su valor total es más bajo y que se aleja más del resultado necesario para ser la geometría óptima de reemplazo a los detectores que hay instalados actualmente.

Tabla 3. Respuesta de los detectores de neutrones, N-15, nDetBrick, en un RPM ante fuentes de ^{252}Cf a 200cm

N-15 nDetBrick	cps/ng ^{252}Cf (Verticales)
N-15-A	0.73 ±0.04
N-15-B	0.77±0.05
N-15-C	0.63±0.04
TOTAL	2.13 ± 0.09
	~2.1 cps/ng ^{252}Cf

4. CONCLUSIONES

El nuevo sistema de detección de neutrones con detectores N-15 plus es una alternativa mejor que los detectores comerciales N-15, nDetBrick, pues con los cambios aplicados en el modelo se incrementa la eficiencia de detección y tres detectores alcanzan la eficiencia deseada de 2,5 cps/ng ^{252}Cf . El sistema RPMs con tres detectores N-15, nDetBrick (fabricado), tiene una respuesta de $\sim 2.13 \pm 0.09$ cps/ng ^{252}Cf y el sistema con tres detectores N-15 plus (modelado) tienen da una respuesta de $\sim 2.4 \pm 0.1$ cps/ng ^{252}Cf . Si se selecciona un modelo diferente con un mayor espesor de PMMA, como muestra la Tabla 1, se espera que la eficiencia aumente alcanzando en su totalidad la cantidad de 2.5 cps/ng ^{252}Cf , más sin embargo tomando en cuenta la incertidumbre ± 0.09 el sistema cumple la eficiencia deseada.

La orientación de los detectores en vertical u horizontal, no influye notablemente en los resultados de la eficiencia para el ^{252}Cf , pues en la posición vertical es de $\sim 2.39 \pm 0.1$ cps/ng y en la

posición horizontal es de $\sim 2.36 \pm 0.1$ cps/ng, sin embargo para optimizar el espacio ya existente en los RMP's es más adecuada la posición vertical.

Con esta configuración de los detectores, el espacio geométrico permite reemplazar por los detectores de ^3He por tres detectores N-15 plus, sin cambiar la estructura de los RPMs.

En los resultados de la Tabla 2, la eficiencia es mayor debido a que la fuente estaba a 100 cm del suelo, y este modelo la fuente se encuentra a 140 cm del suelo, y por ello la eficiencia por la retrodispersión de los neutrones es superior en la Tabla 2 que en la Tabla 4 (Vega-Carrillo *et al* 2007).

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. A Juan. C. Carmona por la ayuda prestada sobre la facilidad los datos de geometrías de los detectores de PVT.

REFERENCIAS.

- Bridgeport, 2013. *Neutron Detector System "nDetBrick" data sheet*. BridgePort Instruments LLC, Austin Texas USA.
- Guzmán-García, K.A., Méndez-Villafañe, Roberto., Vega-Carrillo, H.R., 2015. *Neutron field characteristics of Ciemat's Neutron Standards Laboratory*. Applied Radiation and Isotopes, **100**: 84-90
- Guzmán-García, K. A., Vega-Carrillo, H.R., Eduardo Gallego, Alfredo Lorente, Sviatoslav Ibañez-Fernandez, Juan Antonio Gonzalez, Sviatoslav Ibañez-Fernandez, 2016. *Study of a $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ neutron detector as an alternative to ^3He -based detectors in Homeland Security*. Applied Radiation and Isotopes, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.03.015>
- Guzmán-García, K.A., Vega-Carrillo, H.R., Eduardo Gallego, Alfredo Lorente, Juan A. Gonzalez, 2016. *Response of $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ as neutron detector in Radiation Portal Monitors*. 14th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), Practising Radiation Protection 9-13 May 2016. Cape Town South Africa.
- Guzmán-García, K.A., Vega-Carrillo, H.R., Eduardo Gallego, Juan Antonio Gonzalez, Alfredo Lorente, Sviatoslav Ibañez-Fernandez, 2016. *$^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ as an alternative to ^3He -based detectors for Radiation Portal Monitors*. 13th International Conference on Radiation Shielding & 19th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division, 3-6 October. Paris Francia.
- 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, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **584**: 383–400.
- Kouzes, R.T., 2009. *The ^3He Supply Problem*. Pacific Northwest National Laboratory PNNL-18388, 1–12.
- Kouzes RT, Ely JH, Stromswold DC, 2010. *Boron-Lined Straw-Tube Neutron Detector Test*. Pacific Northwest National Laboratory PNNL-19600, 1–20.
- Kouzes, R.T., Ely, J.H., Erikson, L.E., Kernan, W.J., Lintereur, A.T., Siciliani, E.R., Stephens, D.L., David C. Stromswold, R.M.V.G., 2010. *Neutron detection alternatives to ^3He for national security applications*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:

Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **623**: 1035–1045.

Pelowitz, Denise B., Fallgren, Andrew J. and McMath, Garret E., 2014. MCNP6™ User's Manual, Code Version 6.1, LA-CP-14-00745, Rev. 0, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico, June 2014.

Vega-Carrillo, H.R., 1988. *Medición del espectro de neutrones y rayos gamma de una fuente de californio 252 en un medio tejidoo-equivalente*. Revista Mexicana de Física, **34**: 25–31.

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

Vega-Carrillo, H.R., Barquero, R., Mercado, G.A., 2013. *Passive neutron area monitor with CR39*. International Journal of Radiation Research **11**, 149–153.