

Respuesta de dos líquidos centelladores ante neutrones y rayos gamma

Martha Isabel Escalona Llaguno¹, Héctor Rene Vega Carrillo^{1/2},
& Sergio M. Sarmiento-Rosales³.

¹Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas,
C. Ciprés 10, Fracc. La Peñuela. 98060 Zacatecas, Zac. México.

²Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas,
Av. Ramón López Velarde 801. Col. Centro. 98000 Zacatecas, Zac. México.

Resumen

Los centelladores Ultima Gold™ AB y Optiphase TriSafe, de Perkin Elmer y EG&G Company respectivamente, son dos líquidos que se comercializan como detectores de centelleo para mediciones de partículas alfa y beta. La interacción de estas partículas en los líquidos produce centelleos que permiten distinguir ambos tipos de partículas. Este trabajo se sustenta en la siguiente hipótesis: Los líquidos de centelleo Ultima Gold™ AB y Optiphase TriSafe detectan rayos gamma y neutrones mediante centelleos que producen los electrones liberados en la interacción de los rayos gamma con los detectores y la liberación de protones por neutrones que interactúan con el Hidrógeno, por lo tanto ambos centelladores se pueden usar como detectores de neutrones. En este trabajo se usaron embalajes de vidrio con bajo contenido de potasio que se llenaron con los dos tipos de líquido de centelleo que se acoplaron ópticamente a un tubo fotomultiplicador y se aislaron de la luz visible, los detectores se expusieron a rayos gamma del Cs-137, Mn-54, Na-22 y Co-60 y se obtuvo el espectro de altura de pulsos en un multicanal de 1024 canales, además se expusieron a los neutrones de una fuente de ²⁴¹AmBe a 50 y 25 cm. Los espectros de altura de pulsos de los rayos gamma se desplazan hacia canales mayores conforme a la energía de los fotones aumentan, sin embargo, la señal prácticamente desaparece al alcanzar el canal 350. Con la fuente de neutrones la respuesta de los líquidos centelladores llega hasta el canal 1024, por lo que la señal neta de neutrones se observa del canal 351 al canal 1024. La respuesta de ambos centelladores es similar y permite distinguir fotones de neutrones simplemente analizando los espectros de altura de pulsos en el multicanal.

Palabras clave: Centelladores; Líquido; Detectores; Neutrones; Gammas.

1.- INTRODUCCIÓN

La radiación es una manifestación de energía en movimiento, cuando la radiación es ionizante e interactúa con los átomos de un medio, provoca excitación de moléculas y átomos y su ionización [Knoll, 2010].

Los neutrones son nucleones que no tienen carga eléctrica y fuera del núcleo atómico son inestables. Los neutrones, se producen en forma artificial en actividades antropogénicas, así como en forma natural, principalmente durante la interacción de los rayos cósmicos con los núcleos de la atmósfera del planeta, también se producen en las reacciones nucleares que en las descargas atmosféricas, así como en reacciones nucleares entre las partículas alfa y los núcleos de la tierra [Vega-Carrillo, 2014].

Al interactuar con la materia los neutrones depositan su energía de diferentes maneras, algunas de éstas generan partículas cargadas secundarias las cuales adquieren espectros de energía complejos; algunos otros mecanismos de interacción producen fotones. Debido a su eficacia radiobiológica, y a la forma en que interactúan con la materia, es importante determinar, mediante cálculos y/o mediciones, el espectro de neutrones [McDonald, 2002]. Los centelladores orgánicos, son hechos de materiales centelladores disueltos en un solvente base se fabrican en soluciones líquidas o en matrices poliméricas, dando lugar a los centelladores plásticos y líquidos. Este tipo de centelladores son hidrocarburos aromáticos con átomos de Carbono ligados entre sí en forma de anillo, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Los más utilizados son el PTP ($C_{18}H_{14}$), B-PBD ($C_{24}H_{22}N_{20}$), PPO ($C_{15}H_{11}NO$) y POPOP ($C_{24}H_{16}N_2O_2$) y en promedio su número atómico varía de 3.5 a 5. Estos centelladores se forman mezclando dos de estos compuestos, en donde uno de ellos es el centellador primario y el otro el denominado “*wavelength shifter*”. El primero, del orden de 20 veces más concentrado que el segundo, posee emisión en el espectro UV (300-370 nm). El segundo, absorbe los fotones UV y los remite en longitudes de onda más largas, lo cual puede ser deseable por dos motivos: para ajustar los fotones con la respuesta espectral del fotocátodo y para disminuir la absorción de estos fotones por el mismo centellador [Lazar, 2017, Knoll, 2010].

Los neutrones se usan en diversos ámbitos donde es fundamental contar con un método de medición. En función a su uso, la detección de neutrones se aplica en Ciencia básica (que implica plantear y contestar preguntas de investigación), Fusión, Fisión, Materiales nucleares especiales, Dosimetría y Caracterización de materiales [Peurrung, 2000].

La necesidad de medir neutrones ha propiciado la innovación en la detección de neutrones al usar contadores proporcionales de $^{10}\text{BF}_3$, donde el ^{10}B se agrega en aerosol de nano partículas [Amaro et al. 2017]. Detectores de ^3He moderados con polietileno de alta densidad se usan para medir los neutrones que se producen en el decaimiento β retardado neutrón o emisión β -n, con el fin de tener evidencia que soporte ciertas teorías de la astrofísica relacionadas con la abundancia de los isótopos [Tain et al., 2018].

Con el fin de detectar la materia oscura se han diseñado diferentes experimentos donde los detectores son de gran tamaño. En el caso del sistema DarkSide-50 consta de 30 toneladas de centellador líquido donde se suprime las señales de fondo de origen terrestre y cósmico [Agnes et al 2017].

El conocer el flujo y la distribución de energía de los neutrones es importante en su uso como fuente de neutrones para reactores nucleares de sal fundida [Zhirkin et al., 2017]. También, durante la calibración y el análisis neutrónico de experimentos de plasma con deuterio es importante contar con métodos para medir neutrones [Nishitani et al., 2018]. En fusión con reacciones con deuterio se usan cámaras de U^{235} para monitorear el flujo de neutrones, espectrómetros con centelladores de Estilbeno para determinar el espectro de neutrones y para calibrar estos detectores se usa una fuente de Cf^{252} [Nishitani, Ogawa & Isobe 2017]. En ciertos experimentos con fusión, la fluencia de neutrones suele ser del orden de 10^{14} n/cm² y es necesario buscar detectores que soporten esta intensidad de radiación [Liu et al., 2017].

A pesar de ser una disciplina madura, en la fisión nuclear es siempre importante la detección de neutrones, Devlin et al. [2018] reportaron mediciones actualizadas de neutrones rápidos producidos en reacciones $\text{U}^{235}(\text{n}, \text{f})$ inducidos con neutrones de 0.7 a 20 MeV. El espectro

de los neutrones pronto los midieron de 10 keV a 2.5 MeV mediante centelladores de ^6LiI y técnicas de vuelo. Zhu et al. [2017] usaron centelladores de gas de ^4He para la detección de neutrones producidos durante la fisión nuclear de muestras de Uranio natural que fueron bombardeadas con neutrones de 2.45 MeV producidos en reacciones deuterio-deuterio.

En problemas asociados con la seguridad nuclear como el control y tráfico de materiales para fabricar armas de destrucción masiva (conocidos como Materiales Nucleares Especiales), la caracterización de residuos transuránicos, en salvaguardias y en la descontaminación y desmantelamiento de instalaciones nucleares es importante la medición de neutrones. En puertos, aduanas y puntos de acceso de varios países se usan detectores tipo portátil con detectores proporcionales de He^3 ; sin embargo su escasez a nivel mundial ha propiciado la necesidad de buscar nuevas opciones de detección, así Guzmán-García et al. [2017] caracterizaron el desempeño de centelladores de $\text{ZnS}(\text{Ag})$ y B^{10} y determinaron su respuesta ante neutrones producidos por fuentes de $^{241}\text{AmBe}$ y ^{252}Cf [Guzmán-García et al. 2016]. Los acuerdos sobre el control de armas nucleares requieren de procedimientos de inspección donde se usan detectores de neutrones como los basados en detectores de burbujas [D'Errico et al., 2018].

La dosimetría personal de neutrones enfrenta varios retos ya que existe una fuerte dependencia entre la distribución angular y en energía de los neutrones con los coeficientes de conversión de fluencia a dosis. La necesidad de sortear estas dificultades motivan a la búsqueda de nuevas soluciones, como usar un detector de neutrones térmicos de ^3He desnudo y en combinación con dos moderadores esféricos de 3 y 9 pulgadas de diámetro con el fin de medir la zona de los neutrones térmicos, epitérmicos y rápidos dentro de plantas nucleares [Hoey et al., 2018]. En torno a aceleradores lineales de uso médico (LINACs) se han usado diodos de silicio tipo P-I-N para verificar la dosis debida a los fotoneutrones [Gracanin et al., 2017].

En la última década se han desarrollado detectores de neutrones para usarse en diferentes condiciones (Mor et al., 2017). El uso de centelladores líquidos, cuando se construyen de gran tamaño tienen el inconveniente de fugas del líquido, existen riesgos químicos en su

manejo y su toxicidad, entre otros; la mayoría de estas dificultades se eliminan si se usan centelladores plásticos como el EJ-299-33A [Roy et al., 2018].

Comercialmente existen varios tipos de líquidos centelladores, como el líquido centellador Ultima Gold AB y el líquido centellador Optiphase Trisafe; éstos son muy conocidos en el área de investigación para la detección de betas y alfas, se utilizan más de manera rutinaria, para hacer mediciones de muestras ambientales. Con el fin de optimizar la determinación rápida de ^3H en muestras acuosas se usó el líquido centellador Ultima Gold AB [Pujol & Sanchez-Cabeza, 1999]. Este centellador se usó para determinar la concentración de Po-210, que es radiotóxico, en tabaco de la India [Srivastava, 2018]. Broda [2002] estudió la influencia de la composición del cocktail en la estandarización de radionúclidos. Así también, se usaron varios centelladores para determinar su respuesta ante $^3\text{H}/^{14}\text{C}$ [Verrezem, Loots & Hurtgen, 2008]. Otro tipo de centelladores líquidos comerciales se usan para medir radium/radón [Bhade *et al.*, 2018], así como en el área de biomateriales [Kafa, 2015].

Los líquidos centelladores Ultima Gold AB y Optiphase Trisafe se comercializan y se promueven para la detección de partículas alfa y beta. En este uso la muestra se disuelve en el líquido. Así, si la muestra emite partículas alfa, su energía se deposita en el centellador y en este proceso produce ionizaciones y excitaciones que provocan la excitación del centellador que al regresar a su estado basal emite centelleos que son medidos y se correlacionan con la concentración del emisor alfa o la actividad.

Con base en la composición de los centelladores líquidos Ultima Gold AB y Optiphase Trisafe y de los mecanismos de interacción de la radiación con la materia planteamos la siguiente hipótesis:

Los centelladores líquidos Ultima Gold AB y Optiphase Trisafe tienen baja densidad, de tal forma que al incidir sobre ellos rayos gamma van a ionizar la materia dejando a las moléculas del centellador en un estado de excitación, al descender a su estado basal el exceso de energía lo emiten mediante centelleos que son transformados en pulsos de corriente en el tubo fotomultiplicador que se convierten en pulsos de voltaje. Estos pulsos de voltaje se

distribuyen, por su altura, en un espectro de altura de pulsos en un analizador multicanal. Por su baja densidad el espectro de altura de pulsos no tendrá el fotopico, pero si se podrá apreciar el borde Compton que se desplazará hacia mayores canales, conforme la energía del fotón aumente. Por su alta concentración de átomos de hidrógeno, ambos centelladores se pueden usar para detectar neutrones mediante la reacción $H(n, p)$, donde la energía es transferida al protón del núcleo del H que al transportarse dentro del líquido (por tener carga eléctrica) provoca ionizaciones y excitaciones del centellador y el espectro de altura de pulsos será distinto al producido en la interacción de los rayos gamma con el centellador. Esta diferencia en el espectro de altura de pulsos permite usar a los centelladores Ultima Gold AB y Optiphase Trisafe como detectores de rayos γ y neutrones.

El objetivo de este trabajo es determinar la respuesta ante rayos gamma y neutrones de dos centelladores orgánicos que se comercializan como detectores de partículas beta y alfa.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio usamos dos líquidos de centelleo promovidos comercialmente como detectores de alfas y betas. Estos detectores son Ultima GoldTM AB y Optiphase TriSafe, el primero es de la empresa PerkinElmer y el segundo es de la empresa EG&G company.

Ambos líquidos centelladores son compuestos orgánicos cuyo contenido de carbón e hidrogeno es alto, por lo tanto debería de detectar rayos gamma mediante la excitación que producen los electrones liberados en el centellador y detectar neutrones mediante la excitación que producen los protones liberados en la interacción de los neutrones con el hidrogeno de la misma manera en que las partículas alfas inducen centelleos.

Con el fin de determinar la respuesta de ambos centelladores ante gammas y neutrones se prepararon dos contenedores de 25 ml, uno con cada líquido centellador. Los contenedores

son de vidrio con bajo contenido de potasio, dado que el potasio absorbe el tipo de luz que es emitida por el líquido centellador.

El contenedor se acopló ópticamente a un tubo fotomultiplicador de la marca Dupont modelo 6292. El fototubo se conectó a una base EG&G Ortec modelo 296, que permite extraer la señal y aplicarle un alto voltaje al tubo fotomultiplicador. Dado que el tubo fotomultiplicador es muy sensible a la luz visible, el vial con el centellador, el tubo fotomultiplicador y la base se cubrieron con plástico color negro, como se muestra en la figura 1.



(a)

(b)

(c)

Figura 1.- (a) Vial con el centellador acoplado al TFM. (b) Protección contra la luz visible. (c) Medición de la respuesta ante gammas del Co-60.

La señal de salida de la base se pasó por un amplificador espectroscópico Ortec modelo 572 y ésta se introdujo en un analizador multicanal. Las respuesta ante rayos gamma se hizo colocando fuentes gamma sobre el detector, como se muestra en la figura 1 (c). Las fuentes usadas fueron Cs-137, Co-60, Mn-54, Na-22 de la marca Eckert & Ziegler Isotope Products.

Estas fuentes se calibraron el 15 de noviembre del 2015 y sus actividades iniciales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.- datos de las fuentes de radiación gamma

Fuentes	Actividad inicial [μ Ci]
Cs137	1.052 \pm 3%
Mn54	1.082 \pm 3%
Na22	0.964 \pm 3%
Co60	1.048 \pm 3%

Para cada una de estas fuentes se obtuvo un espectro de altura de pulsos en el multicanal usando 1024 canales.

Para determinar la respuesta del detector a los neutrones se utilizó una fuente de 241 Americio-Berilio de 3.7×10^9 Bq. Las mediciones del espectro de altura de pulsos de la fuente de neutrones se hicieron a 25 cm y 50 cm de distancia del detector, procurando tener los centros geométricos de la fuente y el detector en la misma altura. Tanto las mediciones con las fuentes de rayos gamma y la fuente de neutrones se realizó para un tiempo vivo de 1800 segundos. Se midió la radiación de fondo con cada líquido centellador acumulando el espectro de altura de pulsos. El primer grupo de mediciones se hizo con los contenedores de los líquidos centelladores sin reflector, con el fin de aumentar la eficiencia de detección, se pintaron los contenedores por la parte externa con barniz de color blanco y se repitió el proceso de medición para fondo, gammas y neutrones.

3.- RESULTADOS

En la figura 2 se muestran los espectros de altura de pulsos del fondo, las fuentes gamma de Cs-137, Mn-54, Na-22 y Co-60, la fuente de neutrones de 241 AmBe, a 25 y 50 cm de distancia, de los centelladores Ultima Gold AB y Optiphase Trisafe sin reflector. En la figura 3 se muestran los espectros de altura de pulsos, del fondo, gammas y neutrones, de los centelladores con reflector

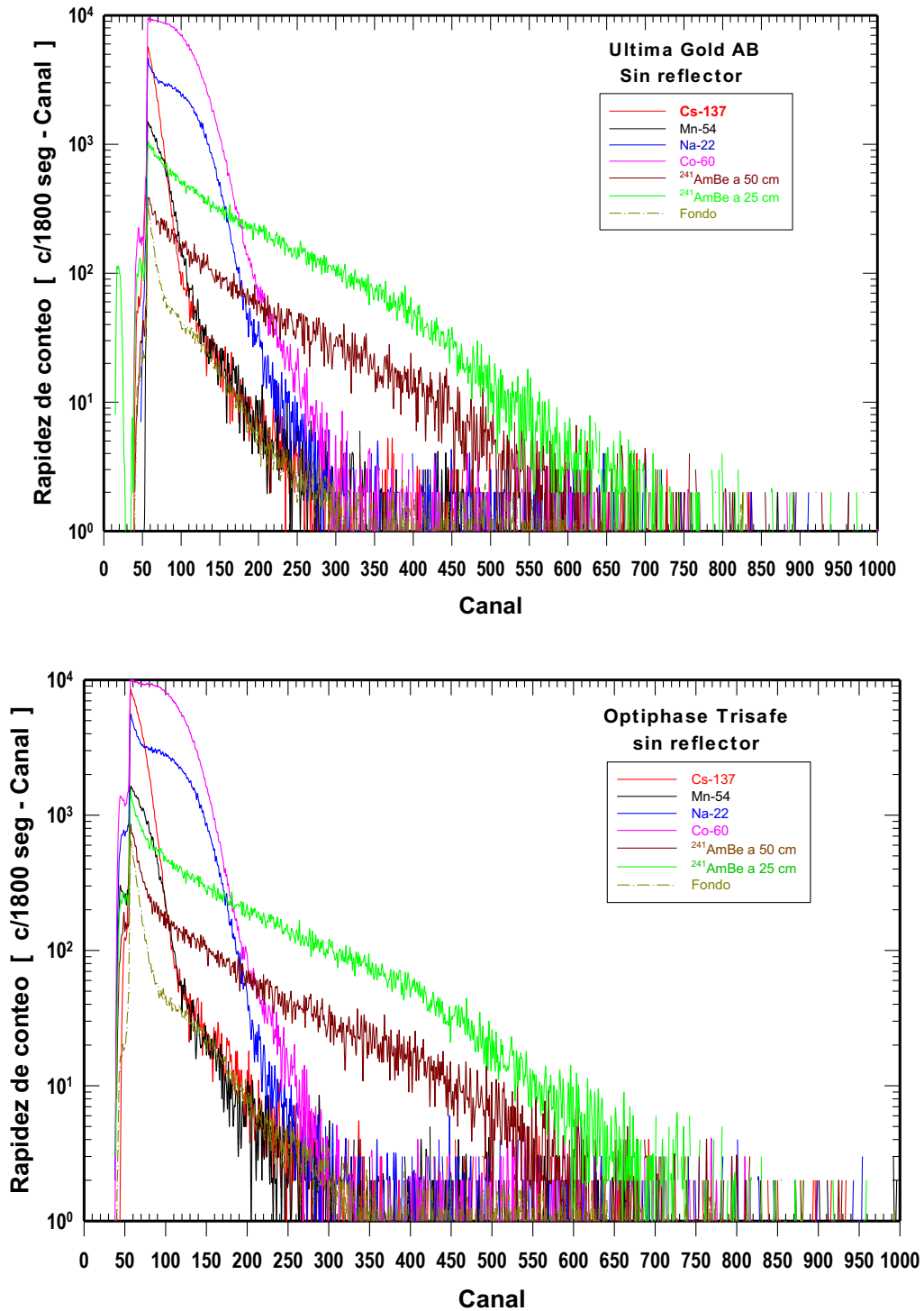


Figura 2.- Espectros de altura de pulsos de los centelladores Ultima Gold AB y el Optiphase Trisafe sin reflector para gammas neutrones y el fondo.

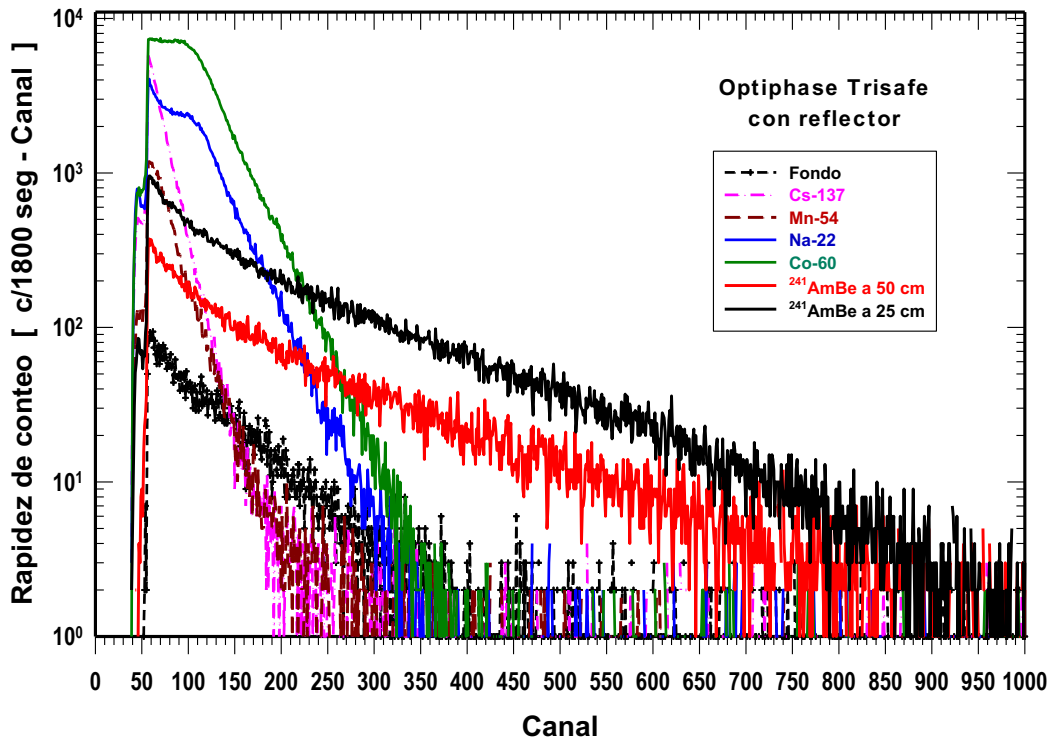
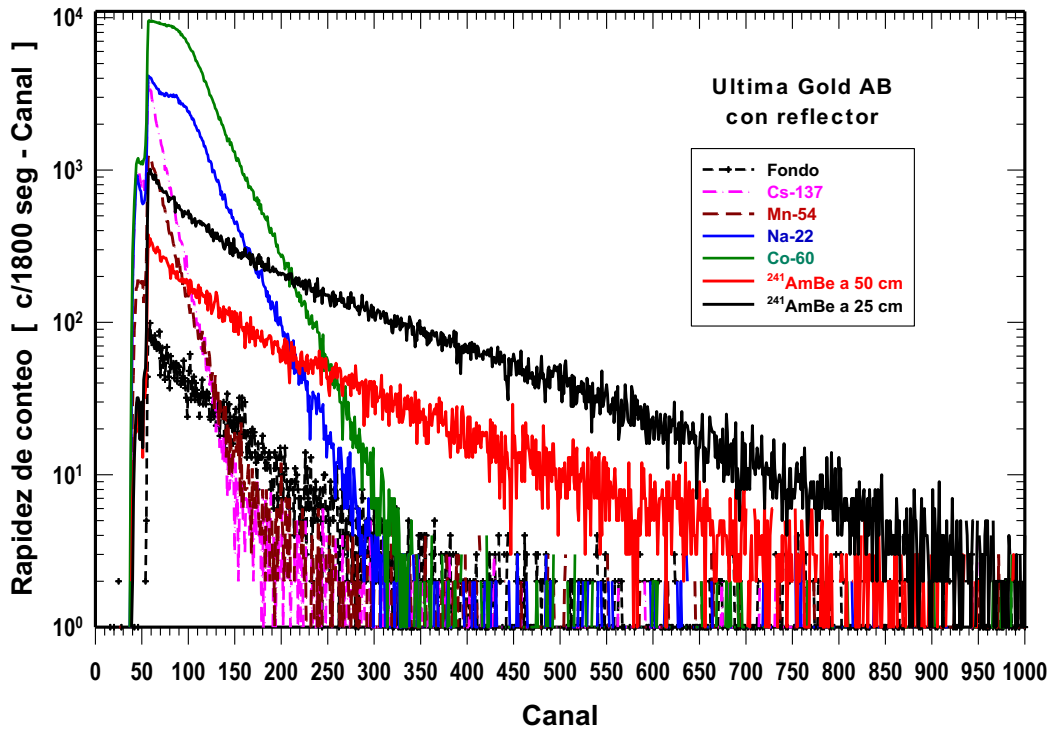


Figura 3.- Espectros de altura de pulsos de los centelladores Ultima Gold AB y el Optiphase Trisafe con reflector para gammas neutrones y el fondo.

4.- DISCUSIÓN

En las figuras 2 y 3 se muestran los espectros de altura de pulsos para ambos centelladores, con y sin reflector, para el fondo, rayos gamma y neutrones.

En las figuras se puede ver individualmente la respuesta de cada centellador líquido, donde sin importar la ausencia o presencia del reflector se observa que para el caso de las fuentes gamma el borde Compton se desplaza hacia la derecha conforme aumenta la energía del rayo gamma.

En el caso de las respuestas ante neutrones, en ambos casos el espectro de altura de pulsos es mayor cuando la fuente está a 25 cm que cuando está a 50 cm. Esto se debe a que el flujo de neutrones a 25 cm es mayor que el flujo de neutrones a 50 cm de distancia.

La respuesta de los centelladores para gammas es diferente que la respuesta para neutrones. Esto se debe a que la interacción de los rayos gamma es principalmente con los electrones de los centelladores, mientras que la interacción con neutrones ocurre con el hidrógeno de ambos centelladores.

El fotón gamma de mayor energía es de 1.33 MeV del Co-60, ambas respuesta se observa después del canal 500 la señal debida a las fuentes gamma es prácticamente nula ya que coincide con las cuentas debidas al fondo.

Al comparar las respuestas para gammas y neutrones de ambos detectores sin y con reflector se pudo observar la cuentas medidas sin reflector son menores a las que se obtienen con reflector para ambos centelladores. Observando la respuesta de ambos centelladores ante neutrones se observa que el Optiphase Trisafe tiene mejor respuesta que el líquido centellador Ultima Gold AB.

Los resultados de la respuesta ante neutrones mostrados en las figuras 2 y 3 son consistentes con los reportados por Wang [2008] para un medidor rem de neutrones que usa gas encerrado en un contenedor de tejido equivalente o TEPEC.

Las respuestas ante los neutrones del $^{241}\text{AmBe}$ de ambos centelladores son semejantes a los espectros de altura de pulsos reportados por Becchetti [2016], a pesar que ellos usaron centelladores C6D6; NE230,BC537 y EJ315 que son centelladores plásticos, y un centellador orgánico en estado líquido de Xileno deuterado (C8D10; EJ301D). Las respuestas de ambos centelladores ante neutrones son parecidos a los reportados por Roy [2018]. Este grupo reportó las propiedades del PSP para neutrones casi monoenergéticos y determinó la eficiencia en la detección de neutrones del centellador plástico EJ-299-33 y del líquido centellador BC501A.

5.- CONCLUSIONES

En este trabajo se midieron las respuestas ante gammas y neutrones de los dos líquidos centelladores orgánicos, Ultima Gold AB y Optiphase Trisafe, comercializados para medir partículas beta y alfa.

Los dos líquidos centelladores orgánicos Ultima Gold AB y Optiphase Trisafe, además de medir partículas beta y alfa también se pueden usar para medir rayos gamma y neutrones. El espectro de altura de pulsos de los rayos gamma en el multicanal presenta el borde Compton que se desplaza hacia la derecha conforme la energía del fotón incidente aumenta.

La razón de cambio del espectro de altura de pulsos de los neutrones en el multicanal con respecto al número de canal es mucho menor que el observado con rayos gamma. La diferencia entre los espectros de altura de pulsos de gamma y neutrones en el multicanal permite distinguir entre ambos tipos de partículas.

El centellador Optiphase Trisafe tiene mejor respuesta que el Ultima Gold AB.

El uso del reflector mejora la eficiencia de los centelladores cuando se exponen a gammas y neutrones.

Una limitante de este trabajo fue determinar las eficiencias de detección para gammas y neutrones, así como determinar si existe una correlación lineal entre la respuesta y el flujo de gamma y neutrones.

Agradecimientos

Agradecemos COZCyT por su apoyo otorgado para la participación de diferentes congresos. Los autores Martha Isabel Escalona Llaguno y Sergio M Sarmiento Rosales agradecemos al CONACyT por la beca para realizar estudios de posgrado.

REFERENCIAS

Agnes, P., Albuquerque, I.F.M., Alexander, T., Alton, A.K., Asner, D.M., Back, H.O., Baldin, B., Biery, K., Bocci, V., Bonfini, G., Bonivento, W., Bossa, M., Bottino, B., Brigatti, A., Brodsky, J., Budano, F., Bussino, S., Cadeddu, M., Cadonati, L., Cadoni, M., Calaprice, F., Canci, N., Candela, A., Caravati, M., Cariello, M., Carlini, M., Catalanotti, S., Cavalcante, P., Chepurinov, A., Cicalo, C., Cocco, A.G., Covone, G., D'Angelo, D., D'Incecco, M., Davini, S., De Cecco, S., De Deo, M., De Vincenzi, M., Derbin, A., Devoto, A., Di Eusanio, F., Di Pertro, G., Dionisi, C., Edkins, E., Empl, A., Fan, A., Fiorillo, G., Fomenko, K., Forster, G., Franco, D., Gabriele, F., Galviati, C., Giagu, S., Giganti, C., Giovanetti, G.K., Goretti, A.M., Granato, F., Grandi, L., Gromov, M., Guan, M., Guardincerri, Y., Hackett, B.R., Herner, K., Hughes, D., Humble, P., Hungerford, E.V., Ianni, A.I., Ianni, A., James, I., Johnson, T.N., Jollet, C., Keeter, K., Kendziora, C.L., Koh, G., Korablev, D., Korga, G., Kubankin, A., Li, X., Lissia, M., Loer, B., Lombardi, P., Longo, G., Ma Y., Machado, A.A., Machulin, I.N., Mandarano, A., Mari, S.M., Maricic, J., Marini, L., Martoff, C.J., Meregaglia, A., Meyers, P.D., Milincic, R., Miller, J.D., Montanari, D., Monte, A., Mount, B.J., Muratova, V.N., Musico, P., Napolitano, J., Navrer Agasson, A., Odrowski, S., Orsini, M., Ortica, F., Pagani, L., Pallavicini, M., Pantic, E., Parmeggiano, S., Pelczar, K., Pelliccia, M., Pocar, A., Pordes, S., Pugachev, D.A., Qian, H., Randle, K., Ranucci, G., Razeti, M., Razeto, A., Reinhold, B., Renshaw, A.L., Rescigno, M., Riffard, Q., Romani, A., Rossi, B., Rossi, N., Rountree, D., Sablone, D., Saggese, P., Saldanha, R., Sands, W., Savarese, C., Schlitzer, B., Segreto, E., Semenov, D.A., Shields, E., Singh, P.N., Skorokhvatov, M.D., Smirnov, O., Sotnikov, A., Stanford, C., Suvorov, Y., Tartaglia, R., Tatarowicz, J., Testera, G., Tonazzo, A., Trinchese, P., Unzhakov, E.V., Verducci, M., Vishneva, A., Vogelaar, B., Wada, M., Walker, S., Wang, H., Wang,

- Y., Watson, A.W., Westerdale, S., Wilhelmi, J., Wojcik, M.M., Xiang, Xi, Xiao, X., Xu, J., Yang, C., Zec, A., Zhong, W., Zhu, C., Zuzei, G. (2017). *CALIS-A CALibration Insertion System for the DarkSide-50 dark matter search experiment*. Journal of Instrumentation **12**: T12004 (18pp).
- Amaro, F.D., Monteiro, C.M.B., dos Santos, J.M.F., Antognini, A. (2017). *Novel concept for neutron detection: proportional counter filled with ^{10}B nanoparticle aerosol*. Scientific Reports **7**: 41699 (6pp).
- Becchetti, F.D., Raymond, R.S., Torres-Isea, R.O., Di Fulvio, A., Clarke, S.D., Pozzi, S.A. & Febraro, M., (2016). *Deuterated-xylene (xylene-d 10; EJ301D): A new, improved deuterated liquid scintillator for neutron energy measurements without time-of-flight*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **820**: 112-120.
- Bhade, S.P.D., Reddy, P.J., Anilkumar, S., Singhal, R.K. & Rao, D.D. (2018). *Calibration and optimization of alpha-beta separation procedures for determination of radium/radon in single-and two-phase liquid scintillation systems*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **315**: 13-20.
- Broda, R., Maletka, K., Terlikowska, T. and Cassette, P., 2002. *Study of the influence of the LS-cocktail composition for the standardisation of radionuclides using the TDCR model*. Applied Radiation and Isotopes **56**: 285-289.
- D'Errico, F., Chierici, A., Gattas-Sethi, M., Goldston, R., Glaser, A. (2018). *New developments and applications of Superheated emulsions: Warhead verification and Special nuclear material interdiction*. Radiation Protection Dosimetry **180**: 210-214.
- Devlin, M.J., Gomez, J.A., Kelly, K.J., Haight, R.C., O'Donnell, J.M., Taddeucci, T.N., Lee, H.Y., Mosby, S.M., Perdue, B.A., Fotiadis, N. and Ullmann, J.L., (2018). *The Prompt fission neutron spectrum of ^{235}U (n, f) below 2.5 MeV for incident neutrons from 0.7 to 20 MeV*. Nuclear Data Sheets **148**: 322-337
- Gracanin, V., Guatelli, S., Cutajar, D., Cornelius, I., Tran, L.T., Bolst, D., Preston, R., Gupta, R., Yuen, J., Petasecca, M., Lerch, M., Prevertaylo, V., Rosenfeld, A. (2017). *A convenient verification method of the entrance photo-neutron dose for an 18 MV medical linac using silicon P-I-N diodes*. Radiation Measurements **106**: 391-398.
- Guzmán-García, K.A., Vega-Carrillo, H.R., Gallego, E., González, J.A., Méndez, R., Lorente, A., Ibañez-Fernandez, S. (2017). *Performance of $^{10}\text{B}+\text{ZnS}(\text{Ag})$ neutron detection in RPM for the detection of Special Nuclear Material*. Radiation Measurements **107**: 58-66.
- Guzmán-García, K.A., Vega-Carrillo, H.R., Gallego, E., Lorente, A., Méndez-Villafañe, R., González, J.A., Ibañez-Fernandez, S. (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 **117**: 58-64.

- Hoey, O.V., Vanhavere, F., Verbraeken, L. (2018). *Development, characterization and testing of a simplified Bonner sphere system for rapid neutron field characterization*. Radiation Protection Dosimetry **180**: 85-88.
- Kafa, H., Wang, J.T.W., Rubio, N., Venner, K., Anderson, G., Pach, E., Ballesteros, B., Preston, J.E., Abbott, N.J. and Al-Jamal, K.T., (2015). *The interaction of carbon nanotubes with an in vitro blood-brain barrier model and mouse brain in vivo*. Biomaterials **53**: 437-452.
- Knoll, G.F. (2010). *RADIATION DETECTION AND MEASUREMENT*. John Wiley & Sons.
- Lazar, H. (2017). *The Atlas tile calorimeter experience with 10,000 readout photomultipliers operating since the start of the p-p collisions at LHC*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **912**: 248-251.
- Liu, L., Liu, A., Bai, S., Lv, L., Jin, P. & Ouyang, X. (2017). *Radiation resistance of Silicon carbide Schottky diode detectors in D-T fusion neutron detection*. Scientific Reports **7**: 13376 (8pp).
- McDonald, J.C., Siebert, B.R.L. and Alberts, W.G. (2002). *Neutron spectrometry for radiation protection purposes*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A **476**: 347-352.
- Mor, I., Vartsky, D., Dangendorf, V., Tittelmeier, K., Goldberg, M.B., Bar, D., Brandis, M. (2017). *Automatic detection of recoil proton tracks and background rejection in liquid scintillator-micro-capillary-array fast neutron spectrometer*. Journal of Instrumentation **12**: C12022 (10pp.)
- Nishitani, T., Ogawa, K., Isobe, M. (2017). *Monte Carlo simulation of the neutron measurements for the large helical device deuterium experiments*. Fusion Engineering and Design **123**: 1020-1024.
- Nishitani, T., Ogawa, K., Isobe, M., Kawase, H., Pu, N., Kashchuk, Y., Krasilnikov, V., Jo, J., Cheon, M., Tanaka, T. and Yoshihashi, S., (2018). *Calibration experiment and the neutronics analyses on the LHD neutron flux monitors for the deuterium plasma experiment*. Fusion Engineering and Design **136**: 210-214.
- Peurrung, A.J. (2000). *Recent developments in neutron detection*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **443**: 400-415.
- Pujol Ll & Sanchez-Cabeza, J.A. (1999). *Optimisation of liquid scintillation counting conditions for rapid tritium determination in aqueous samples*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **242**: 391-398.
- Roy, P., Banerjee, K., Saha, A.K., Bhattacharya, C., Meena, J.K., Bhaskar, P., Mukhopadhyay, S., Bhattacharya, S. (2018). *Detailed investigation on the possibility of using EJ-299-33A plastic scintillator for fast neutron spectroscopy in large scale experiments*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **901**: 198-202.

- Srivastava, A., Tuli, V. & Scherer, U.W. (2018). *Study of radiotoxic ^{210}Po in Indian tobacco using liquid scintillation spectrometry*. Radiochimica Acta **106**: 787-792.
- Tain, J.L., Agramunt, J., Ahn, D.S., Algora, A., Allmond, J.M., Baba, H., Bae, S., Brewer, N.T., Caballero Folch, R., Calvino, F., ColemanSmith, P.J., Cortes, G., Davinson, T., Dillmann, I., Domingo-Pardo, C., Estrade, A., Fukuda, N., Go, S., Griffin, C., Grzywacz, R., Ha, J., Hall, O., Harkness-Brennan, L., Isobe, T., Kahl, D., Karny, M., Kiss, G.G., Kogimtzis, M., Korgul, A., Kubono, S., Labiche, M., Lazarus, I., Lee, H.C.J., LIU, J., Lorusso, G., Matsui, K., Miernik, K., Montes, F., Moon, B., Morales, A.I., Nepal, N., Nishimura, S., Page, R.D., Podolyak, Z., Pucknell, V.F.E., Rasco, B.C., Regan, P.H., Riego, A., Rubio, B., Rykaczewski, K.P., Saito, Y., Sakurai, H., Shimizu, Y., Simpson, J., Söderström, P.A., Stracener, D.W., Sumikama, T., Surman, R., Suzuki, H., Takechi, M., Takeda, H., Tarifeno-Saldivia, A., Thomas, S.L., Tolosa-Delgado, A., Phong, V.H., Woods, P. (2018). *The BRIKEN project: Extensive measurements of b-delayed neutron emitters for the Astrophysical r process*. Acta Physica Polonica B **49**: 417-428.
- Vega-Carrillo, H.R., Hernández-Dávila, V.M., Rivera, T. and Sánchez, A. (2014). *Nuclear and dosimetric features of an isotopic neutron source*. Radiation Physics and Chemistry **95**: 122-124.
- Verrezen, F., Loots, H. & Hurtgen, C. (2008). *A performance comparison of nine selected liquid scintillation cocktails*. Applied Radiation and Isotopes **66**: 1038-1042.
- Wang, C.C., Seidaliev, M. and Mandapaka, A. (2008). *Development and test of a GEM-based TEPC for neutron protection dosimetry*. Health Physics **94**: 440-448.
- Zhirkin, A.V., Alekseev, P.N., Batyaev, V.F., Gurevich, M.I., Dudnikov, A.A., Kuteev, B.V., Pavlov, K.V., Titarenko, Yu.E., Titarenko, A.Yu. (2017). *Fusion neutron source blanket: requirements for calculation accuracy and benchmark experiment precision*. Nuclear Fusion **57**: 066044 (11pp).
- Zhu, T., Liang, Y., Rolison, L., Barker, C., Lewis, J., Gokhale, S., Chandra, R., Kiff, S., Chung, H., Ray, H., Baciak, J.E., Enqvist, A., Jordan, K.A. (2017). *Improved fission neutron energy discrimination with ^4He detectors through pulse filtering*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **848**: 137-143.