



TONANTZINTLA, PUEBLA, MEXICO

## MONITOR DE ÁREA PASIVO PARA LA MEDICIÓN DE LA $H^*(10)$ EN ACELERADORES LINEALES PARA RADIOTERAPIA

Héctor René Vega-Carrillo

Unidad Académica de Estudios Nucleares, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, Zac.,  
[fermineutron@yahoo.com.mx](mailto:fermineutron@yahoo.com.mx)

### RESUMEN:

Cuando los aceleradores lineales operan con voltajes superiores a los 7 MV, en forma inherente se producen neutrones en el cabezal del acelerador, los componentes del búnker y el cuerpo del paciente. Estos neutrones depositan una dosis indeseada en el paciente y debido a los mecanismos de interacción con la materia, su presencia representa un problema de protección radiológica para la instalación. Una magnitud dosimétrica que se usa para estimar el riesgo que representa la presencia de los neutrones es la dosis equivalente ambiental,  $H^*(10)$ . En el mercado internacional hay monitores diseñados para medir esta magnitud sin embargo en su diseño usan detectores activos que no son útiles para medir la  $H^*(10)$  dentro del búnker. En este trabajo se presenta el diseño de un monitor de área pasivo que puede usar pares de dosímetros termoluminiscentes, laminillas de activación o detectores de trazas. La respuesta del monitor, ante fuentes monoenergéticas de neutrones se realizó mediante métodos Monte Carlo donde el monitor se modeló como un cilindro de polietileno de  $0.92 \text{ g/cm}^3$  de densidad, donde se calculó la fluencia de neutrones, la cantidad de reacciones nucleares y la  $H^*(10)$ . El monitor se construyó con un cilindro móvil que se inserta a lo largo del eje axial del moderador de polietileno; el cilindro permite colocar cualquier detector pasivo de neutrones que al insertarse en el moderador ubica al detector en el centro del moderador. El monitor, con pares de dosímetros termoluminiscentes como detector pasivo de neutrones, se calibró con una fuente desnuda y moderada de  $^{241}\text{AmBe}$  y el espectro de neutrones del haz radial del reactor TRIGA Mark III del ININ. El desempeño del moderador se probó con un acelerador lineal para radioterapia Varian iX de 15 MV y el valor de la  $H^*(10)$  obtenido con un espectrómetro de esferas Bonner.

### 1. INTRODUCCIÓN

El interés por determinar diferentes magnitudes relacionadas con los neutrones en diferentes emplazamientos se ha incrementado en la última década. Cuando el interés es la protección radiológica entidades como el flujo total de neutrones, la energía promedio, el espectro de neutrones o magnitudes dosimétricas asociadas se determinan a través de cálculos o mediciones. Debido a su ausencia de carga eléctrica la medición de neutrones no es una tarea trivial, que se complica en situaciones donde la cantidad de neutrones es pequeña como el caso de puntos detrás de blindajes de considerable espesor, dentro de laboratorios subterráneos o en el ambiente la medición se complica debido a que se requieren de largos tiempos de medición para alcanzar buena estadística<sup>[1-3]</sup>, o en zonas donde el campo de radiación es mixto, intenso y pulsado, como en puntos “calientes” en torno a reactores nucleares o aceleradores de partículas usadas en la investigación o en la medicina<sup>[4-5]</sup>, donde los instrumentos con detectores activos presentan largos tiempos muertos y apilamiento de pulsos<sup>[6-12]</sup>. En situaciones prácticas la dosis debida a los neutrones se mide usando un monitor de área que consiste en un detector activo rodeado por un material moderador, estos dispositivos permiten obtener un valor de dosis en tiempo real, sin embargo requieren de una fuente de energía constante lo que complica su uso en zonas donde la cantidad de neutrones es pequeña. Debido a que tienen un detector activo su uso no es confiable



## TONANTZINTLA, PUEBLA, MEXICO

en torno a ciclotrones, reactores o aceleradores lineales de uso médico (LINACs) debido al tiempo muerto y el apilamiento de pulsos. Para resolver esta dificultad el detector activo ha sido sustituido por un detector pasivo<sup>[13,14]</sup> como: Pares de dosímetros termoluminiscentes o TLDs<sup>[15,16]</sup>, detectores de activación<sup>[17]</sup>, detectores de burbujas<sup>[18]</sup> y detectores de trazas<sup>[19]</sup>.

El objetivo de este trabajo fue diseñar un monitor de área para neutrones con detector pasivo. Para el caso del detector de pares de TLDs el monitor fue calibrado y su desempeño se probó midiendo la dosis equivalente ambiental,  $H^*(10)$ , a 1 m del isocentro de un LINAC de 15 MV.

## 2. TEORÍA

En su interacción con la materia, los neutrones pueden ser dispersados elástica o inelásticamente, pueden ser absorbidos y del núcleo pueden emerger otras partículas como neutrones, protones, fotones, o el núcleo se puede escindir. La probabilidad de que ocurra cualquiera de estos procesos se define a través del concepto de sección eficaz. Cuando los neutrones interactúan con medios con altos contenidos de hidrógeno, deuterio, berilio o grafito la interacción predominante es la dispersión donde los neutrones pierden energía, a este proceso se le denomina moderación, hasta que su energía es tal que entran en equilibrio termodinámico con los átomos del medio, a esto se le llama termalización. En este estado la sección eficaz de que el neutrón sea absorbido es grande. Estos procesos son el fundamento del diseño de los monitores de área moderados, donde el medio moderador, normalmente polietileno, reduce la energía de los neutrones para que al alcanzar el centro del moderador, donde se encuentra el detector, la probabilidad de ser detectado se incrementa. En un estudio exhaustivo<sup>[20]</sup> se calculó la respuesta de moderadores con geometrías esférica y cilíndrica de diferentes tamaños para determinar la mejor combinación de material, geometría y tamaño para la detección de neutrones. Debido a las limitaciones del mercado nacional y a las limitaciones de manufactura, se decidió por el polietileno y la geometría cilíndrica. Se calculó la función respuesta del monitor para los casos donde el detector es pares de TLDs, laminilla de oro<sup>[21]</sup> y detector de trazas de CR39 con convertidor de  $^{10}\text{B}$ <sup>[22]</sup>. Las funciones de respuesta se calcularon usando métodos Monte Carlo mediante el código MCNP5<sup>[23]</sup>, donde se modeló el moderador con el detector en el centro y se determinaron las funciones respuesta ante fuentes monoenergéticas de neutrones. En la figura 1 se muestra la respuesta del MP/CR39<sup>[22]</sup>, en la figura 2 se muestra la respuesta del MP/Au<sup>[21]</sup> y en la figura 3 se muestra la respuesta del MP/TLDs<sup>[24]</sup>. El monitor se construyó como un cilindro de 20.5 cm de diámetro y 20.5 cm de altura de polietileno de  $0.94 \text{ g/cm}^3$ , con un hueco cilíndrico donde se inserta un cilindro de 5.5 cm de diámetro y 12.5 cm de altura en cuyo extremo se puede colocar cualquier de los detectores activos. Para evaluar el desempeño del monitor pasivo con pares de TLDs (MP/TLDs) se calibró con una fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  y un monitor de área comercial LB6411, este monitor tiene 8 TLDs (4 TLD600 y 4 TLD700)<sup>[24]</sup>.

## 3. PARTE EXPERIMENTAL

La calibración se realizó en el Laboratorio de neutrones del departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid usando dos fuentes de  $^{241}\text{AmBe}$ , una de 0.11 TBq se usó desnuda y otra, altamente moderada, dentro de un howitzer de 74 GBq, en la figura 4 se muestra el proceso de calibración con la fuente desnuda y moderada por el howitzer. La respuesta neta por neutrones en los TLDs se comparó con el valor de la  $H^*(10)$  medida con el monitor LB6411 y se obtuvo el factor de calibración:  $68 \pm 7\% \mu\text{Sv/nC}$ . Para probar validar el factor de calibración del MP/TLDs se midió la  $H^*(10)$  fuera del haz radial del reactor nuclear TRIGA Mark III del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares operando el reactor a 10 Watts, como se muestra en la figura 5<sup>[25]</sup>.



TONANTZINTLA, PUEBLA, MEXICO

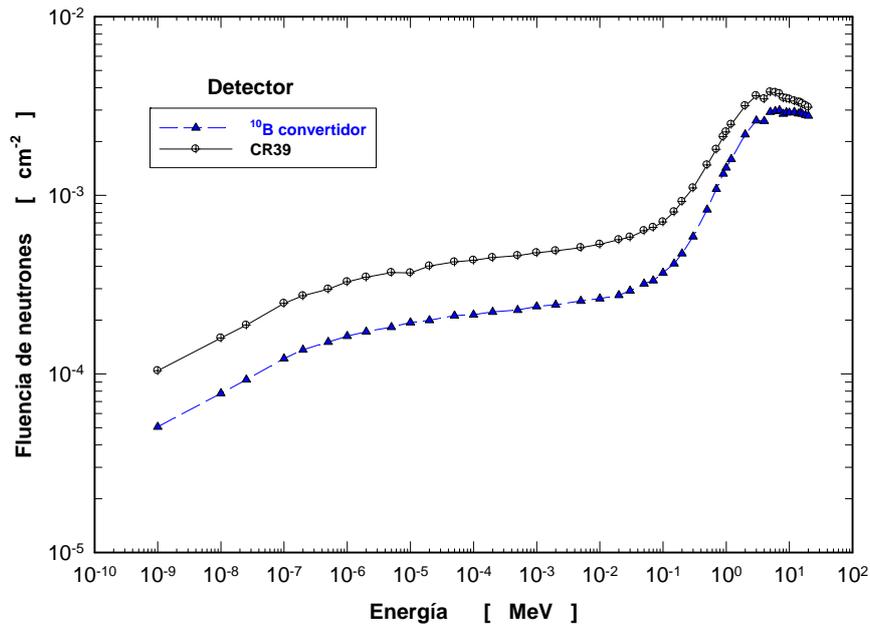


Figura 1.- Respuesta del monitor pasivo con CR39.

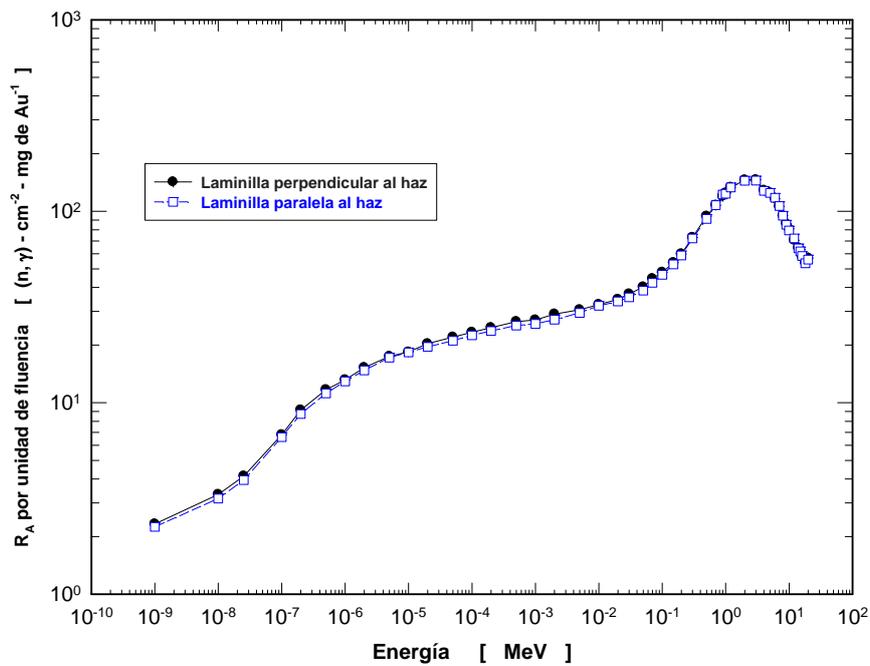


Figura 2.- Respuesta del monitor pasivo con laminilla de Au.



TONANTZINTLA, PUEBLA, MEXICO

Figura 3.- Respuesta del monitor pasivo con pares de TLDs.

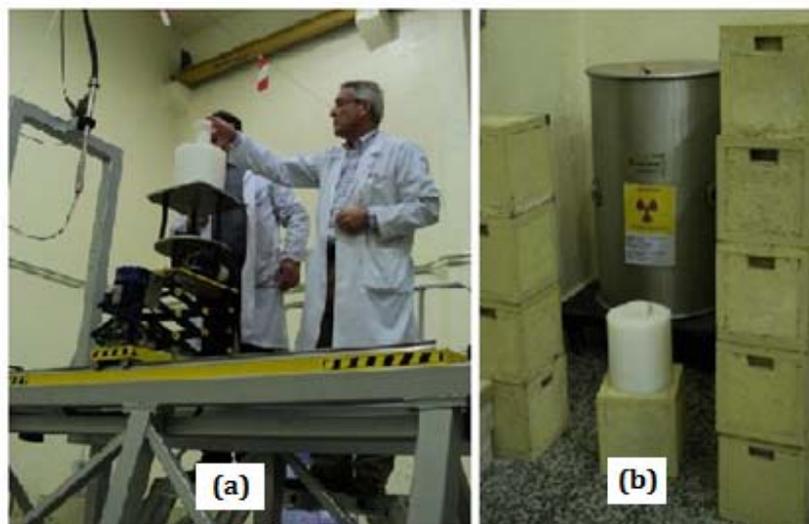


Figura 4.- Calibración del MP/TLDs con la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$ : (a) Desnuda, (b) Moderada.



### TONANTZINTLA, PUEBLA, MEXICO

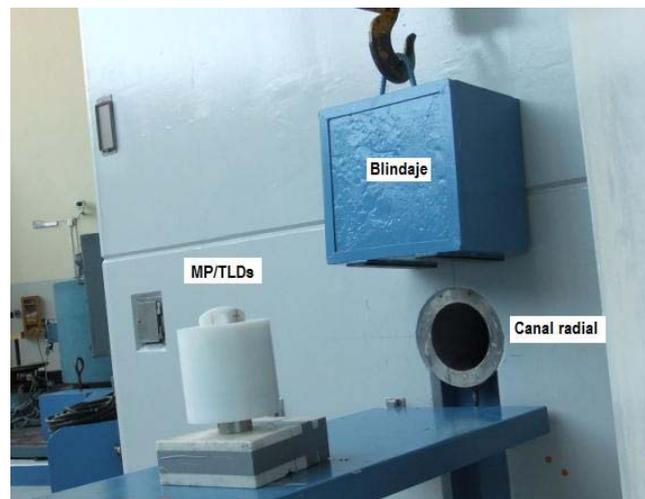


Figura 5.- Medición de la  $H^*(10)$  con el MP/TLDs en el canal radial del reactor TRIGA Mark III.

En la medición en el reactor nuclear se usó una potencia de 10 Watts, en este caso se usó el sistema espectrométrico de esferas Bonner con el que se obtuvo el espectro de neutrones y con éste se calculó la  $H^*(10)$  y se obtuvo un valor de  $1345 \pm 6\% \mu\text{Sv}$ , mientras que con el MP/TLDs el valor fue de  $1404 \pm 8\%$ . Una vez calibrado y validado el MP/TLDs se usó para medir la  $H^*(10)$  debido a los fotoneutrones que se producen en un LINAC para radioterapia. En este caso la  $H^*(10)$  se midió a 1 m del isocentro de un LINAC Varian 2100C de 15 MV del Centro de Cancerología de Nayarit, como se muestra en la figura 6.



Figura 6.- Medición de la  $H^*(10)$  con el MP/TLDs en el LINAC de 15 MV.



## TONANTZINTLA, PUEBLA, MEXICO

El isocentro se ubicó a 1 m del blanco del LINAC a 5 cm de profundidad de un maniquí de 30x30x15 cm<sup>3</sup> de agua sólida. Durante la prueba se aplicó una dosis de 6 Gy<sub>x</sub>, estas mismas condiciones se usaron para medir el espectro de neutrones mediante un espectrómetro de esferas Bonner y con éste se calculó el valor de la H\*(10) [26].

Con el monitor pasivo se obtuvo 0.55 ± 20% mSv/Gy<sub>x</sub>, mientras que con el espectrómetro de esferas Bonner se obtuvo 0.60 ± 15% mSv/Gy<sub>x</sub>. El valor medido se comparable a 0.63 y 0.69 mSv/Gy<sub>x</sub> reportado Thomas et al. [17] y por Kim y Lee [18]. La probable explicación de las diferencias en los valores de la H\*(10) se atribuye a que hicieron sus determinaciones en LINACs de 15 MV de diferente fabricante y modelo usando distintos procedimientos al usado en este trabajo.

### 4. CONCLUSIONES

Se diseñó un monitor de área para neutrones que puede usar pares de TLDs, laminilla de oro o detector de trazas de CR39 con convertidor de <sup>10</sup>B. El monitor se construyó como un cilindro de polietileno, la versión con pares de TLDs se calibró y fue puesto a prueba midiendo la H\*(10) en un LINAC para radioterapia.

- El desempeño del MP/TLDs en el haz de radiación del reactor nuclear resultó similar al resultado obtenido con el espectrómetro de esferas Bonner en su versión activa.
- La H\*(10) medida en torno al LINAC de 15 MV resultó comparable con la medida con el espectrómetro de esferas Bonner en su versión pasiva y con el valor reportado en la literatura.
- El MP/TLDs responde apropiadamente bajo diferentes condiciones de irradiación, y por el hecho de usar un detector pasivo, no requiere de fuente de energía y no se ve afectado en campos de radiación intensos, pulsados y mixtos.
- Una limitante del MP/TLDs es que el valor de la H\*(10) no se obtienen en tiempo real ya que una vez expuesto se deben leer los TLDs y hacer el proceso respectivo de las lecturas.

### BIBLIOGRAFÍA

1. H. R. Vega-Carrillo, E. Manzanares, "Background neutron spectrum at 2420 m above sea level", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 524, 1-3, 2004, pp. 146-151.
2. S. Niese, "Measurements of fast neutrons above ground and in 47 m depth with a <sup>3</sup>He proportional counter", J. Radioanal. Nucl. Chem., Vol. 272, 1, 2007, pp. 173-176.
3. M. J. García-Fusté, K. Amgarou, J. García-Orellana, C. Domingo, "Neutron área monitoring at storage bunkers of density/moisture gauges", Radiat. Meas., Vol. 45, 10, 2010, pp.1518-1521.
4. A. V. Alevra, D. J. Thomas, "Neutron spectrometry in mixed fields: multisphere spectrometers", Radiat. Prot. Dosim., Vol. 107, 1-3, 2003, pp. 37-72.
5. H. R. Vega-Carrillo, A. Ortiz-Hernandez, V. M. Hernandez-Davila, B. Hernandez-Almaraz, T. Rivera, "H\*(10) and neutron spectra around LINACs", J. Radioanal. Nucl. Chem., Vol 283, 2, 2010, pp. 537-540.
6. A. Zanini, E. Durisi, F. Fasolo, L. Visca, C. Ongaro, U. Natasi, K. W. Burn, J. R. M. Annand, "Neutron spectra in a tissue equivalent phantom during photon radiotherapy treatment by LINACs", Radiat. Prot. Dosim., Vol. 110, 1-4, 2004, pp. 157-160.
7. R. Barquero, R. Mendez, H. R. Vega-Carrillo, M. P. Iñiguez, T. M. Edwards, "Neutron spectra and dosimetric features around an 18 MV linear accelerator", Health Phys., Vol 88, 1, 2005, pp. 49-59.



#### TONANTZINTLA, PUEBLA, MEXICO

8. J. W. Leake, T. Lowe, R. S. Mason, G. White, "A new method of measuring a large pulsed neutron fluence or dose exploiting the die-away of thermalized neutrons in a polyethylene moderator", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 613, 1, 2010, pp. 112-118.
9. M. Klein, C. J. Schmidt, "CASCADE, neutron detectors for highest count rates in combination with ASIC/FPGA based readout electronics", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 628, 1, 2011, pp. 9-18.
10. K. Helbig, J. Henniger, "Dead-time losses in pulsed radiation fields", Radiat. Meas., Vol. 47, 5, 2012, pp. 383-388.
11. R. Takam, E. Bezak, G. Liu, L. Marcu, "The use of enriched  $^6\text{Li}$  and  $^7\text{Li}$  LiF:Mg,Cu,P glass-rod thermoluminescent dosimeters for linear accelerator out-of-field radiation dose measurements", Radiat. Prot. Dosim., Vol. 150, 1, 2012, pp. 22-33.
12. M. Caresana, M. Ferrarini, G. P. Manessi, M. Silari, V. Varoli, "LUPIN, a new instrument for pulsed neutron fields", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 712, 1, 2013, pp. 15-26.
13. H. R. Vega-Carrillo, "Neutron energy spectra inside a PET cyclotron vault room", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 463, X, 2001, 1-2, pp. 375-386.
14. J. M. Gómez-Ros, R. Bedogni, I. Palermo, A. Esposito, A. Delgado, M. Angelone, M. Pillon, "Design and validation of a photon insensitive multidetector neutron spectrometer based on Dysprosium activation foils", Radiat. Meas., Vol. 46, 12, 2011, pp. 1712-1715.
15. H. R. Vega-Carrillo, "TLDs pairs, as thermal neutron detectors in neutron multisphere spectrometry", Radiat. Meas., Vol. 35, 3, 2002, pp. 251-254.
16. S. P. Tripathy, A. K. Bakshi, V. Sathian, S. M. Tripathy, H. R. Vega-Carrillo, M. Nandy, P. K. Sarkar, D. N. Sharma, "Measurement of  $^{241}\text{Am-Be}$  (bare and Pb-covered) using TLD pairs in multi-spheres: Spectrum unfolding by different methods", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 598, 2, 2009, pp. 556-560.
17. D. J. Thomas, A. G. Bardel, E. M. Macaulay, "Characterisation of a gold foil-based Bonner sphere set and measurements of neutron spectra at a medical accelerator", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Vol. 476, 1-2, 2002, pp. 31-35.
18. H. S. Kim, J. K. Lee, "Assessment and measurement of the photoneutron field produced in the Varian medical linear accelerator", J. Nucl. Sci. Tech., Vol. 44, 1, 2007, pp. 95-101.
19. M. Kralik, K. Turek, V. Vondracek, "Spectra of photoneutrons produced by high-energy x-ray radiotherapy LINACs", Radiat. Prot. Dosim., Vol. 132, 1, 2008, pp. 13-17.
20. H. R. Vega-Carrillo, A. M. Becerra Ferreira, L. H. Soto Berumen, *Detector pasivo de neutrones* (PUBLICIA, Saarbrucken, Germany, 2014), pp. 56-84.
21. C. Y. Valero Luna, H. R. Vega-Carrillo, *Monitor para neutrones con detector de Au-197* (Editorial Académica Española, Saarbrucken, Germany, 2012), pp. 44-48.
22. H. R. Vega-Carrillo, R. Barquero, G. A. Mercado, "Passive neutron area monitor with CR39", Int. J. Radiat. Res., Vol. 11, 3, pp. 149-153.
23. X-5 Monte Carlo Team, "MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 5", Los Alamos National Laboratory report LA-UR-03-1987, 2003.
24. K. A. Guzman García, H. R. Vega-Carrillo, *Monitor de área pasivo para neutrones con pares de TLDs*, (Editorial Académica Española, Saarbrucken, Germany, 2012), pp. 28-51.
25. H. R. Vega-Carrillo, V. M. Hernández-Dávila, F. Aguilar, L. Paredes, T. Rivera, "Neutron spectra at two beam ports of a TRIGA Mark III reactor loaded with HEU fuel", Appl. Radiat. Isot., Vol. 83, C, 2014, pp. 252-255.
26. J. L. Benites-Rengifo, H. R. Vega-Carrillo, J. Velazquez-Fernandez, "Photoneutrons spectrum measured with a Bonner sphere spectrometer in Planetary method mode", Appl. Radiat. Isot., Vol. 83, C, 2014, pp. 256-259.