

MÉTODO PLANETARIO PARA MEDIR EL ESPECTRO DE NEUTRONS EN ACELERADORES LINEALES DE USO MÉDICO

Héctor René Vega-Carrillo¹ y Jorge Luis Rengifo^{2,3}

¹ Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas
C. Ciprés 10, Fracc. La Peñuela. 98000 Zacatecas, Zac. México
Buzón electrónico: fermineutron@yahoo.com

² Servicio de Seguridad Radiológica del Centro Estatal de Cancerología de Nayarit
Calzada de la Cruz 118 sur, C.P. 63000 Tepic, Nayarit. México

³ Instituto Técnico Superior de Radiología, ITEC.
Calle León 129, C.P. 63000 Tepic, Nayarit. México
Buzón electrónico: jlbenitesr@prodigy.net.mx

Abstract

Un procedimiento novedoso para medir el espectro de los neutrones producido en un acelerador lineal de uso médico ha sido desarrollado. El método usa un espectrómetro pasivo de Esferas Bonner. La principal ventaja del método es que solo requiere de un solo disparo del acelerador. Cuando se usa en torno a un acelerador lineal se tiene que operar bajo las mismas condiciones tantas veces como esferas tenga el espectrómetro lo que consume mucho tiempo. El procedimiento desarrollado consiste en colocar todas las esferas del espectrómetro a la vez y hacer la lectura haciendo un solo disparo. Con este método se determinó el espectro de los fotoneutrones producido por un acelerador lineal Varian iX de 15 MV a 100 cm del isocentro, con el espectro se determine determinar el flujo total y el equivalente de dosis ambiental.

Palabras clave: Esferas Bonner, LINAC, Fotoneutrones.

1.- INTRODUCTION

Anualmente, en el mundo, el Cáncer produce más muertes que el Paludismo, la Tuberculosis y el SIDA. Para el tratamiento del Cáncer las opciones disponibles son la cirugía, la quimioterapia y la radioterapia en sus modalidades de teleterapia y braquiterapia [IAEA, 2010]. En la mayoría de las aplicaciones de la teleterapia se hace mediante aceleradores lineales o LINACs que cuando operan con voltajes superiores a los 8 MV, generan neutrones [Awotwi –Pratt and Spyrou, 2008] mediante reacciones nucleares del tipo $(e, e'n)$ o fotonucleares (γ, n) [Vega-Carrillo y Pérez-Landeros, 2012].

Los fotoneutrones se producen cuando los fotones interactúan con el W o el Pb del cabezal del LINAC [Mesbahi *et al.*, 2010] debido a que algunos de sus isótopos tienen la Resonancia Dipolar Gigante [NCRP, 1984]. La energía umbral para la producción de fotoneutrones en el W y el Pb está entre los 7 y los 8 MeV, no obstante otros autores reportan la producción de fotoneutrones en LINACs con fotones de 6 MeV [Barquero *et al.*, 2002].

La presencia de los neutrones en una sala de radioterapia puede inducir la aparición de nuevas neoplasias en el paciente [Takam *et al.*, 2011; Takam *et al.*, 2012]; este problema también ocurre en las nuevas tecnologías oncológicas como la Hadronterapia [Kaderka *et al.*, 2012]. La importancia de estudiar la inducción de tumores cancerosos también ha sido analizada en tomografía asistida por computadora con rayos x [Li *et al.*, 2011].

Otro efecto secundario de la presencia de neutrones en las salas de tratamiento es la activación [Konefal *et al.*, 2013]; algunos de los radioisótopos inducidos decaen emitiendo rayos γ que pueden alcanzar el cuerpo de paciente, así como al personal que labora en torno al LINAC. Bajo estas circunstancias la presencia de neutrones dentro de una sala de radioterapia con un LINAC se convierte en un tema de protección radiológica.

Cuando un LINAC es operado produce un campo de radiación intenso, pulsado y mixto que inhabilita cualquier instrumento que utilice un detector de neutrones activo debido a en el detector se apilan los pulsos y se presentan largos tiempos muertos. Uno de los instrumentos que se usa con mayor frecuencia para medir el espectro de neutrones es el espectrómetro de Esferas Bonner (EEB), que consiste en varias esferas de polietileno de diferentes diámetros en cuyo centro se coloca un detector de neutrones térmicos. Conforme el diámetro de las esferas aumenta la eficiencia de detección se incrementa para neutrones de mayor energía [Bramblett, Ewing and Bonner, 1960].

El EEB usa un centellador cilíndrico de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ de $0.4 \text{ } \varnothing \times 0.4 \text{ cm}^2$, que es un detector activo que no puede ser usado dentro de las salas de radioterapia con LINAC. Para resolver este problema, el detector activo ha sido sustituido por laminillas de detección, como el ${}^{197}\text{Au}$ [Thomas *et al.*, 2007] y el Dy [Bedogni *et al.*, 2010], detectores de trazas [Králík, Turek and Vondráček, 2008] o pares de dosímetros termoluminiscentes [Vega-Carrillo *et al.*, 1999; Vega-Carrillo, 2001; Vega-Carrillo, 2002].

En los últimos años el interés por medir el espectro de los neutrones, dentro y fuera del búnker de un LINAC, ha aumentado; así para aceleradores de 15 MV se han medido la dosis, la energía promedio y la emisividad de neutrones. Los espectros se midieron en diversos puntos dentro de la sala a 1 m de distancia del isocentro. La dosis reportada varía de 1.843 a $0.169 \text{ mSv-Gy}_x^{-1}$ dependiendo del área de irradiación y la emisividad de neutrones fue de $0.2\text{E}(12) \text{ n-Gy}_x^{-1}$ [Lin *et al.*, 2001].

En otro estudio, se usaron detectores de burbujas para medir la dosis equivalente por neutrones en un LINAC de 15 MV. Se encontró que a 1 m del isocentro de un maniquí de agua, la dosis equivalente era de $1.57 \pm 0.10 \text{ mSv-Gy}_x^{-1}$ [Awotwi-Pratt and Spyrou, 2007].

En 2011, Chu *et al.* determinaron los espectros de fotoneutrones en varios puntos dentro de una sala de radioterapia. Los espectros tenían dos picos, uno en la zona de alta energía entre 0.1 y 1 MeV, con un máximo en aproximadamente 0.2 MeV, y otro de menor amplitud en la zona de los neutrones térmicos. La amplitud de los neutrones térmicos, en todos los

espectros, se encontró aproximadamente constante sin importar la distancia respecto al isocentro, mientras que los neutrones rápidos disminuían conforme la distancia respecto al isocentro aumentaba [Chu *et al.*, 2011].

En otros estudios se ha medido el espectro de los neutrones y a partir de esta información se han determinado los valores de la dosis. Para medir el espectro se ha usado un EEB con pares de TLDs.

Barquero *et al.* [2002] y Howell *et al.* [2009] reportaron que a 1 m del isocentro, las fluencias de neutrones medidas fueron de $69.7E(3)$, $13.5E(3)$ y $29.5E(5)$ n/cm²-UM, mientras que los valores del equivalente de dosis ambiental fueron de $1.1E(-6)$, $2.5E(-6)$ y $4.8E(-6)$ Sv/UM para LINACs de 15 MV VARIAN 21EX, ELEKTA y SIEMENS, respectivamente.

En estos estudios se ha señalado que es importante medir los espectros y a partir de esta información determinar la magnitudes integrales como el flujo, la energía promedio y el equivalente de dosis ambiental. Los espectrómetros usados, además de usar diferente detector de neutrones térmicos, cuentan con un número diferente de esferas. Así, durante las mediciones cada esfera se coloca en el punto de medición y se dispara el LINAC; así, a mayor cantidad de esferas mayor será la cantidad de disparos necesarios y el tiempo requerido aumenta.

Este trabajo tiene como propósito presentar un procedimiento novedoso para medir el espectro de los neutrones en un LINAC de uso médico, donde se requiere de un solo disparo del acelerador. A este método le hemos llamado Método Planetario.

La medición se hace con una versión pasiva del EEB donde el detector de neutrones térmicos está formado por pares de dosímetros termoluminiscentes del tipo TLD 600 y TLD 700. El procedimiento propuesto se usó en el Centro de Cancerología de los Servicios de Salud de Nayarit.

2.- MATERIALES Y METODOS

Cuando el LINAC es operado en modo *Bremsstrahlung* los electrones se hacen incidir sobre un blanco donde se producen rayos X cuyo espectro tiene una parte continua y una parte discreta que corresponde a los rayos X característicos. Los fotones son colimados en los sistemas de colimación del cabezal y son conformados en el colimador de hojas múltiples del acelerador. En este proceso los fotones interactúan con los núcleos del tungsteno, plomo y hierro produciendo fotoneutrones, cuyo espectro está formado por neutrones *knock-off* y de evaporación, que pierden energía durante su transporte hacia afuera del cabezal. La otra forma de producción de neutrones es cuando el LINAC opera con haces de electrones que se hacen pasar por un dispersor donde se producen electroneutrones mediante una reacción con fotón virtual. Los electroneutrones producidos se transportan del cabezal hacia la sala de la misma forma en que lo hacen los fotoneutrones. Las dimensiones de la sala influyen en la conformación del espectro de los neutrones en cualquier punto de la sala, por lo que es importante determinar si en el punto de interés el campo de neutrones es simétrico. Para hacer la medición con un solo disparo se requiere colocar todas las esferas de Bonner a una misma distancia del isocentro, IC, esto implica colocarlas en el perímetro de un círculo, en cuyo centro está el IC.

Como las esferas son de polietileno de diferente diámetro es necesario distribuir las en posiciones donde la presencia de una esfera no perturbe a las demás, esto es el *cross-talking*. Así pues el método propuesto consiste en determinar lo siguiente:

- Condiciones de simetría del campo neutrónico en la sala.
- El *cross-talking* de las esferas Bonner.

El método propuesto se usó en el Centro de Cancerología de los Servicios de Salud de Nayarit que cuenta con un LINAC Varian iX que opera con haces de electrones de 6, 9, 12, 15 y 18 MeV y con haces de fotones de 6 y 15 MV. El acelerador se encuentra en un búnker de 7 x 8 x 4 m³. Las barreras secundarias del búnker son de concreto de 1.5 m de espesor,

mientas que las barreras primaria son de 2.5 m de espesor. Para verificar las condiciones de simetría y el cross-talking en esta instalación, se usó el código MCNP5 [Forster *et al.*, 2004].

2.1. Simetría

Para determinar si a 1 m del IC el campo de neutrones es simétrico, se construyó un modelo de la sala, el cabezal del acelerador se modeló mediante dos esferas concéntricas, la primera llena de aire de 5 cm de radio y la segunda de tungsteno de 15 cm de radio. En el centro se colocó el término fuente formado por la función de Tosi *et al.* [1991]. En el modelo del cabezal se incluyó una abertura cónica, con el vértice en el centro y con el centro de la base en el IC. El área de la base del cono equivale a un campo de irradiación de $20 \times 20 \text{ cm}^2$. El IC se ubicó a 5 cm de profundidad de un maniquí de $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ de agua sólida. Se calculó el transporte de neutrones dentro de la sala y se determinaron los espectros en puntos del perímetro de un círculo de 1 m de radio cuyo centro se ubicó en el IC. El número de historias usado fue de 10^7 lo que permitió obtener incertidumbres menores al 3%.

2.2.- Cross-Talking

El modelo de la sala con el cabezal y el maniquí se usó para determinar el *cross-taking* de las esferas Bonner. Para esto se incluyeron las esferas en el modelo ubicando el detector desnudo entre las esferas de mayor diámetro. Así, en el plano del IC las esferas se modelaron a 1 m del IC y se varió el ángulo en torno al círculo. Con este procedimiento se determinó el ángulo mínimo que debe usarse para que no exista el *cross-taking*.

2.3. Medición del Espectro

El espectro de neutrones se determinó colocando las esferas Bonner en torno al perímetro de un círculo de 1 m de radio cuyo centro se ubicó en el IC que a su vez se localizó a 5 cm de profundidad de un maniquí de $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ de agua sólida. Se usó un campo de irradiación de $20 \times 20 \text{ cm}^2$ y se aplicaron 6 Gy_x . En el centro de cada esfera se colocaron 2 TLD600 y 2 TLD700 previamente calentados a $400 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 h, en la figura 1 se muestran las bases de las esferas del espectrómetro distribuidos en torno al IC con ángulos de separación de 20° . Una vez hecho el disparo las curvas de brillo de los TLDs se obtuvieron

usando un lector Harshaw modelo 3500 calentándolos de 50 a 300 oC con un gradiente de 10 °C/seg. De cada esfera se obtuvieron las lecturas de dos TLD600 y dos TLD700 y se calculó el valor del promedio de la lectura para cada tipo de dosímetro y para cada esfera. La respuesta neta debida a los neutrones para cada esfera y su incertidumbre se calcularon mediante las ecuaciones 1 y 2 [Vega-Carrillo, 2001; Vega-Carrillo, 2002].

$$S_n = L_{600} - k L_{700} \quad (1)$$

$$\sigma_{S_n} = \sqrt{\sigma_{L_{600}}^2 + k^2 \sigma_{L_{700}}^2 + L_{700}^2 \sigma_k^2} \quad (2)$$



Figura 1.- Bases de las esferas Bonner ubicadas en modo Planetario.

En estas ecuaciones, S_n es la respuesta neta debido a los neutrones, σ_{S_n} es su incertidumbre, L_{600} es el valor promedio de la lectura de los TLD600 debido a fotones y neutrones, $\sigma_{L_{600}}$ es su incertidumbre, L_{700} es la lectura promedio de los TLD700, $\sigma_{L_{700}}$ es su incertidumbre debido a fotones y neutrones, k es la razón entre la respuesta de los TLD600 y los TLD700 a fotones y σ_k es su incertidumbre. El valor de k se obtuvo durante el proceso de selección y caracterización de los pares de TLDs para las esferas Bonner, donde se expusieron a campos de radiación de fuentes de ^{137}Cs y ^{60}Co y se observó una pequeña diferencia entre

las respuestas de los TLD600 y las de los TLD700 a pesar de que su densidad y número atómico efectivo es aproximadamente igual. De este proceso, el valor fue $k = 1.0202 \pm 0.1255$. Cabe destacar aquí, el hecho de que, si se sustituyen uno o todos los TLDs, o bien algún usuario decide usar este método pasivo en la espectrometría de neutrones, es indispensable que sus TLDs sean caracterizados con el fin de determinar este valor de k [Vega-Carrillo, 2002].

La respuesta a neutrones, S_n , de cada esfera se obtuvo en unidades de carga eléctrica, nC, y se convirtió a las cuentas equivalentes de un centellador de ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, usando el factor de conversión de $4 \times 10^4 \pm 6\%$ cuentas/nC. La reconstrucción del espectro de los fotoneutrones, $\Phi_E(E)$, se hizo mediante el código NSDUAZ [Vega-Carrillo, Ortíz-Rodríguez and Martínez-Blanco, 2012]. Con la información del espectro se calculó la fluencia total de neutrones, su energía promedio y la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$; para esta última se usaron los coeficientes de conversión de fluencia a dosis del ICRP 74 [ICRP, 196].

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para medir el espectro de neutrones en torno a un LINAC mediante el espectrómetro de esferas Bonner usando un solo disparo, el método propuesto requiere que se determinen las condiciones de simetría del campo neutrónico y se defina la posición de las esferas donde el *cross-talking* no exista.

3.1.- Simetría

Las condiciones de simetría se determinaron calculando la fluencia total de los neutrones dentro y fuera de la sala, así como en puntos en torno al IC. Los resultados de esta distribución se muestran en la figura 2. Aquí, la presencia del maniquí es notoria en la distribución de los neutrones. A partir de aproximadamente 40 cm se observa que conforme la distancia, respecto al centro aumenta la fluencia de neutrones disminuye en forma simétrica.

Mediante detectores puntuales se calcularon los espectros de neutrones en torno al perímetro de un círculo de 1 m de radio. Los espectros calculados se muestran en la figura 3, en esta misma figura, y con fines de comparación se muestra el espectro calculado en un punto a 5 cm de la barrera primaria. En esta figura se puede observar que en el perímetro de un círculo de 1 m de radio los espectros son estadísticamente iguales ya que para cada grupo de energía la incertidumbre es menor a 3%. Al comparar los espectros a 1 m con el espectro en un detector ubicado cerca de la barrera primaria, ubicado aproximadamente a 3 m del IC, el conjunto de neutrones de energía mayor a $1E(-2)$ MeV es menor en comparación con los neutrones calculados a 1 m, sin embargo los neutrones epitérmicos y térmicos se mantienen constantes a pesar de que la distancia es diferente, esto se debe al *room-return* [Vega-Carrillo et al., 2007].

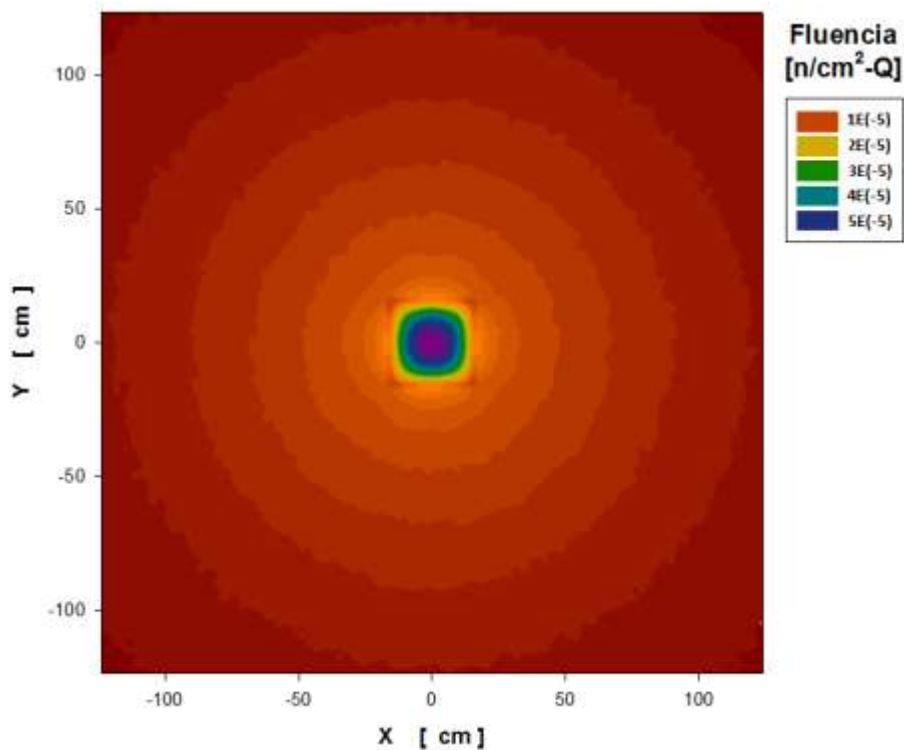


Figura 2.- Fluencia de neutrones en torno al IC.

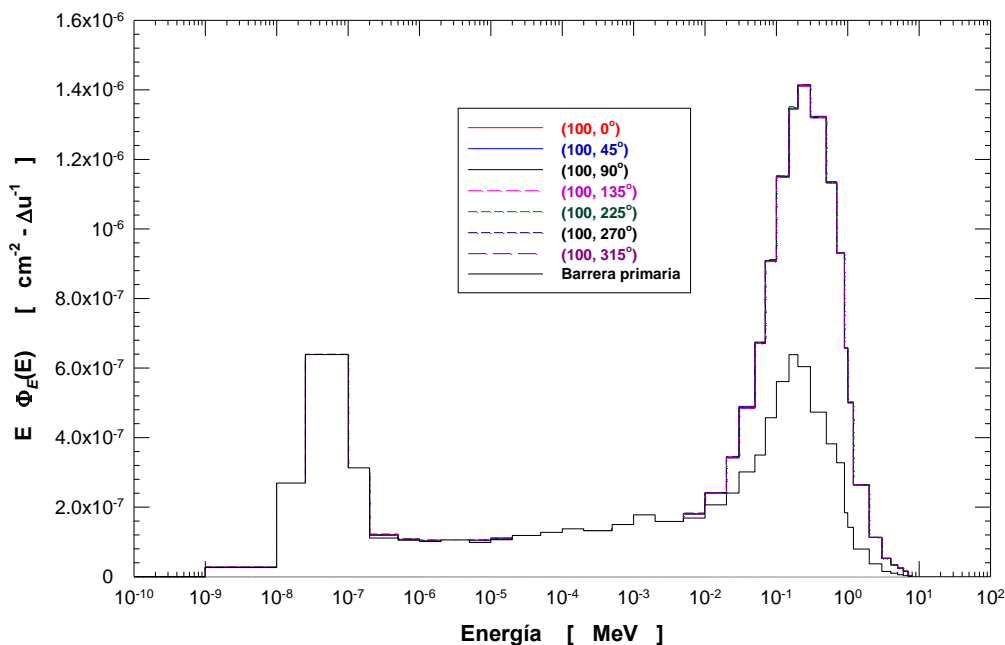


Figura 4.- Espectros de neutrones en puntos distribuidos en el perímetro de un círculo de 1 m de radio y en la barrera primaria.

3.2. Cross-Talking

En el modelo de la sala se incluyeron esferas de polietileno con las dimensiones de las esferas Bonner, el detector desnudo se colocó entre las esferas de mayor diámetro, el resto de las esferas se distribuyó en el perímetro del círculo de 1 m de radio. La distribución de las esferas se hizo en el plano del IC usando coordenadas polares (1 m, θ°) variando el ángulo desde 12 hasta 50°.

En la figura 5 se muestra el espectro de los neutrones en el punto donde se colocó el detector desnudo cuando las esferas se ubicaron cada 30 y 45°.

En la figura 6 se muestra la distribución de los neutrones en la sala con las esferas colocadas cada 45°. De este proceso se encontró para esta sala las esferas se pueden colocar cada 20° ya que a partir de esta posición el *cross-talking* entre las esferas no ocurre.

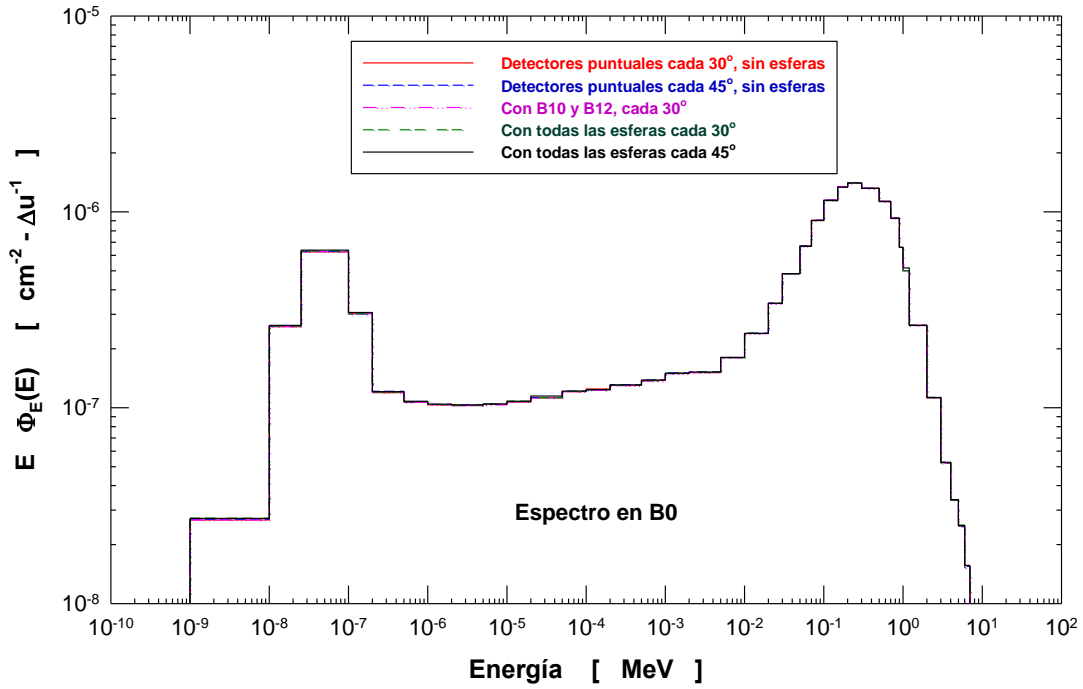


Figura 5.- Espectros de neutrones en el detector desnudo cuando las esferas están a 30 y 45°

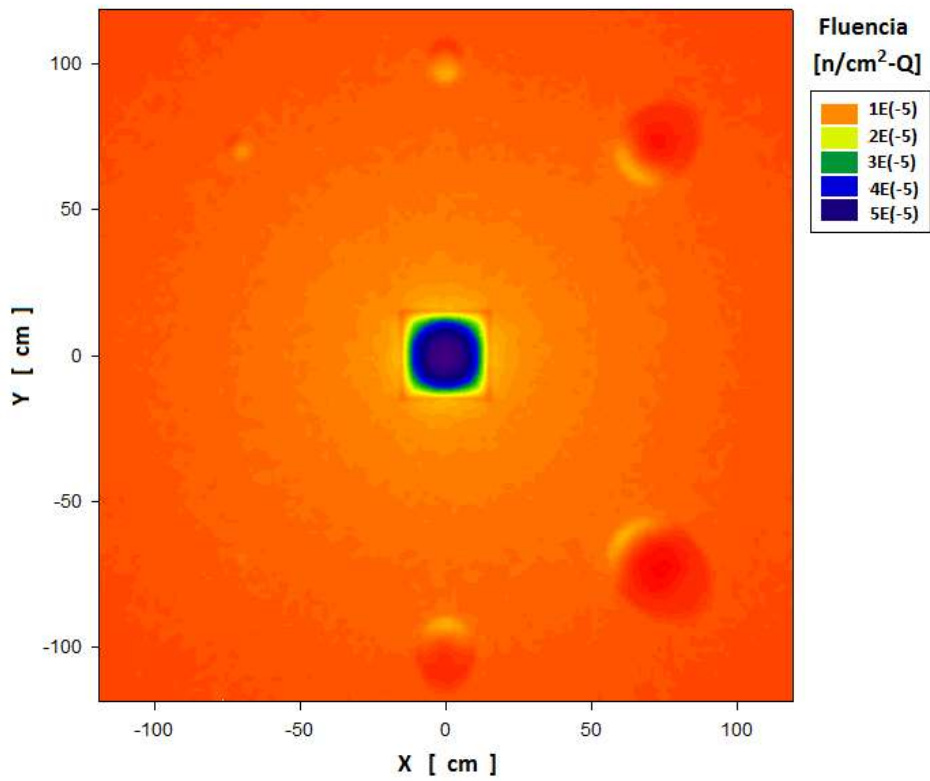


Figura 6.- Fluencia de neutrones en la sala con las esferas cada 45°

3.3. Espectro de los fotoneutrones a 1 m del IC

Mediante el espectrómetro de esferas Bonner con pares de TLDs se determinó el espectro de los fotoneutrones. En las mediciones se colocaron las esferas a cada 20°. Las rapidezces de conteo se usaron para reconstruir el espectro de los neutrones mediante el código NSDUAZ. En la figura 7 se muestra el espectro reconstruido; en esta figura se ha incluido el espectro de neutrones calculado mediante el código MCNP5, donde se observa que ambos espectros coinciden.

La rapidez de fluencia total, o flujo, de los fotoneutrones por unidad de dosis aplicada, a 100 cm del isocentro, es $5.20 \times 10^6 \pm 7\%$ neutrones/cm²-Gy_x. Este valor coincide con 5.35×10^6 y 5.68×10^6 reportados por Kim y Lee [2007] y Thomas *et al.* [2007] para LINACs Varian CLINAC 2100C/2300C y Varian CLINAC 2100C de 15 MV respectivamente.

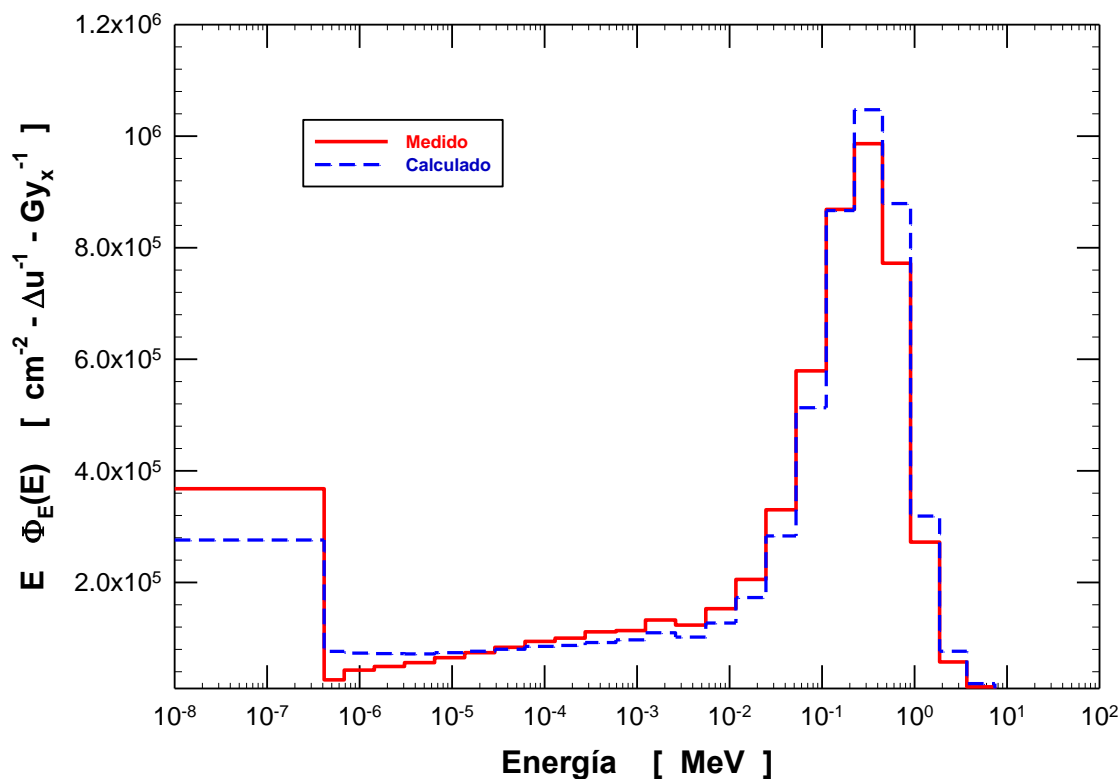


Figura 7.- Espectro de neutrones, medido y calculado, a 1 m del IC.

La fluencia reportada por Kim y Lee [2007] es 2.8% mayor a la fluencia encontrada en este trabajo. La fluencia reportada por Thomas *et al.* [2007] es 9.2% mayor a la encontrada en este trabajo. La probable explicación de esta diferencia pudiera ser que ellos usaron un área de irradiación de 15 x 15 cm². A menor área de irradiación es mayor el flujo de neutrones debido a que el área de irradiación se controla con los colimadores secundarios que están hechos de tungsteno. Un mayor número de fotones de *Bremsstrahlung* interacturará con los núcleos de tungsteno de los colimadores, y habrá una mayor cantidad de reacciones (γ , n), tal y como los señalan Barquero *et al.* [2002].

En forma genérica, las diferencias de fluencias de neutrones se atribuyen a los modelos de los LINACs y al método usado para hacer las mediciones. La fluencia medida en el VARIAN iX es mayor a la reportada para aceleradores Primus y Mevatron de 10 MV, cuyo valor es del orden de 10⁵ cm⁻²-Gy_x⁻¹ [Vega-Carrillo et al., 2010a; Vega-Carrillo et al., 2010b]. Esta diferencia se atribuye al diseño y los materiales usados por los diferentes fabricantes.

En la tabla1 se muestran la energía promedio y la dosis equivalente ambiental del espectro medido, usando los criterios de los intervalos de clase de energía, (inferior, intermedio, superior) y la mediana, de los grupos de energía del espectro reconstruido.

Tabla 1. Energía promedio y H*(10).

Parámetro y dosis	Inferior	Intermedio	Superior	Mediana
E _p [MeV]	0.15	0.23	0.30	0.21
H*(10) [μ Sv/Gy _x]	496 \pm 35	633 \pm 44	724 \pm 51	612 \pm 43

El valor del H*(10) reportado por Kim y Lee [2007] es 750 μ Sv/Gy_x, mientras que el valor reportado por Thomas, Bardel y Macaulay [2002] es de 691 μ Sv/Gy_x. Ambos valores coinciden con el valor superior del intervalo de clase de la energía calculado en este trabajo. El valor de Kim y Lee es 3.6% mayor, mientras que el valor de Thomas et al., es 4.6%

menor. Ambas diferencias se incluyen en la incertidumbre reportada para la $H^*(10)$ que es 7.04%.

El valor del promedio de la energía de los neutrones coincide con el rango de valores promedio señalados por Kase *et al.* [1998], quienes usaron cálculos Monte Carlo con los códigos EGS4 y Morse, usando un modelo completo y otro simple del cabezal.

4. CONCLUSIONES

Con el fin de medir el espectro de los neutrones dentro de una sala de radioterapia con LINAC mediante un espectrómetro de esferas Bonner haciendo un solo disparo del acelerador se ha propuesto un procedimiento experimental que implica determinar si las características de la sala permiten que haya condiciones de simetría del campo neutrónico y establecer la posición de las esferas donde el *cross-talking* no exista. El procedimiento se puso a prueba midiendo el espectro de los fotoneutrones a 1 m del IC de un LINAC Varian iX de 15 MV. De los resultados obtenidos las conclusiones más importantes son las siguientes:

- El método propuesto permite medir el espectro de neutrones con un espectrómetro de esferas Bonner haciendo un solo disparo del acelerador, colocando las esferas en el perímetro de un círculo cuyo radio es la distancia entre el isocentro y el punto de interés.
- Para aplicar el método se requiere verificar que las dimensiones y geometría de la sala permiten que en el punto de interés el campo de neutrones, en energía y fluencia total, es simétrico; así como determinar el ángulo de separación entre las esferas donde el *cross-talking* no exista.
- El método se aplicó en un LINAC de 15 MV, donde se encontró que a 1 m del IC existen las condiciones de simetría del campo neutrónico.

- En esta sala no existe *cross-talking* entre las esferas cuando se colocan en ángulos mayores a los 20°.
- El espectro medido a 1 m del IC presenta un pico entre 0.1 y 1 MeV cuyo origen son los neutrones de evaporación de los fotoneutrones, también presenta neutrones epitérmicos y térmicos debidos al *room-return* de la sala.
- Con el espectro se determinó la energía promedio de los neutrones y las rapidezces de la fluencia total de neutrones y del equivalente de dosis ambiental. Estos valores coinciden con los valores reportados en la literatura.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del proyecto LINAC 2 parcialmente financiado por el COZCyT, la Universidad Autónoma de Nayarit y los Servicios de Salud del estado de Nayarit.

REFERENCIAS

- Awotwi-Pratt, J.B., Spyrou, N.M. (2007). *Measurement of photoneutrons in the output of 15 MV Varian CLINAC 2100C LINAC using bubble detectors*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **271**: 679-684.
- Barquero, R.; Méndez, R.; Iñiguez, M.P.; Vega-Carrillo, H.R.; Voytech, M. (2002). *Thermoluminescence measurements of neutron dose around a medical LINAC*. Radiation Protection Dosimetry **10**: 493-506.
- Bedogni, R.; Ferrari, P.; Gualdrini, G. and Esposito, A. (2010). *Design and experimental validation of a Bonner sphere spectrometer based on Dysprosium activation foils*. Radiation Measurements **45**: 1201-1204.
- Bramblett, R.L.; Ewing, R.I. and Bonner T.W. (1960). *A new type of neutron spectrometer*. Nuclear Instruments and Methods **9**: 1-12.
- Chu, W.H.; Lan, J.H.; Chao, T.C.; Lee, C.C.; Tung, C.J. (2011). *Neutron spectrometry and dosimetry around 15 MV LINAC*. Radiation Measurements **46**: 1741-1744.

- Forster, R.A.; Cox, L.J.; Barrett, R.F.; Booth, T.E.; Briesmeister, J.F.; Brown, F.B.; Bull, J.S.; Geisler, G.C.; Goorley, J.T.; Mosteller, R.D.; Post, S.E.; Prael, R.E.; Selcow, E.C.; Sood, A. (2004). *MCNPTM Version 5. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **213**: 82-86.
- Howell, R.M.; Kry, S.F.; Burgett, E.; Hertel, N.E.; Followill, D.S. (2009). *Secondary neutron spectra from modern Varian, Siemens, and Elekta LINACs with multileaf collimators*. *Medical Physics* **36**: 4027-4038.
- IAEA. (2010). *Fighting cancer in developing countries*. International Atomic Energy Agency Bulletin **52**.
- ICRP. (1996). *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*. *Annals of the ICRP* **26**: 199-200.
- Kaderka, R.; Schardt, D.; Durante, M.; Berger, T.; Ramm, U.; Licher, J.; La Tessa, C. (2012). *Out-of-field dose measurements in a water phantom using different radiotherapy modalities*. *Physics in Medicine and Biology* **57**: 5059-5074.
- Kase, K.R., Mao, X.S., Nelson, W.R., Liu, J.C., Kleck, J.H., Elsalim, M. (1998). *Neutron fluence and energy spectra around the Varian CLINAC 2100C/2300C medical accelerator*. *Health Physics* **74**: 38-47.
- Konefal, A.; Orlef, A.; Laciak, M.; Ciba, A.; Szewczuk, M. (2013). *Thermal and resonance neutrons generated by various electron and x-ray therapeutic beams from medical LINACs installed in Polish oncological centers*. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy* **17**: 339-346.
- Kim, H.S.; Lee, J.K. (2007). *Assessment and measurement of the photoneutron field produced in the Varian medical linear accelerator*. *Journal of Nuclear Science and Technology* **44**: 95-101.
- Králík, M.; Turek, K.; Vondráček, V. (2008). *Spectra of photoneutrons produced by high-energy X-ray radiotherapy LINACs*. *Radiation Protection Dosimetry* **132**: 13-17.
- Li, X.; Samei, E.; Segars, W.P.; Sturgeon, G.M.; Colsher, J.G.; Toncheva, G.; Yoshizumi, T.T.; Frush, D.P. (2011). *Patient-specific radiation dose and cancer risk estimation in CT: Part I. Development and validation of a Monte Carlo program*. *Medical Physics* **38**: 397-407.
- Lin, J.-P.; Chu, T.-C.; Lin, S.-Y. and Liu, M.-T. (2001). *The measurement of photoneutrons in the vicinity of a Siemens Primus linear accelerator*. *Applied Radiation and Isotopes* **55**: 315-321.

- Mesbahi, A.; Keshtkar, A.; Mohammadi, E.; Mohammadzadeh, M. (2010). *Effect of wedge filter and field size on photoneutron dose equivalent for an 18 MV photon beam of a medical linear accelerator*. Applied Radiation and Isotopes **68**: 84-89.
- NCRP. (1984). *Neutron contamination from medical electron accelerators*. National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. **79**.
- Takam, R.; Bezak, E.; Marcu, L.G.; Yeoh, E. (2011). *Out-of-field neutron and leakage photon exposure and the associated risk of second cancers in high-energy photon radiotherapy: Current status*. Radiation Research **176**: 508-520.
- Takam, R.; Bezak, E.; Liu, G.; Marcu, L. (2012). *The use of enriched ^6Li and ^7Li LiF:Mg,Cu,P glass-rod thermoluminescent dosimeters for linear accelerator out-of-field radiation dose measurements*. Radiation Protection Dosimetry **150**: 22-33.
- Thomas, D.J.; Bardel, A.G.; Macaulay, E.M. (2002). *Characterisation of a gold foil-based Bonner sphere set and measurements of neutron spectra of a medical accelerator*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **476**: 31-35.
- Thomas, D.J.; Hawkes, N.P.; Jones, L.N.; Kolkowski, P. and Roberts, N.J. (2007). *Characterization and utilization of a Bonner sphere set based on gold activation foils*. Radiation Protection Dosimetry **126**: 229-233.
- Tosi, G.; Torresin, A.; Agosteo, S.; Folgio Para, A.; Sangiust, V.; Zeni, L.; Silari, M. (1991). *Neutron measurements around medical electron accelerators by active and passive detection techniques*. Medical Physics **18**: 54-60.
- Vega-Carrillo, H.R.; Wehring, B.W.; Veinot, K.G. and Hertel, N.E. (1999). *Response matrix for a Multisphere spectrometer using a ^6LiF thermoluminescence dosimeter*. Radiation Protection Dosimetry **81**: 133-139.
- Vega-Carrillo, H.R. (2001). *Neutron energy spectra inside a PET cyclotron vault room*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **463**: 375-386.
- Vega-Carrillo, H.R. (2002). *TLD pairs, as thermal neutron detectors in neutron multisphere spectrometry*. Radiation Measurements **35**: 251-254.
- 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 HR; Hernández-Almaraz B; Hernández-Dávila VM; Ortíz-Hernández A. (2010a). *Neutron spectrum and doses in an 18 MV LINAC*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **283**: 261-265.

- Vega-Carrillo HR; Ortíz-Hernández A; Hernández-Dávila VM; Hernández-Almaraz B. (2010b). *H*(10) and neutron spectra around LINACs*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **283**: 537-540.
- Vega-Carrillo HR; Ortíz-Rodríguez JM; Martínez-Blanco MR. (2012). *NSDUAZ unfolding package for neutron spectrometry and dosimetry with Bonner spheres*. Applied Radiation and Isotopes **71**: 87-91.
- Vega-Carrillo, H.R., Pérez-Landeros, L.H. (2012). *Electroneutrons around a 12 MV LINAC*. Proceedings of the XIII International Symposium/XXIII National Congress on Solid State Dosimetry, **ISSSD 2012**. Oct. 15-19th, Estado de México, México: 26-29. (Available on the INIS from the International Atomic Energy Agency: http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:44026235).