

## Fotones y neutrones producidos durante la interacción de electrones de 10 y 15 MeV con una laminilla dispersora

Tzinnia Gabriela Soto-Bernal<sup>1\*/&</sup>, Antonio Baltazar-Raigosa<sup>3</sup>  
& Hector Rene Vega-Carrillo<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Programa de Doctorado en Ciencias Básicas

<sup>2</sup> Unidad Académica de Estudios Nucleares  
UAZ. Zacatecas, Zac, México

<sup>3</sup> Programa de Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada  
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
UAZ. Zacatecas, Zac. México

\*Buzón-e: [tzinnia.soto@gmail.com](mailto:tzinnia.soto@gmail.com), & [Becari@CONACyT](mailto:Becari@CONACyT)

### Resumen

Cuando un LINAC para radioterapia opera con voltajes de aceleración superiores a los 8 MV se producen neutrones como radiación secundaria. Estos depositan una dosis indeseable en el paciente. Dependiendo del tipo de tumor y su localización, el tratamiento con un LINAC se hace con haces de fotones o de electrones, que producen neutrones a través de reacciones ( $\gamma, n$ ) y ( $e, e'n$ ) respectivamente. Debido a que la sección eficaz de la reacción ( $\gamma, n$ ) es 137 veces mayor que la reacción ( $e, e'n$ ), la mayoría de los estudios se han enfocado a los fotoneutrones. Debido a la eficiencia radiobiológica de los neutrones, es importante determinar su producción en LINACs. El objetivo de este trabajo fue determinar las características de los fotones y neutrones que se producen cuando un haz de electrones de 2 mm de diámetro se hace incidir sobre una laminilla de tungsteno de 1 cm de diámetro y 0.5 mm de espesor localizada en el centro de un cascarón de tungsteno de 10 cm de espesor, usado para representar el cabezal del acelerador. El estudio se hizo mediante métodos Monte Carlo con el código MCNP6 para electrones de 10 y 15 MeV. Se estimaron los espectros de fotones y neutrones en 6 detectores puntuales, cuatro localizados en puntos equidistantes del centro de la laminilla, y dos a 50 cm y a 1 m del haz de electrones. Además, se determinaron los espectros de los fotones y neutrones producidos y con esto se calculó la dosis equivalente ambiental de los neutrones. Se observó que los fotones y neutrones producidos, así como la  $H^*(10)$  incrementan conforme se aumenta la energía de los electrones. Los neutrones se producen en mayor cantidad en el cascarón de tungsteno y algunos alcanzan a escapar del mismo.

**Keywords:** *Neutrones; Monte Carlo; Electrones; Dosis*

## 1.- INTRODUCCIÓN

Debido a su efectividad, la radioterapia es el tratamiento más utilizado para combatir al cáncer. Aproximadamente el 60% de los pacientes con cáncer reciben radioterapia en un LINAC como parte de su tratamiento [Amgarou, Lacoste, Martin, Asselineau y Donadille, 2009; Benites-Rengifo, Vega-Carrillo y Velazquez-Fernandez, 2012]. Un LINAC puede trabajar con electrones o fotones. Los electrones acelerados en un LINAC son utilizados para tratar tumores localizados en poca profundidad, y los fotones son utilizados para tumores localizados a mayor profundidad [Mesbahi *et al.*, 2010; Naseri y Mesbahi, 2010].

Sin embargo, la radioterapia con LINACs tiene algunas desventajas, como por ejemplo la producción no deseada de neutrones [Cardenas *et al.*, 2016]. Cuando un LINAC opera por arriba de los 8 MV, los electrones o los fotones tienen la energía suficiente para superar la energía de amarre de los neutrones ( $\sim 7$  MeV) en los núcleos de los materiales del cabezal, como el W y el Pb. Los isótopos del W y el Pb presentan en su sección eficaz la Resonancia Dipolar Gigante lo que propicia la generación de foto-neutrones y electro-neutrones por medio de reacciones ( $\gamma, n$ ) y ( $e, e'n$ ) respectivamente [Romero-Exposito *et al.*, 2015].

El principal problema con los neutrones es su alta efectividad biológica relativa y que al aumentar la energía del LINAC, también aumentan la cantidad de neutrones producidos y con ello el riesgo de inducción de un nuevo cáncer [Jao-Perng, Wei-Chung y Chun-Chi, 2007]. Debido a que la sección eficaz para producir fotoneutrones es aproximadamente 137 veces mayor que la sección eficaz para producir electroneutrones, la mayoría de los estudios se han concentrado en los fotoneutrones; sin embargo cuando el tratamiento es con electrones también se producen neutrones [NCRP, 1984; Seco y Verhaegen, 2013], ya que el haz de electrones se hace incidir sobre la laminilla dispersora donde se producen fotones mediante reacciones de colisión y radiación ( $e, X$ ) y los fotones a su vez producen fotoneutrones [Soto-Bernal *et al.*, 2017]. Además la interacción de los electrones con la laminilla dispersora hace que los electrones lleguen a los componentes internos del cabezal del LINAC, produciendo más fotones y neutrones.

El objetivo de este trabajo fue determinar las características de los fotones y los neutrones que se producen cuando un haz de electrones mono-energético de 2 mm de diámetro (pencil beam) se hace incidir sobre una laminilla de tungsteno de 1 cm de diámetro y 0.5 mm de espesor, colocada dentro de un modelo simple de un cabezal de LINAC.

## 2.- MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1.- Modelo del cabezal

Utilizando métodos Monte Carlo, con el código MCNP5 [X-5 Monte Carlo Team, 2003], se diseñó un modelo simple del cabezal de un LINAC [NCRP, 1984], como un cascarón de tungsteno ( $^{184}\text{W}$ ), con densidad  $19.3 \text{ g/cm}^3$ . El cascarón tiene 10 cm de espesor y 15 cm de radio interno. En el centro se ubicó una fuente mono-energética de electrones de energías de 10 y 15 MeV, y a 6 cm debajo de la fuente, se colocó una laminilla dispersora de tungsteno (1 cm diámetro y 0.05 cm de espesor), como se muestra en la figura 1.

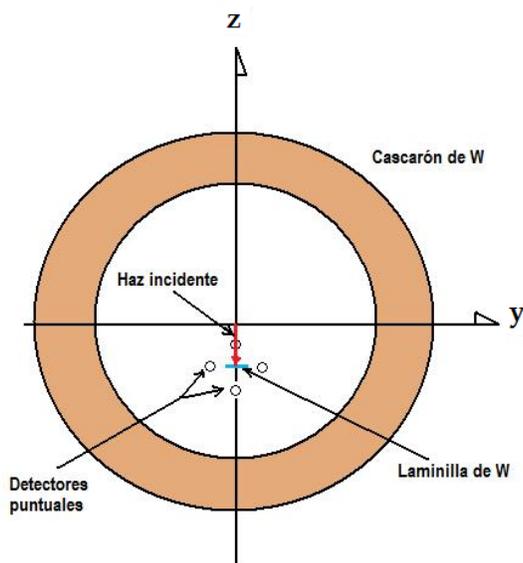


Figura 1. Modelo de simulación

A 3 cm del centro de la laminilla se modelaron 4 detectores puntuales colocados arriba, abajo, a la izquierda y a la derecha del centro de la laminilla. También se colocaron 2 detectores a 50 cm y a 100 cm hacia abajo del centro y fuera del cabezal. El propósito del detector colocado a 100 cm es para emular la posición del isocentro.

## 2.2.- Cálculos

En la simulación el haz de electrones, de 1 mm de radio se originó en el centro, y se hizo incidir sobre la laminilla dispersora. El modelo se ubicó en el vacío y en los cálculos se usaron  $2E(6)$  historias para tener incertidumbres menores al 5%.

En cada detector se estimaron los espectros de fotones y neutrones inducidos. Cada uno de los espectros se integró en energía para obtener las fluencias totales por cada electrón emitido por la fuente de electrones ( $Q_e$ ).

Para el cálculo de los espectros de neutrones se empleó la distribución de energía usada en el reporte 74 del ICRP [ICRP, 1996], la cual tiene 47 grupos de energía que abarcan desde  $10^{-9}$  a 20 MeV.

Para el caso de los fotones, los espectros se calcularon usando 81 grupos de energía de 0 a 20 MeV con intervalos constantes de 0.25 MeV.

La dosis equivalente ambiental  $H^*(10)$  debida a los neutrones, fue calculada a 1 m de la fuente de electrones. Este cálculo se realizó utilizando los coeficientes de conversión fluencia-a-dosis-equivalente-ambiental ( $h^*(10)(E)$ ), tomados del reporte 74 del ICRP [ICRP, 1996], y el espectro de neutrones ( $\Phi_E(E)$ ).

La dosis equivalente ambiental por historia, fue estimada utilizando la ecuación 1.

$$H * (10) = \int_{10^{-9}MeV}^{20MeV} \Phi_E(E) h * (10)(E) dE \quad (1)$$

### 3.- RESULTADOS

En las figuras 2 y 3, se muestran los espectros de los fotones, por historia, en los cuatro detectores puntales cuando el LINAC opera a 10 y 15 MV respectivamente.

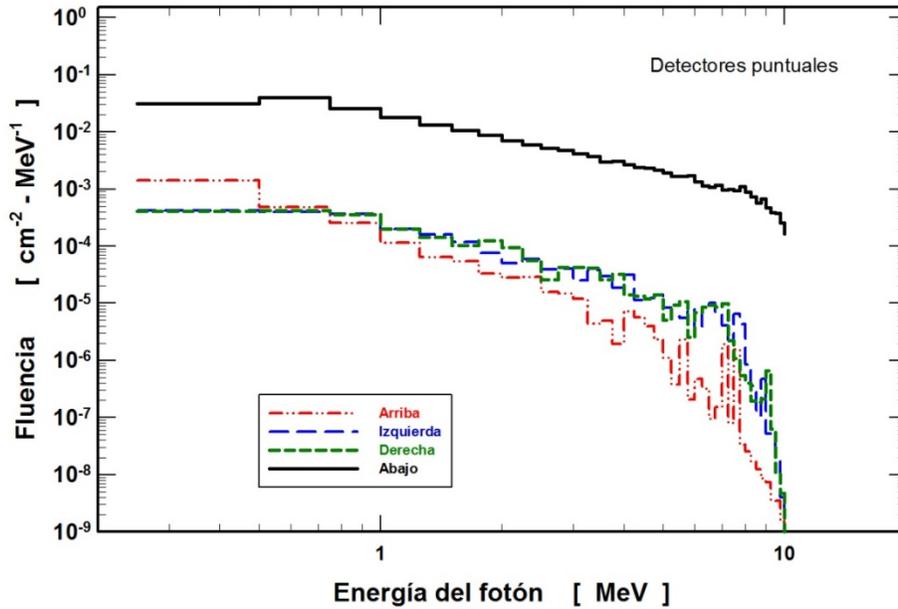


Figura 2. Espectros de los fotones producidos con el haz de electrones de 10 MeV.

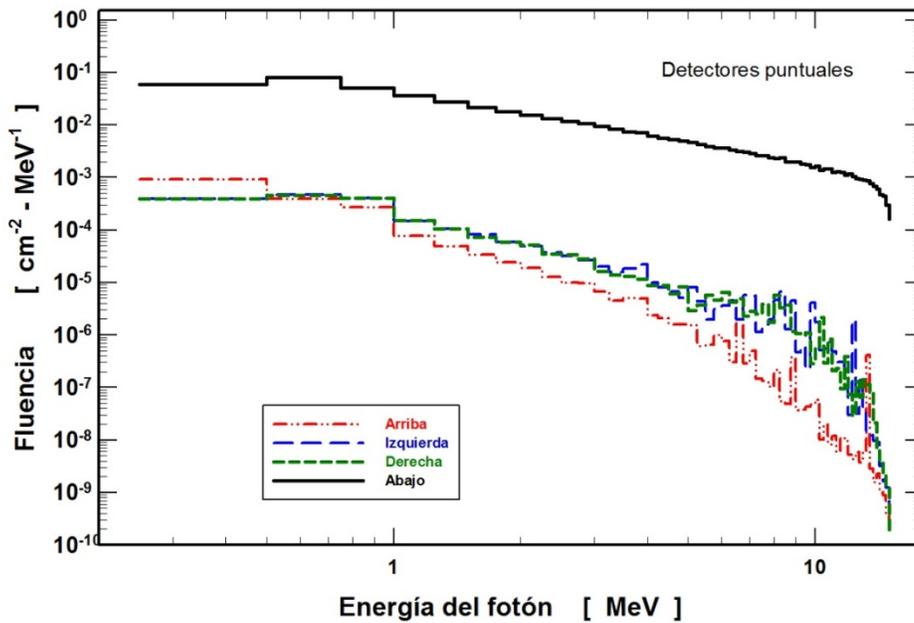


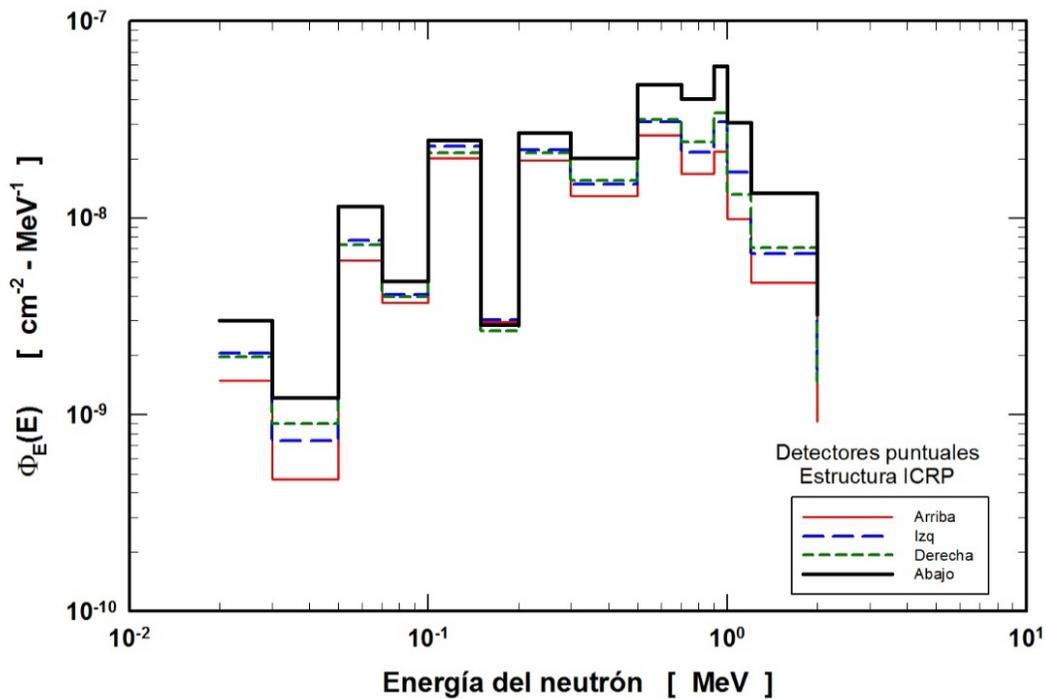
Figura 3. Espectros de los fotones producidos con el haz de electrones de 15 MeV.

En la tabla 1 se muestran los valores de la fluencia de fotones, por historia, en los 6 detectores.

Tabla 1.- Fluencia de fotones en los detectores

FLUENCIA DE FOTONES [ $\gamma/\text{cm}^2\text{-Q}$ ]						
Energía de haz incidente	Detector arriba	Detector izquierda	Detector derecha	Detector abajo	50 cm	100 cm
10 MeV	2.55E-03±	2.16E-03±	2.25E-03±	2.13E-01±	3.64E-07±	7.01E-08±
	3.35E-05	4.02E-05	4.45E-05	1.02E-03	4.99E-09	7.85E-10
15 MeV	1.85E-03±	1.98E-03±	1.96E-03±	4.76E-01±	9.75E-07±	1.85E-07±
	7.42E-06	1.98E-05	1.88E-05	9.99E-04	7.41E-09	1.61E-09

En las figuras 4 y 5 se muestran los espectros de neutrones, por historia, en los cuatro detectores puntales en torno a la laminilla, para el haz de electrones de 10 y 15 MeV respectivamente.



**Figura 4.** Espectro de neutrones con estructura ICRP74 para haz de electrones de 10 MeV.

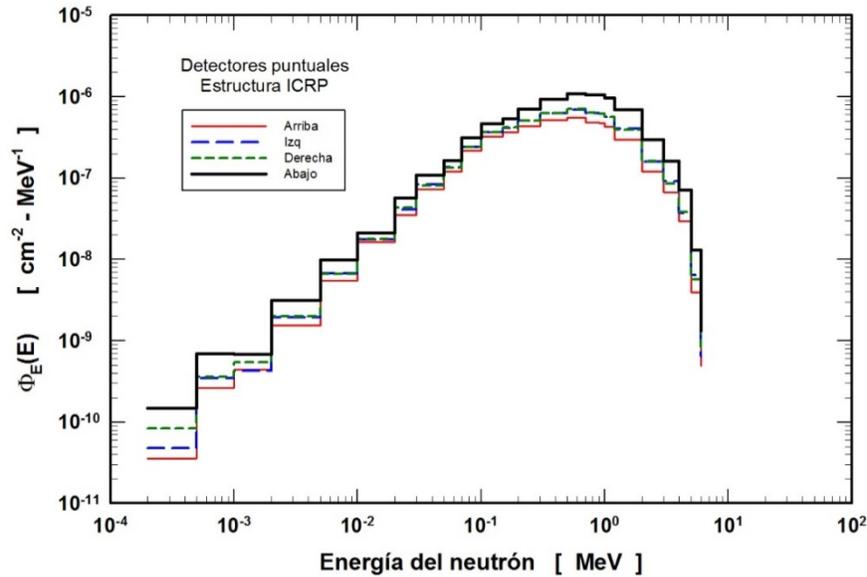


Figura 5. Espectro de neutrones con estructura ICRP74 para haz de electrones de 15 MeV.

En las figuras 6 y 7 se muestran los espectros de neutrones, por unidad de letargia y por historia, en los dos detectores puntuales localizados a 50 cm y 100 cm del centro del cabezal del LINAC, para el haz de electrones de 10 y 15 MeV respectivamente.

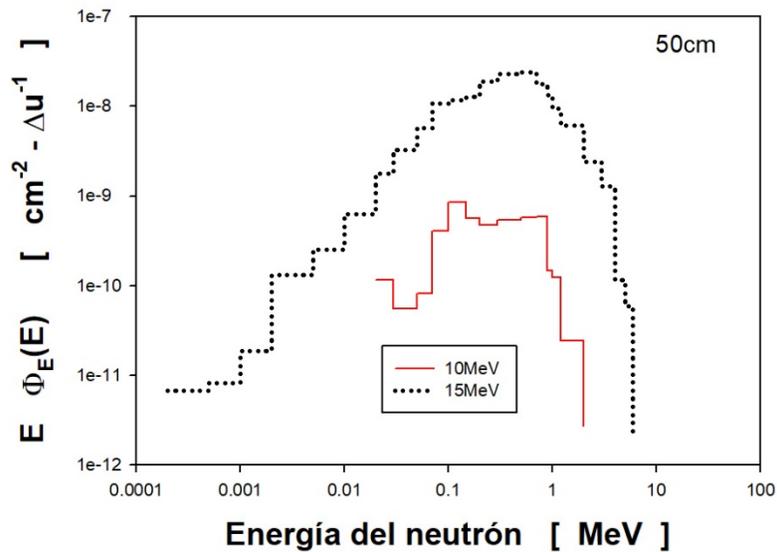
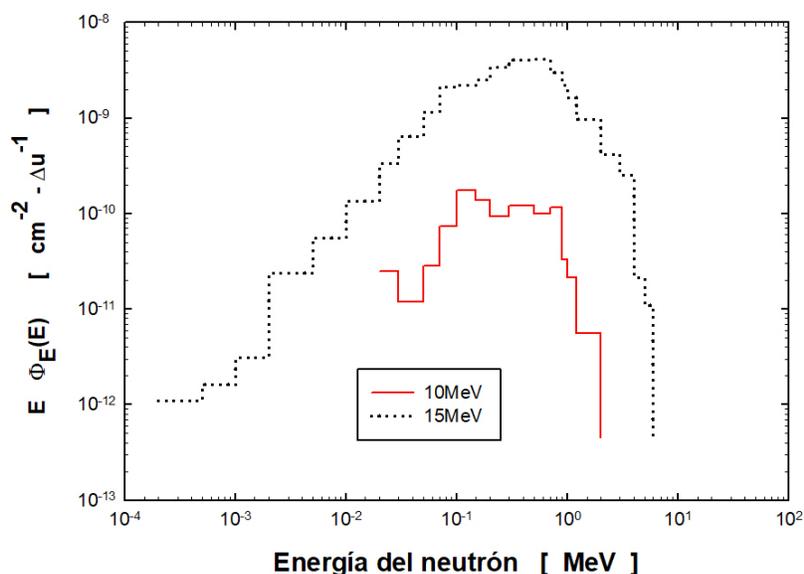


Figura 6. Espectro de neutrones a 50 cm producidos por electrones de 10 y 15 MeV.



**Figura 7.** Espectro de neutrones a 100 cm producidos por electrones de 10 y 15 MeV.

En la tabla 2 se presentan las fluencias de neutrones, por historia, en los 6 detectores.

Tabla 2.- Fluencia de neutrones, por historia, en los 6 detectores

FLUENCIA DE NEUTRONES [n/cm <sup>2</sup> -Q]						
Energía de haz incidente	Detector arriba	Detector izquierda	Detector derecha	Detector abajo	50 cm	100 cm
10 MeV	4.77E-08±	5.82E-08±	5.82E-08±	8.56E-08±	1.62E-09±	3.36E-10±
	1.09E-08	1.23E-08	1.29E-08	1.63E-08	3.99E-10	7.71E-11
15 MeV	1.53E-06±	1.88E-06±	1.87E-06±	2.84E-06±	5.67E-08±	1.03E-08±
	2.99E-08	3.43E-08	3.33E-08	4.57E-08	1.31E-09	2.13E-10

En las figura 8, se muestra la gráfica de contorno de la distribución espacial de la fluencia de electrones producidos en el LINAC de 15 MV. En el origen se encuentra la fuente de electrones, que emite electrones de 15 MeV hacia abajo, y a 6 cm (donde está la laminilla dispersora) el haz delgado de electrones (*pencil beam*) adquiere una distribución más ancha por la dispersión de los electrones en la laminilla.

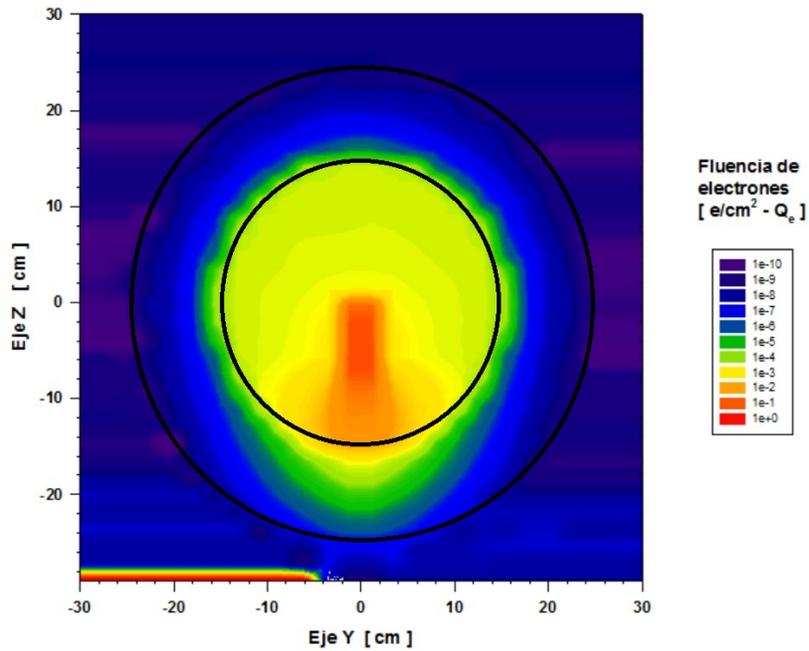


Figura 8. Distribución de los electrones de 15 MeV.

En la figura 9 se presenta la gráfica de contorno de la distribución de la fluencia de fotones, por cada electrón emitido ( $Q_e$ ), producidos en el LINAC operando a 15 MV.

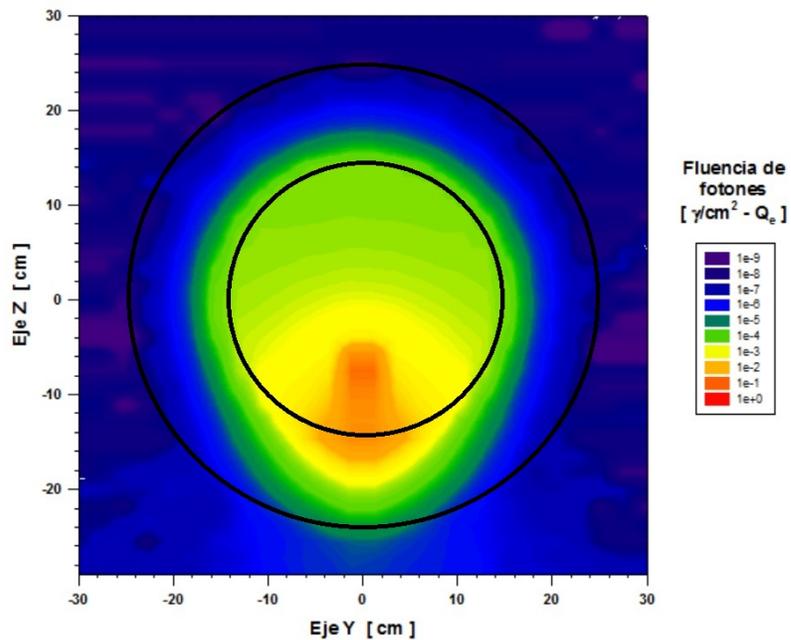
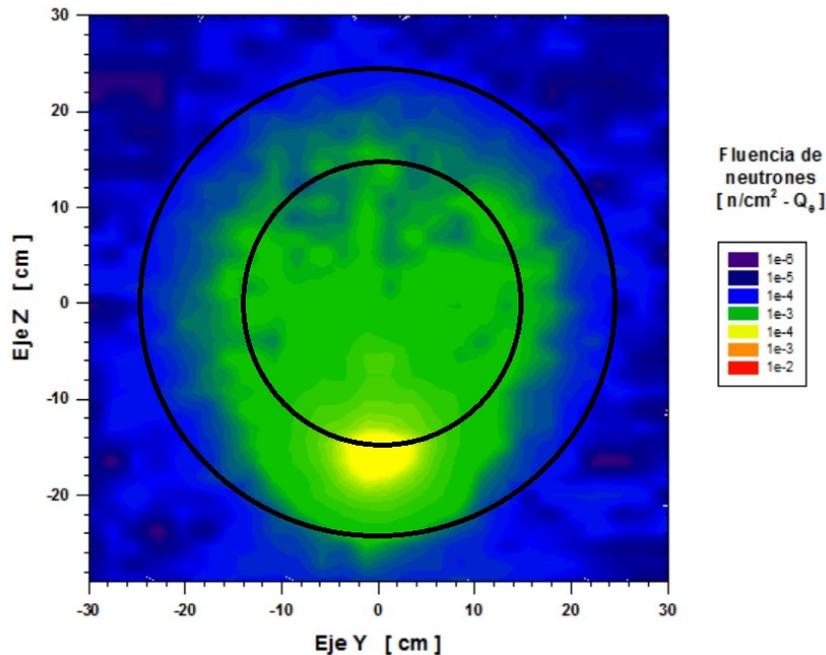


Figura 9. Distribución de los fotones.

La gráfica de contorno de la distribución espacial de la fluencia de neutrones, por cada electrón emitido ( $Q_e$ ), producidos en el LINAC operando a 15 MV se muestra en la figura 10.



**Figura 10.** Distribución de los neutrones

A 100 cm de la fuente, la dosis equivalente ambiental por historia debido a los neutrones es de  $2.47E(-07)$  pSv y  $1.77E(-06)$  pSv cuando el LINAC opera con el haz de electrones a 10 y 15 MV respectivamente. La  $H^*(10)$  por neutrones del LINAC de 15 MV es aproximadamente 7.2 veces mayor que la dosis del LINAC cuando opera a 10 MV.

## 4.- DISCUSIÓN

En las figuras 2 y 3 se observa que la máxima energía de los fotones corresponde a la máxima energía de los electrones incidentes, y la mayor cantidad de los fotones se observaron en el detector puntual ABAJO indicando, que como lo establecen Seco y Verhaegen [2013], la

mayor cantidad de fotones se produce en la misma dirección que la del haz de electrones incidentes.

De los valores de la tabla 1 se observa que el detector de abajo, la cantidad de fotones es aproximadamente 83, 99 y 95 veces mayor que la fluencia de fotones en los detectores de arriba, izquierda y derecha respectivamente para el caso de LINAC de 10 MV. Para el caso del LINAC de 15 MV, estos valores son 257, 240 y 243 veces mayor. Lo que implica la fluencia de fotones en los detectores ubicados dentro del cabezal es entre 2.2 y hasta 3.1 veces mayor en el LINAC de 15 MV que cuando el LINAC opera a 10 MV.

Para el caso de los detectores ubicados a 50 y 100 cm de distancia encontramos que la fluencia de fotones del LINAC de 15 MV es aproximadamente 2.6 veces mayor que la fluencia de fotone producido cuando el LINAC opera a 10 MV. Independientemente del voltaje del LINAC la fluencia de fotones a 50 cm es aproximadamente 5.2 veces mayor que la fluencia a 100 cm, este factor se aleja del comportamiento de la ley del cuadrado de la distancia, la probable explicación la atribuimos a que cuando los fotones interactúan con el cascaron de W del cabezal, estos son dispersados (Figura 9) hacia la ubicación de los detectores.

En las figuras 4 y 5 se observa que mayor cantidad de neutrones se encontró debajo de la laminilla, la menor cantidad en el detector ubicado arriba. Existe simetría en los espectros determinados a la izquierda y a la derecha de la laminilla. Observando los valores de las fluencias de neutrones (Tabla 2) se puede inferir que durante la interacción del haz de electrones con la laminilla dispersora los neutrones que se producen tienen una distribución angular, donde la mayor cantidad se produce en la dirección del haz incidente de los electrones que es aproximadamente 1.8 veces mayor que la fluencia de neutrones en el detector de arriba y es 1.5 mayor que la fluencia de neutrones en los detectores laterales para los LINACs de 10 y 15 MV.

Para LINACs de 10 y 15 MV, la fluencia de neutrones en los detectores localizados a 50 cm y 100 cm de la fuente de electrones (Tabla 2) es aproximadamente 5 veces mayor que la

fluencia de neutrones a 100 cm, este valor es mayor que el esperado por la ley del inverso del cuadrado de la distancia, que debería ser de 4. La probable explicación de esta diferencia la atribuimos a que los neutrones son producidos principalmente en el cabezal, y no únicamente en la laminilla dispersora como es en el caso de los fotones, lo que propicia que haya dispersión de neutrones en el cabezal y algunos de estos alcanzan los detectores ubicados a 50 y 100 cm.

Conforme aumenta la energía del LINAC, también aumenta la fluencia de neutrones, tal y como ha sido señalado por Jao-Perng *et al.*, [2007]. En la tabla 2 se observa que para cualquier detector dentro del cabezal, la fluencia de neutrones en el LINAC de 15 MV es aproximadamente 32 veces mayor que la fluencia de neutrones producida con el LINAC de 10 MV. Estos valores cambian a 35 y 31 para el caso de los detectores a 50 y a 100 cm..

En la figura 8 se observa que la mayor cantidad de electrones va en la dirección del haz incidente, donde algunos electrones penetran el cascarón de W del cabezal y unos cuantos se escapan de éste en la dirección del haz. También se observa una menor cantidad de electrones que son retrodispersados y que son frenados por el W del cabezal. En forma cualitativa también se observa que la función de la laminilla dispersora es recibir un haz de electrones tipo *pencil beam* y aumentar su distribución espacial debajo de la laminilla, produciendo un efecto similar al de una regadera.

En la figura 9 se aprecia que los fotones son producidos en la laminilla y la mayoría se produce en la dirección del haz incidente de electrones (hacia abajo). Algunos fotones se escapan del cabezal. Otros fotones son emitidos en mayor medida hacia la izquierda y la derecha y en menor medida hacia arriba. Todos los fotones penetran el cabezal y algunos se escapan de éste, pero la mayoría se escapa hacia abajo.

Soto-Bernal *et al.*, [2017] reportaron que sin el cascarón de tungsteno, la fluencia de neutrones en los detectores puntuales localizados alrededor de la laminilla dispersora es casi igual, lo que significa que los neutrones son emitidos de manera casi isotrópica. Sin embargo, cuando se agrega el cascarón la mayor cantidad de neutrones se hace presente en el detector

de abajo. En la figura 10 se muestra la distribución de los neutrones que se producen en su mayoría en la zona del cascarón de tungsteno, también se observa que algunos se producen en la laminilla. En la zona del cascarón se nota que la producción es isotrópica. Los neutrones penetran el cascarón y se nota que hay fuga de neutrones en todas las direcciones.

La fluencia total de neutrones producidos a 100 cm de la fuente es mayor que la producida a 50 cm, esto es para ambas energías. Y la fluencia de neutrones, para el haz de 15 MeV, a 100 cm de la fuente es aproximadamente 30.65 veces mayor que la fluencia a la misma distancia pero para el haz de 10 MeV. Esta diferencia ocasiona que la dosis equivalente ambiental debida a los neutrones para los electrones de 15 MeV sea aproximadamente 17.17 veces mayor que la dosis equivalente ambiental debida a los neutrones producidos por el haz de 10 MeV.

## 5.- CONCLUSIONES

Usando un modelo simple de un cabezal de LINAC se estimaron, mediante métodos Monte Carlo, los espectros de fotones y de neutrones que se producen cuando haces de electrones de 10 y 15 MeV interactúan con una laminilla dispersora. También, se estimó la distribución espacial de los electrones, los fotones y los neutrones y la  $H^*(10)_n$  a 50 y 100 cm del centro del cabezal. A partir de la evidencia mostrada, las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- La laminilla ensancha el haz de los electrones incidentes (efecto Regadera).
- En su interacción con la laminilla, los electrones producen fotones por *Bremsstrahlung*, la mayoría de los electrones y de los fotones se producen en la dirección de haz incidente. En estas interacciones producen neutrones de evaporación principalmente en el interior del cascarón de W y en menor medida en la laminilla.

- Los neutrones producidos tienen una distribución casi isotrópica en el cascarón y logran escaparse del mismo.
- Conforme aumenta la energía de los electrones del haz incidente, la cantidad de fotones y neutrones también aumenta. Por lo tanto la  $H^*(10)_n$  también aumenta.

### Agradecimientos

Tzinnia Gabriela Soto Bernal agradece al CONACYT por la beca de estudios otorgada para la realización del doctorado en ciencias básicas, dando lugar a este trabajo de investigación como parte del proyecto de titulación. Todos los autores agradecen al COZCyT el apoyo recibido para la participación en diferentes eventos científicos.

### REFERENCIAS

- Amgarou, K., Lacoste, V., Martin, A., Asselineau, B. y Donadille, L., (2009). *Neutron spectrometry with a passive Bonner sphere system around a medical LINAC and evaluation of the associated unfolding uncertainties*. IEEE Transactions on Nuclear Science **56**: 2885-2895.
- Benites-Rengifo, J. L., Vega-Carrillo, H. R., Velazquez-Fernandez, J. B., (2012). *Spectra of photons and neutrons generated in a heterogeneous head of a 15 MV LINAC at different field sizes*. American Institute of Physics **1494** : 8-11.
- Cardenas, C.E., Nitsch, P.L., Kudchadker, R.J., Howell, R.M., Kry, S.F. (2016). *Out-of-field doses and neutron doses equivalents for electron beams from modern Varian and Elekta linear accelerators*. Journal of Applied Clinical Medical Physics **17**: 442- 445.
- Jao-Perng, L., Wei-Chung, L. y Chun-Chi, L., (2007). *Investigation of photoneutron dose equivalent from high-energy photons in radiotherapy*. Applied Radiation and Isotopes **65** : 599-604.
- ICRP, (1996). *Conversion coefficients for use in Radiological Protection against external radiation*. Annals of the ICRP **26**: 184-200.

- 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.
- Naseri, A., Mesbahi, A. (2010). *A review on photoneutrons characteristics in radiation therapy with high-energy photon beams*. Reports on Practical Oncology and Radiotherapy **15**: 138-144.
- NCRP. (1984). *National Council on Radiation Protection and Measurements. Report No. 79*. Bethesda MD, USA.
- Romero-Exposito, M., Sanchez-Nieto, B., Terron, J. A., Lopes, M. C., Ferreira, B. C., Grishchuk, D., Sandin, C., Moral-Sanchez, S., Melchor, M., Domingo, C., Gomez, F. y Sanchez-Doblado, F., (2015). *Commissioning the neutron production of a LINAC: Development of a simple tool for second cancer risk estimation*. Medical Physics **42**: 276-281.
- Seco, J. y Verhaegen, F. (2013). *MONTE CARLO TECHNIQUES IN RADIATION THERAPY*. CRC Press. London.
- Soto-Bernal, T.G., Baltazar-Raigosa, A., Medina-Castro, D., Vega-Carrillo, H.R., (2017). *Neutron production during the interaction of monoenergetic electrons with a Tungsten foil in the radiotherapeutic energy range*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **868**: 27-38.
- X-5 Monte Carlo Team, (2003). *MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5*. Los Alamos National Laboratory.