



MX0300316

DETERMINACIÓN DE LOS ESPECTROS DE NEUTRONES EN LA SALA DE TRATAMIENTO DE UN ACELERADOR LINEAL PARA RADIOTERAPIA

Héctor René Vega-Carrillo¹, Raquel Barquero², Roberto Méndez³, María Pilar Iñiguez³

¹Unidades Académicas: Estudios Nucleares, Ing. Eléctrica y Matemáticas
Cuerpo Académico de Radiobiología de la Universidad Autónoma de Zacatecas
Apdo. Postal 336, 98000 Zacatecas, Zac. México
Buzón electrónico: rvega@cantera.reduaz.mx

²Hospital Universitario Río Hortega, Valladolid, España

³Departamento de Física Teórica, Atómica, Molecular y Nuclear
Universidad de Valladolid, 47011 Valladolid, España

Resumen

Mediante una serie de medidas y cálculos Monte Carlo se han determinado las características dosimétricas de los fotoneutrones que se producen en torno a un acelerador lineal de radioterapia de 18 MV, LINAC, marca Siemens modelo Mevatron. Las medidas se realizaron con dosímetros termoluminiscentes TLD 600 y TLD 700 que se expusieron desnudos y emparedados con cubiertas de Cd y Sn, dentro de una esfera de parafina y dentro de esferas Bonner.

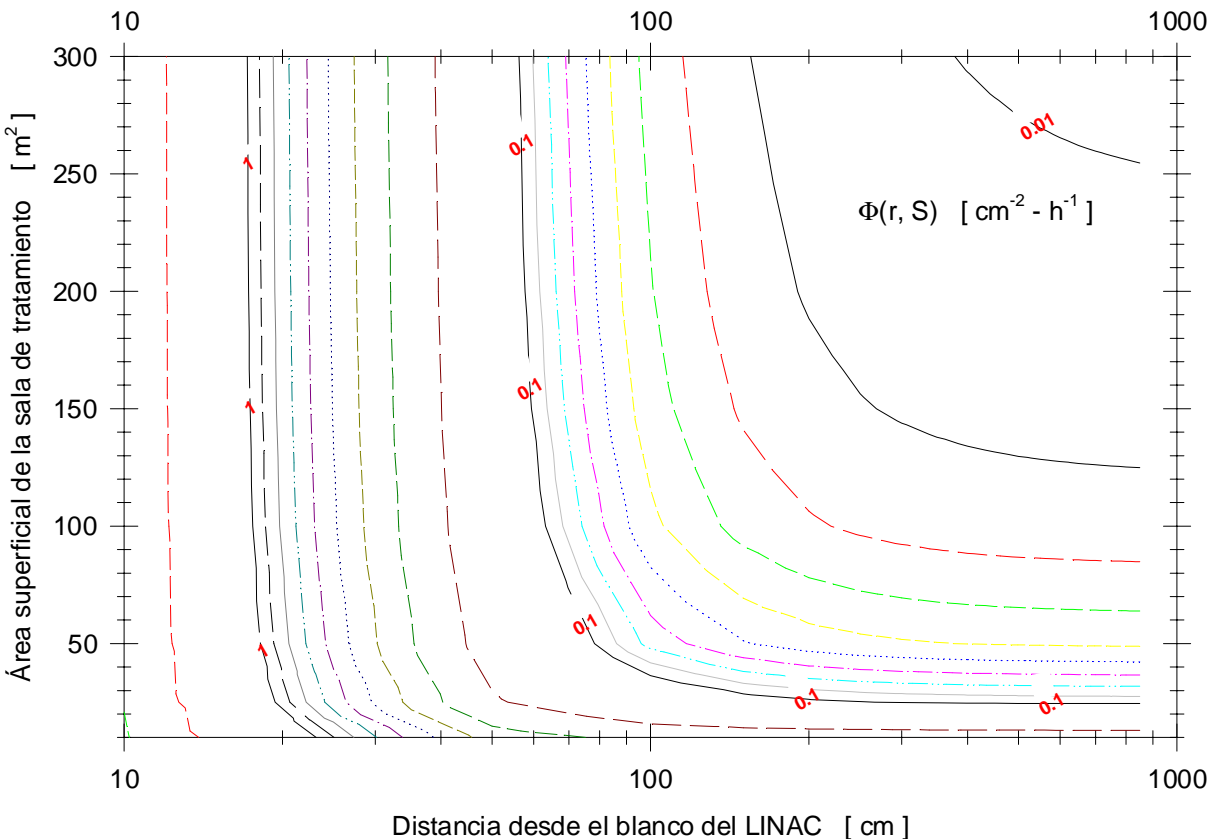
1.- INTRODUCCIÓN

La radioterapia utiliza la radiación ionizante para eliminar las células cancerosas, depositando una dosis letal en un volumen localizado, sin afectar el tejido sano que lo rodea, permitiendo así el control o erradicación de la enfermedad. (Lenox, 2001, Nath *et al.*, 1984)

A pesar de los avances científicos y tecnológicos y las investigaciones que se realizan para abatir el cancer, la radioterapia con haces de fotones y electrones, producidos en aceleradores lineales, es la técnica más difundida para el control y el tratamiento de tumores malignos (Ognaro, *et al.*, 2000, McGinley, *et al.*, 1976).

Las máquinas de radioterapia de rayos X de alta energía que operan a voltajes superiores a 6 MV, generan neutrones mediante reacciones fotonucleares que exponen al paciente a una dosis no despreciable (Price, *et al.*, 2000, Nath *et al.*, 1984, McGinley, *et al.*, 1976).

En general, la producción neutrónica por reacciones nucleares inducidas por electrones tiene una sección eficaz que es 1/137 veces la correspondiente a reacciones fotonucleares que se describe mediante la resonancia gigante. En el isocentro, IC, la fluencia de neutrones está dada por la suma de la fluencia de neutrones producidos directamente en el cabezal del acelerador, la fluencia de los neutrones dispersados por los materiales del acelerador y de la sala de tratamiento y la de los neutrones térmicos producidos por la moderación de los anteriores más energéticos (Lin, *et al.*, 2001, McGinley, *et al.*, 1998). En cualquier punto dentro de la sala de tratamiento la tasa total de fluencia de neutrones depende de la distancia entre el punto de interés y el blanco del acelerador y de la superficie de la sala. La fluencia total es el resultado de tres componentes: Los neutrones que sin colisionar salen del blanco y alcanzan el punto de interés, los neutrones que interactúan con los materiales del cabezal del acelerador y aquellos que son transportados por toda la sala, interactúan con los muros de la misma y alcanzan el punto de interés con energías epitérmicas y térmicas. La tasa total de fluencia dentro de una sala de tratamiento para un acelerador lineal se puede estimar a partir de la figura 1.



et al., 2001, McGinley, 1998, Mao *et al.*, 1997, Agosteo, *et al.*, 1995), evaluar la dosis

por neutrones en los pacientes bajo tratamiento, así como en el personal que trabaja en la instalación del acelerador (McGinley *et al.*, 1976).

En este estudio se determinaron las características dosimétricas de los neutrones en la sala de tratamiento de un acelerador lineal de 18 MV para radioterapia. La caracterización se realizó mediante una serie de medidas y cálculos Monte Carlo.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Experimentos

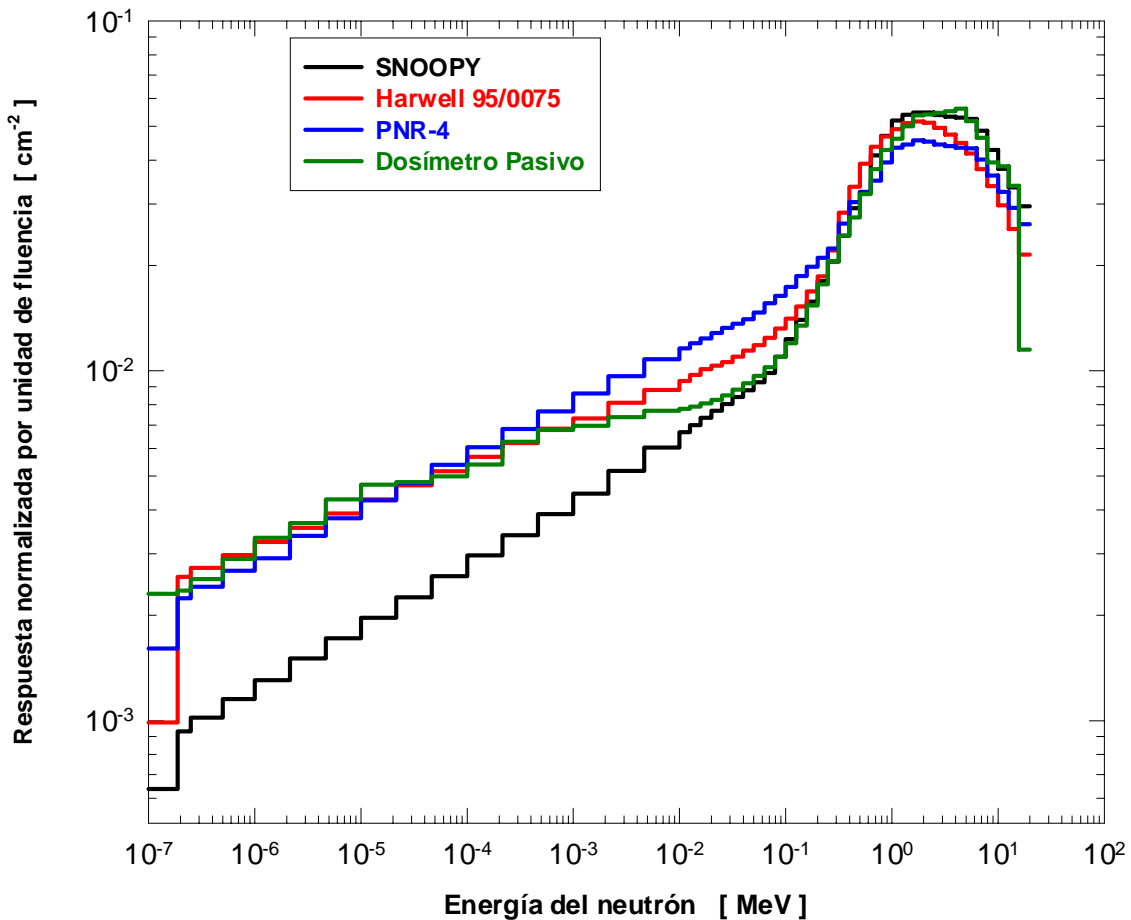
El Hospital Universitario de Valladolid instaló en 1993 un acelerador lineal de electrones Siemens modelo Mevatron KD-S que acelera electrones a 6, 8, 10, 12, 14 y 18 MeV. También se utiliza para producir haces de rayos X de 6 y 18 MV cuando los electrones se frenan en un blanco de Au-W. El sistema de colimación permite tener campos de tratamiento que van desde 10 x 10 a 40 x 40 cm². Cuando el acelerador opera a 18 MV se obtiene en el IC una dosis nominal de 180 Gy/h. El acelerador se encuentra en una sala de tratamiento con muros de hormigón de 2.34, 3.68 y 3.73 g/cm³, la puerta tiene un blindaje a base de parafina, plomo y cadmio para reducir los niveles de radiación X y neutrones (Barquero, 2002).

Para medir la fluencia de neutrones térmicos se utilizaron parejas de dosímetros termoluminiscentes TLD 600 y TLD 700 que se expusieron desnudas y emparedadas entre discos de Cd de 3.2 cm de diámetro y 0.05 cm de espesor. Para el caso de los TLD desnudos las condiciones de equilibrio electrónico se obtuvieron sustituyendo las cubiertas de Cd por cubiertas de Sn ya que este material es un débil absorbente de neutrones y su presencia permite obtener la condición del equilibrio electrónico para los fotones (Méndez *et al.*, 2002, Barquero *et al.*, 2002),. Las lecturas de los TLDs se realizaron en dos zonas diferentes de la curva de brillo. En la convencional utilizada para fotones (pico 5) y en la denominada del pico de alta temperatura (pico 6), que permite obtener la respuesta neutrónica sin la contribución de fotones (Barquero *et al.*, 2002).

Para determinar la dosis asociada a todos los neutrones se utilizaron parejas de TLD 600 y TLD 700 colocadas en el centro de una esfera de parafina de 25 cm diámetro, en la figura 2 puede verse una fotografía del procedimiento.



Figura 2.- Medida de la dosis equivalente con la esfera de parafina con los TLDs. Como ha sido demostrado por Vega-Carrillo y Becerra-Ferreiro (2001) una esfera de material hidrogenado de 25.4 cm de diámetro con un detector de neutrones térmicos en su centro tiene una respuesta similar a los remmeters comerciales. Así se construyó un dosímetro pasivo esférico con 25.4 cm de diámetro, el dosímetro se fabrica con parafina como moderador y con pares de TLDs en su centro. La respuesta de este dispositivo se muestra en la figura 3.



la dosis impartida por los neutrones en el paciente se incluyen las medidas realizadas en el IC, y en otros 6 sitios ubicados en la camilla y que se identifican por los números 20, 21, 22, 23, 24 y 25. La situación de los puntos se muestra en la figura 4.

Los espectros de los neutrones se midieron en 4 sitios dentro de la sala, los puntos 12, 14 y 15 y a 100 cm del cabezal del acelerador a 180°, y en el sitio 2, no mostrado en la figura 2, (plano del cabezal). Para estas medidas se utilizaron 6 esferas de polietileno de 0, 3, 5, 8, 10 y 12" de diámetro con pares de TLDs, 600 y 700, en su centro. La esfera de 0" de diámetro representa los pares de TLDs desnudos. Las diferencias entre los valores de las lecturas de los TLD600 y TLD700 se utilizaron para reconstruir los espectros. La reconstrucción se realizó con el código BUNKIUT y el código CATALOG de la Universidad Autónoma de Zacatecas (Vega-Carrillo and Iñiguez, 2002, Vega-Carrillo, 2001, 2002).

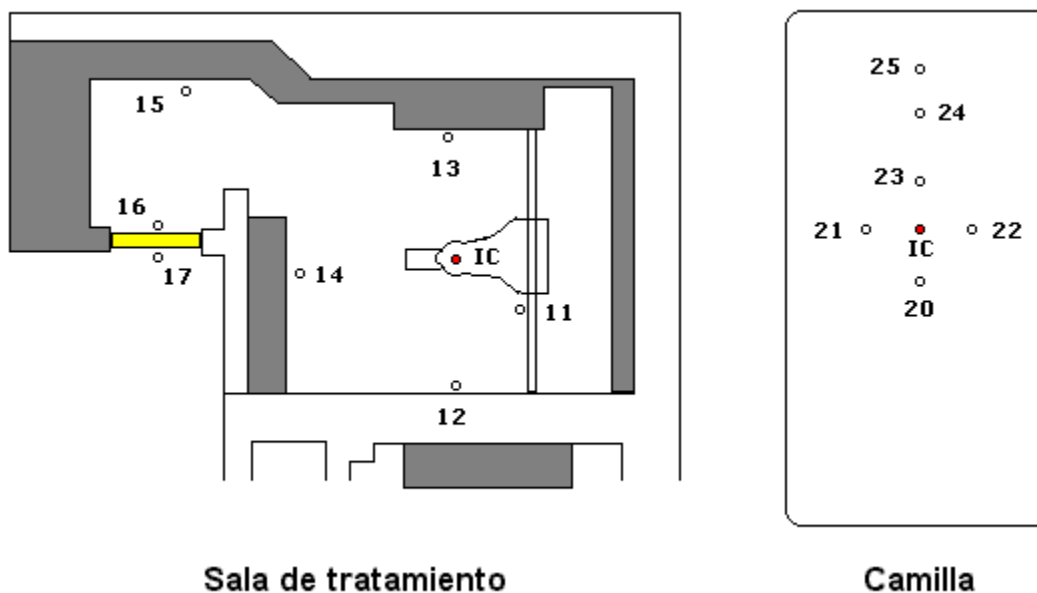


Figura 4.- Esquema de la sala de tratamiento y la camilla con los puntos donde se realizaron las determinaciones dosimétricas en el plano del paciente.

Dos tipos de dosímetros de burbujas, el BDT con respuesta a neutrones térmicos y el BD-PND con respuesta a neutrones de 0.2 a 14 MeV, se utilizaron para determinar las fluencias de neutrones y la dosis correspondientes en el IC (D'Errico *et al.*, 2001, Burgois *et al.*, 1997). Para esto, se colocaron en el IC dos pares de dosímetros de burbujas y se utilizaron dos regímenes de irradiación, uno con fotones de 18 MV y el otro con electrones de 18 MeV

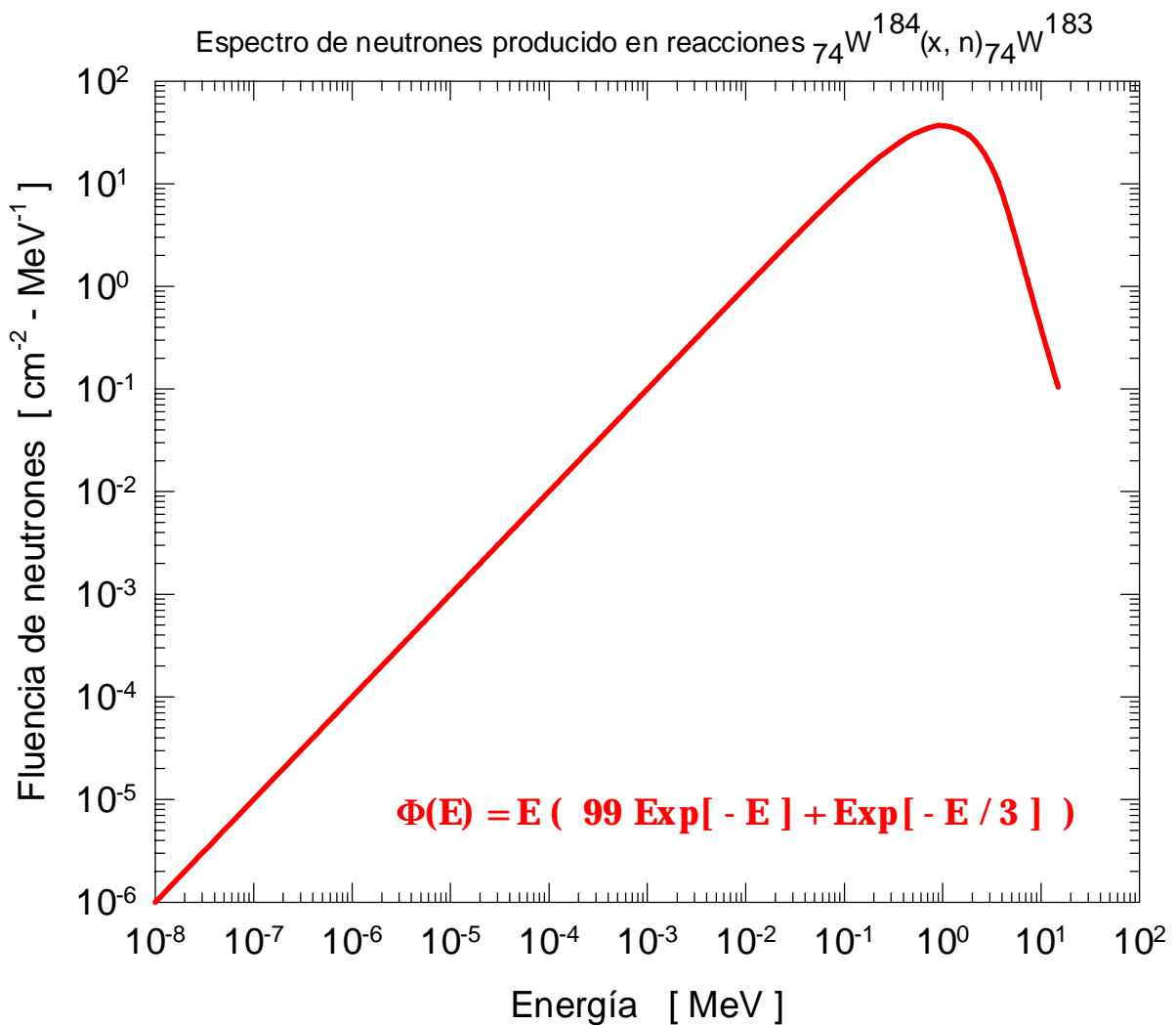
2.2.- Cálculos

Para el cálculo del transporte de los neutrones dentro del bunker se utilizó el código Monte Carlo MCNP 4C, con las secciones eficaces de los materiales de las bibliotecas ENDF-B/6 y NJOY (Briesmeister, 2000). El cabezal del acelerador se modeló como una esfera de 30 cm de radio de Tungsteno en cuyo centro se colocó el término fuente para neutrones. Éste, se definió mediante la suma ponderada de dos espectros de evaporación. Éste se define como,

$$\frac{dn}{dE} = a E \text{Exp}[- b E].$$

En esta función de distribución $n(E)$ es la cantidad de neutrones con energía entre E y $E+dE$, E es la energía de los neutrones en MeV, mientras que a y b son parámetros asociados a la amplitud y a la "dureza" del espectro. En la figura 5 se muestra el espectro de evaporación utilizado como término fuente.

La sala de radioterapia se modeló como un paralelepípedo regular de $900 \times 580 \times 250 \text{ cm}^3$ con muros de hormigón y se calcularon los espectros de neutrones con detectores de anillo. Los espectros calculados permitieron la determinación de las dosis por neutrones utilizando factores de conversión de fluencia a dosis (ICRP, 1995).



3.- RESULTADOS

3.1.- Experimentos

La fluencia de neutrones térmicos en el punto 13 medido con las técnicas del pico 5 y del pico 6, es de $2.40 \times 10^4 \pm 3\% \text{ cm}^{-2}\text{-s}^{-1}$.

La dosis debida a neutrones y a fotones por Gray de tratamiento medidas en la sala y en la camilla se muestran en la Tabla I. En ésta, se observa que en la camilla las dosis por neutrones son prácticamente iguales en todos los puntos excepto en los puntos 21, 23 y el IC, en donde la intensidad de fotones produce el ensombrecimiento de la señal de neutrones en los TLDs. Por ello no fue posible, con esta técnica, realizar las medidas en esos puntos. Mediante los detectores de burbujas en el IC y con el acelerador a 18 MV se obtuvieron fluencias de neutrones térmicos y rápidos de $7.31 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{-s}^{-1}$ y de $4.02 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{-s}^{-1}$ respectivamente que producen una dosis de 3.65 mSv/Gy. Con el acelerador funcionando con electrones de 18 MeV, las fluencias de neutrones térmicos y rápidos obtenidas en el isocentro fueron de $2.44 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}\text{-s}^{-1}$ y de $1.61 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}\text{-s}^{-1}$, respectivamente, que depositan una dosis de 2.41 mSv/Gy.

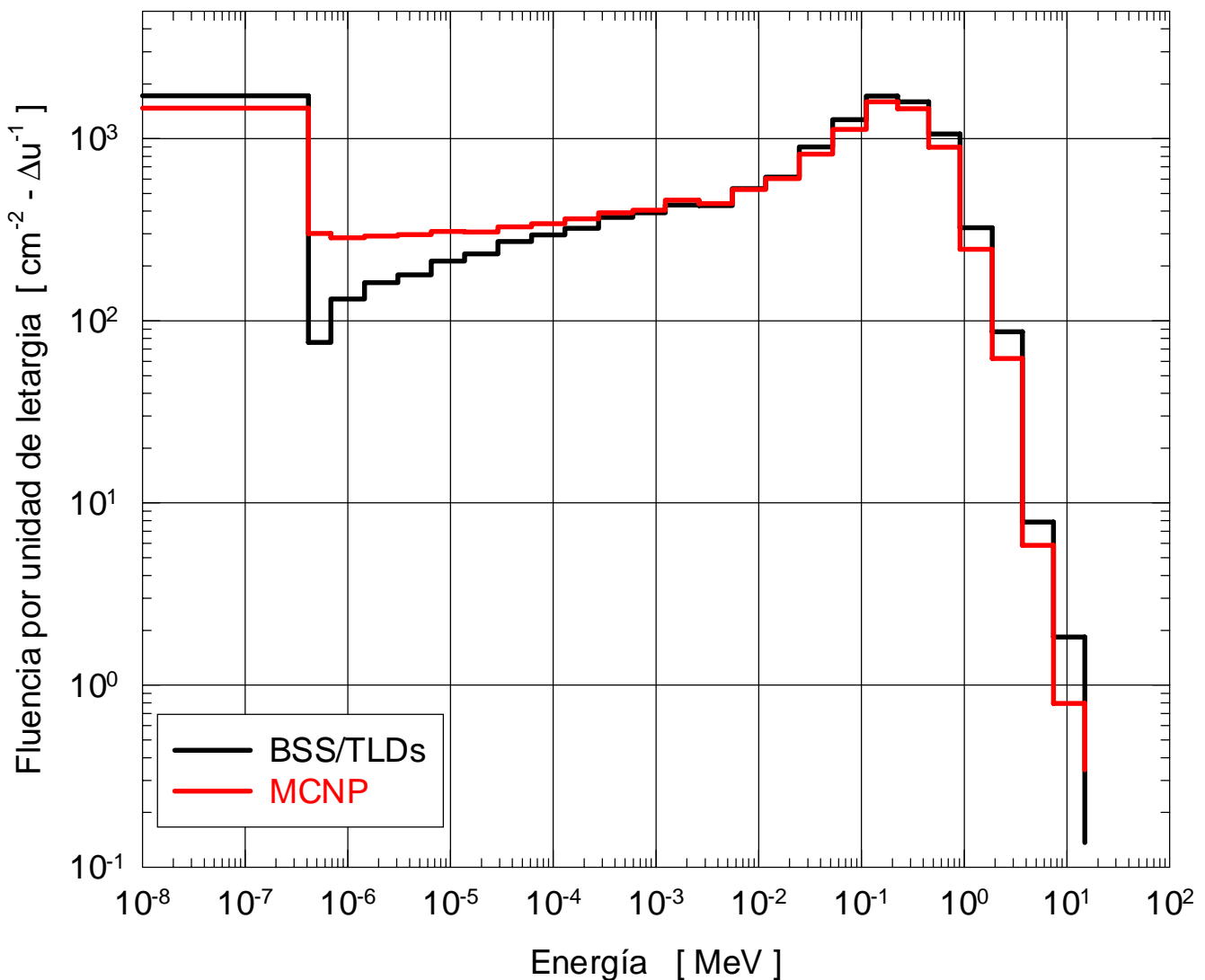
Tabla I.- Dosis por neutrones y fotones medidas con la esfera de parafina y pares de TLDs en la sala de tratamiento.

| Sitio | Dosis por neutrones [mSv/Gy] | Dosis por fotones [mSv/Gy] |
|-------|---------------------------------|-------------------------------|
| 11 | 0.19 ± 0.05 | 0.53 ± 0.05 |
| 12 | 0.13 ± 0.03 | 0.23 ± 0.02 |
| 13 | 0.16 ± 0.03 | 0.31 ± 0.03 |
| 14 | 0.04 ± 0.007 | 0.07 ± 0.007 |
| 15 | 0.01 ± 0.002 | 0.02 ± 0.002 |
| 16 | Fondo | Fondo |
| 17 | Fondo | Fondo |
| 20 | 0.22 ± 0.12 | 4.23 ± 0.18 |
| 21 | 0.78 ± 0.22 | 8.44 ± 0.42 |
| 22 | 0.45 ± 0.23 | 5.94 ± 0.30 |
| 23 | Imposible medir | 27.95 ± 2.01 |
| 24 | 0.45 ± 0.11 | 3.47 ± 0.17 |
| 25 | 0.30 ± 0.16 | 1.70 ± 0.18 |
| IC | Imposible medir | 982.2 ± 22.3 |

3.2.- Cálculos

Mediante cálculos Monte Carlo se determinaron los espectros de los neutrones en los cuatro sitios donde se midieron, pudiendo ver en la Figura 6 los espectros calculados y medido en el sitio 12. Ambos espectros presentan las mismas características: un pico en torno a 0.1 MeV y a mayores energías conserva la estructura del espectro de evaporación, mostrando también la presencia de neutrones epitérmicos y térmicos, que se deben a la degradación de energía de los neutrones que salen del cabezal e interactúan con el entorno al bunker.

En las Figuras 7 y 8 se muestran los espectros calculados y medidos en los sitios 14 y 15 respectivamente.



6.- tratamiento.

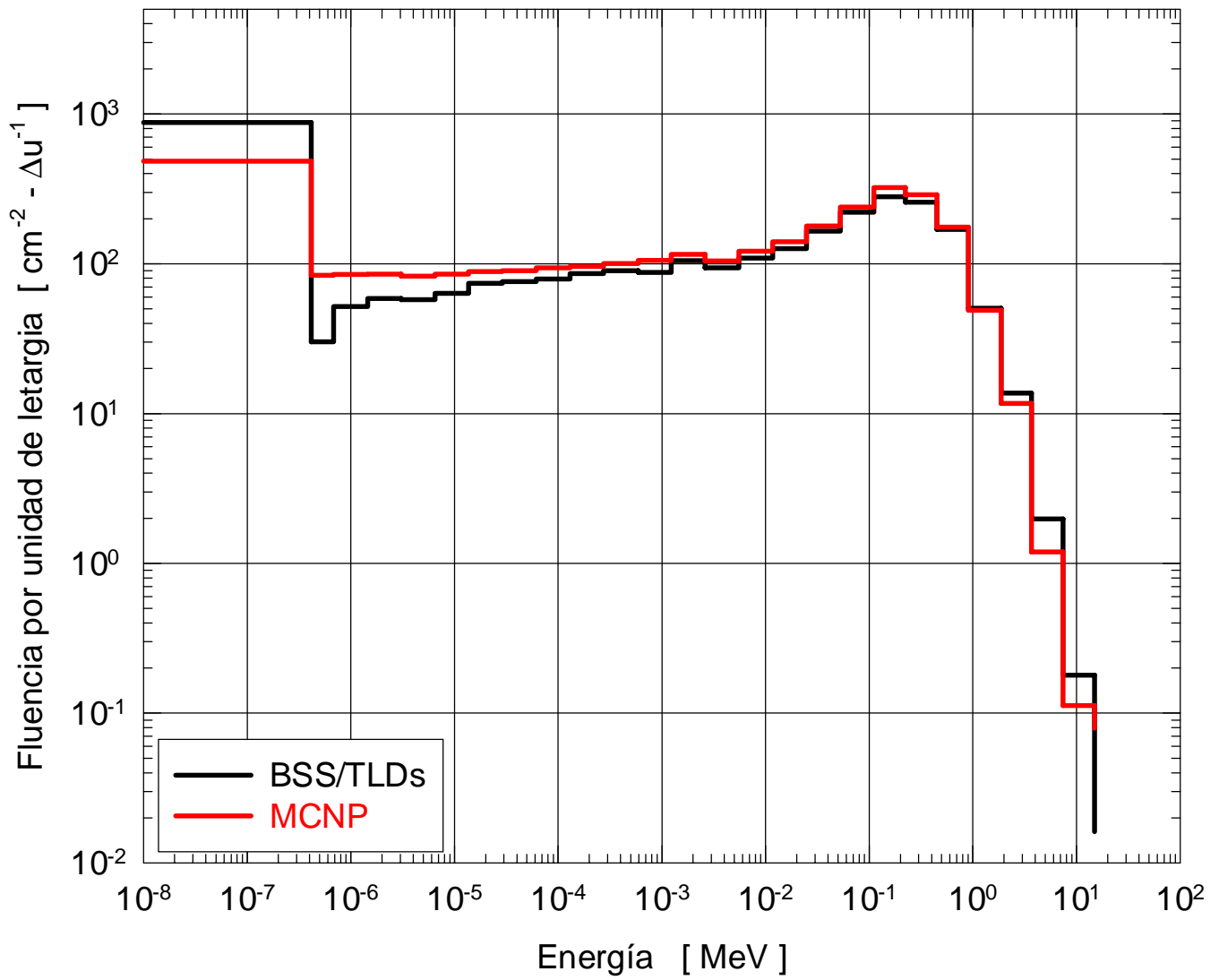


Figura 7.- Espectros medidos y calculados de neutrones en el sitio 14 en la sala de tratamiento.

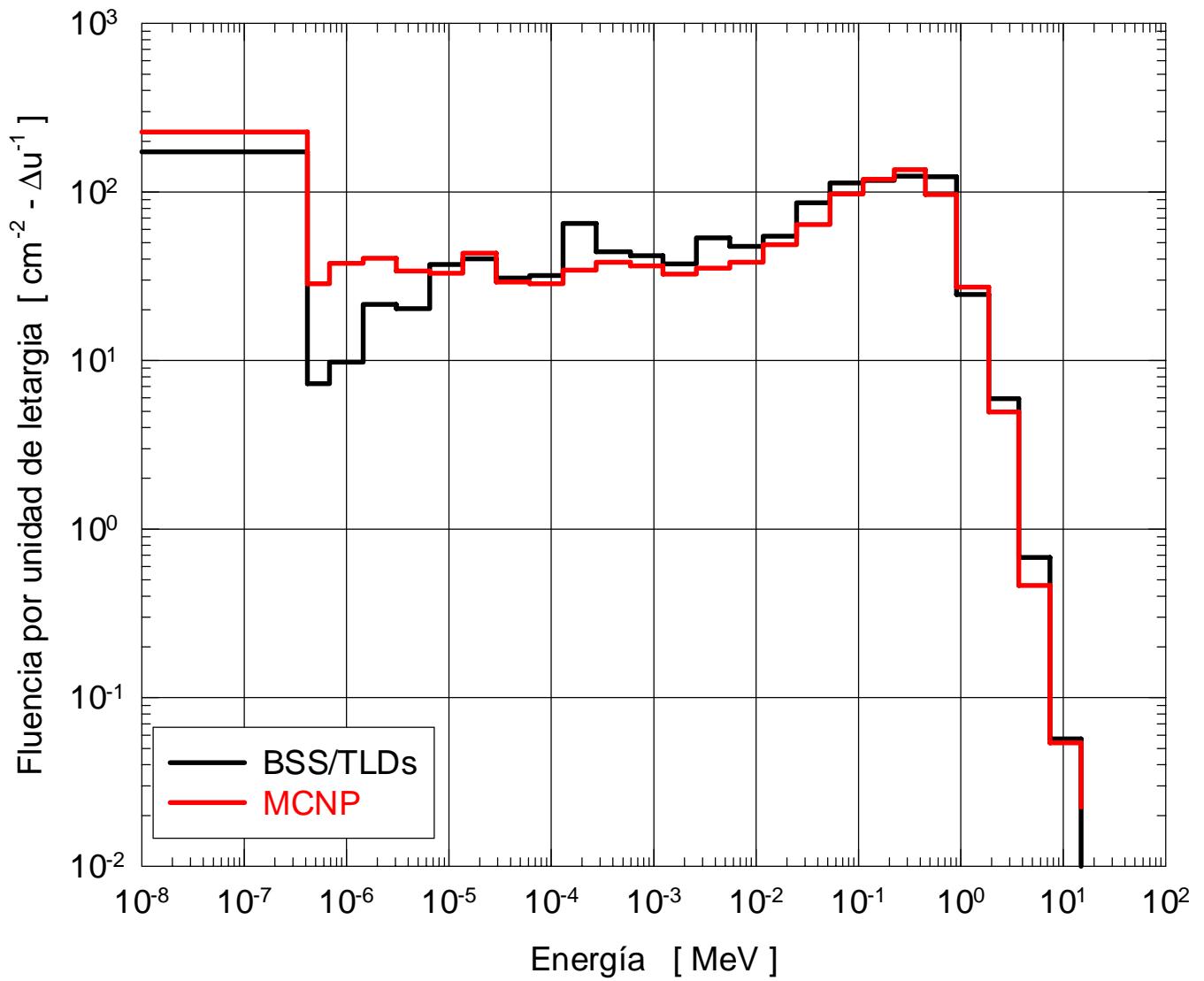


Figura 8.- Espectros medidos y calculado de los neutrones en el sitio 15 en la sala de tratamiento.

4.- CONCLUSIONES

Los aceleradores lineales que utilizan haces de electrones o rayos X para radioterapia y que operan a energías superiores a 6 MV producen campos de neutrones que imparten dosis a los pacientes del orden de los mSv por Gy de tratamiento. En este estudio se aplicaron 4 métodos de medida con dosímetros termoluminiscentes del tipo TLD600 y TLD700 para determinar diferentes magnitudes dosimétricas de los neutrones producidos en un acelerador lineal. La medida de estas dosis está limitada por el campo intenso de fotones que se utilizan durante los tratamientos, por lo que en las proximidades del haz primario resulta adecuado obtener las fluencias de neutrones leyendo los dosímetros en el pico de alta temperatura de la curva de brillo. La determinación de las dosis equivalentes en las proximidades del haz primario se realiza en forma simple mediante el uso de una esfera de parafina con pares de TLDs ubicados en su centro. El empleo de la técnica de la diferencia de las lecturas de pares de TLDs como detector de neutrones térmicos, en el centro de un conjunto de esferas moderadoras de diferente diámetro, permite la obtención de los espectros de neutrones y utilizando los valores de conversión de fluencia a dosis permite determinar la dosis por neutrones. Esta serie de medidas se complementan con los cálculos Monte Carlo que permite obtener espectros y dosis debido a neutrones y fotones. Con estos espectros y los valores experimentales se obtiene una tasa de emisión de neutrones de $4.14 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, que resulta 0.33 veces inferior al valor suministrado por el fabricante.

Agradecimientos

Se agradece a la Comisión de Seguridad Nuclear de España por el apoyo financiero del proyecto. También se agradece la colaboración, estímulo y apoyo constantes del CIEMAT y la ETSII (UPM, Madrid), así como el soporte técnico de los Servicios de Radioterapia y de Radiofísica y Protección Radiológica de los Hospitales Universitarios de Valladolid.

REFERENCIAS

Agosteo S., Para A.F., Maggioni B., Sangiust V., Terrani S. Borasi, G. (1995) *Radiation transport in a radiotherapy room*, Health Phys., **68**: 27-34.

Barquero R. (2002) *Medida y simulación de los fotoneutrones de un acelerador de radioterapia*, Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid.

Barquero, R., Méndez, R., Iñiguez, M.P., Vega-Carrillo, H.R., Voytech, M. (2002) *Thermoluminescence measurements of neutron dose around a medical Linac*, Radiat. Prot. Dosim., **101**: 493-506.

Briesmeister, J., Editor (2000) *MCNPTM A general Monte Carlo N-particle transport code*, versión MCNP 4C, Los Alamos National Laboratory Report LA-13709-M.

Burgois L. Delacroix D. Ostrowsky A. (1997) *Use of bubble detectors to measure neutron contamination of a medical accelerator photon beam*, Radiat. Prot. Dosim., **74**: 239-246.

D'Errico F, Luszik-Bhadra M, Nath R. Siebert B.R.L. Wolf U. (2001) *Depth dose-equivalent and effective energies of photoneutrons generated by 6-18 MV X-ray beams for radiotherapy*, Health Phys., **80**: 4-11.

ICRP, (1995) *Conversión coefficients for use in radiological protection against external radiation*, International Comisión on Radiological Protection Report 74. Pergamon Press, Elmsford, New York.

Lenox A.J. (2001) *Accelerators for cancer therapy*, Radiat. Phys. Chem., **61**: 223-226.

Lin J.-P., Chu T.-Ch., Lin S.-Y. Liu M.-T. (2001) *The measurement of photoneutrons in the vicinity of a Siemens Primus linear accelerator*, Appl. Radiat. Isot., **55**: 315-321.

Mao X.S., Kase K.R., Liu J.C., Nelson W.R., Kleck J.H. Johensen S. (1997) *Neutron sources in the Varian Clinac 2100C/2300C medical accelerator calculated by the EGS4 code*, Health Phys., **72**:524-529.

McGinley P.H., Wood M., Mills M. Rodriguez R. (1976) *Dose levels due to neutrons in the vicinity of high-energy medical accelerators*, Med. Phys., **3**: 397-402.

McGinley, P.H. (1998) *Shielding techniques for Radiation Oncology Facilities*, Medical Physics Pub Corp. Madison WI USA, pp. 55-58.

Méndez R., Iñiguez M.P., Barquero R., Mañanes A., Gallego E, Lorente A. Voytech, M. (2002) *Response components of LiF:Mg,Ti around a moderated Am-Be neutron source*, Radiat. Prot. Dosim., **98**: 173-178.

Nath R., Epp E.R., Laughlin J.S., Swanson W.P. Bond V.P. (1998) *Neutrons from high energy x-ray medical accelerators: An estimate of risk to the radiotherapy patient*, Med. Phys. **11**: 231-241.

Ognaro C., Zanini A., Nastasi U., Ródenas J., Ottaviano G. Manfredotti C. (2000) *Análisis of photoneutron spectra produced in medical accelerators*, Phys. Med. Biol., **45**: L55-L61.

Price K.W., Nath R. Holeman G.R. (1978) *Fast and thermal neutron profiles for a 25-MV x-ray beam*, Med. Phys., **5**: 285-289.

Vega-Carrillo H.R. (2001) *Neutron energy spectra inside a PET cyclotron vault room*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **463**: 375-386.

Vega-Carrillo H.R. y Becerra-Ferreiro A.M. (2001) *Diseño de un integrador de neutrones*, Memorias de la IV Conferencia Internacional sobre Dosimetría de Estado Sólido, Puebla, Pue. México.

Vega-Carrillo H.R. and Iñiguez M.P. (2002) *Catalogue to select the initial guess spectrum during unfolding*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A **476**: 270-282.

Vega-Carrillo H.R. (2002) *TLDs pairs, as thermal neutron detector, in neutron multisphere spectrometry*, Radiat. Meas., **35**: 251-254.