

## Medición del espectro de neutrones y rayos gama de una fuente de californio 252 en un medio tejido-equivalente

Héctor René Vega Carrillo

*Centro Regional de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas,  
apartado postal 495, 98000 Zacatecas, Zac.*

(recibido el 30 de enero de 1987; aceptado el 4 de septiembre de 1987)

**Resumen.** Se obtuvo el espectro de energía de una fuente de Californio 252 para neutrones y rayos gama en tres puntos de un medio tejido-equivalente. Los espectros se obtuvieron utilizando un sistema espectrométrico basado en un detector orgánico de centelleo en estado líquido. Los espectros obtenidos se emplearon para calcular los valores de kerma para neutrones y la dosis absorbida para rayos gama en cada uno de los puntos de medición.

PACS: 23.20.Lv; 87.60.Lt

### 1. Introducción

En 1903, cinco años después del descubrimiento del elemento radio por los Curie, Alexander Graham Bell sugirió que debería utilizarse para el tratamiento de tumores malignos localizados a cierta profundidad en el cuerpo humano [1].

Anualmente en México y en el mundo aparecen nuevos pacientes cancerosos. Para el tratamiento de estas personas se emplean tres tipos de terapias que se aplican en forma individual o combinada: cirugía, quimioterapia y radioterapia.

Experimentos en radiobiología han demostrado que las células desprovistas de oxígeno son más resistentes a la radiación, fenómeno que se conoce como "efecto del oxígeno". Este efecto es menor para la radiación que tiene alta transferencia lineal de energía (TLE), como las partículas alfa, deuterones, protones, etc. [2] Para que este tipo de radiación penetre hasta un tumor localizado a cierta profundidad deberá tener alta energía, esto es, 100 MeV para protones y una energía mayor para partículas más pesadas; lo cual implica el uso de un acelerador de partículas.

Es factible producir radiación con alta TLE como radiación secundaria en el tejido mediante neutrones, los que al penetrar en el tejido e interactuar con el hidrógeno del organismo producen protones como radiación secundaria.

El interés de utilizar neutrones en radioterapia implica un compromiso muy serio por mejorar la exactitud en los métodos de determinación de la dosis por neutrones, para lo cual es necesario conocer el espectro en energía de la radiación incidente [3] antes de irradiar y conforme la radiación va penetrando. La información espectral ha sido objeto de muchas investigaciones durante las cuales se han utilizado distintas fuentes de radiación y su interacción ha sido observada en un medio similar al tejido humano [4-7]. A estos medios se les denomina "tejido-equivalente", que tienen una gran simulación biológica [8]. Con el propósito de obtener datos espectrales se realizó este trabajo, en el cual se utilizó una fuente de

Cf-252 para irradiar un medio equivalente. El espectro de energía de los neutrones y los rayos gama se obtuvo en tres puntos diferentes dentro del tejido-equivalente.

## 2. Equipo y procedimiento experimental

### a) *Equipo*

La fuente que se utilizó para el experimento fue una fuente de californio-252, cuya razón de emisión es de  $2.34 \times 10^6$  neutrones por segundo por cada microgramo y de  $1.37 \times 10^7$  gamas por segundo por cada microgramo; para ambos tipos de radiación la emisión es dentro de un espectro muy amplio de energía [2]. En este experimento se utilizó una fuente de 11.24 microgramos.

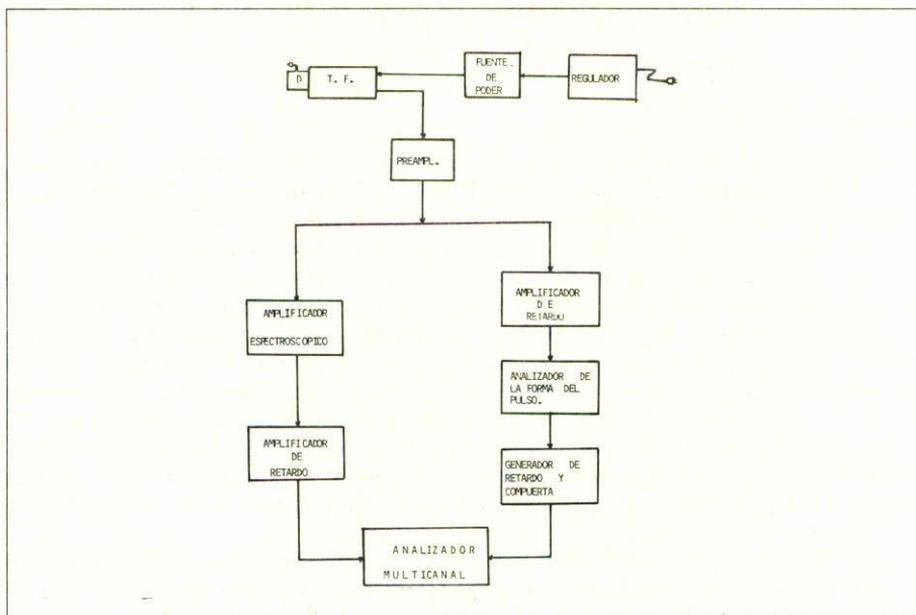


FIGURA 1. Sistema de detección mediante técnica de discriminación por la forma del pulso.

Para obtener el espectro de energía de los neutrones de los rayos gama se requería un sistema de detección capaz de discriminar los eventos de neutrones de los eventos de rayos gama; para lograr esto se utilizó la técnica de discriminación por la forma del pulso. Se usó un detector en estado líquido de centelleo que detecta a los neutrones mediante el proceso del reculado de los protones, y a los rayos gama mediante el efecto de dispersión de Compton de los electrones [9]. La electrónica asociada se muestra en la figura 1.

Cuando se realizan investigaciones en radiobiología, se usan distintos tipos de tejido-equivalente para determinar la dosis a profundidad cuya composición debe ser lo más parecido al tejido humano [3]. En nuestro caso usamos aquel que pudimos obtener con los materiales más accesibles, de fácil almacenamiento, no tóxico ni explosivo.

La fórmula canónica del tejido equivalente  $C_5H_{40}O_{18}N$ , se obtuvo mezclando 1.5 moles de glicerol, 0.5 moles de urea y 13.0 moles de agua [10,11], es decir



La densidad de nuestro tejido fue de 1.106 gramos/cm<sup>3</sup>, valor muy próximo al de la densidad teórica que es de 1.0966 gramos/cm<sup>3</sup> [11].

El material tejido-equivalente se depositó en un contenedor hecho de plexiglás de 6.0 ml, cuyas dimensiones eran 99.0 cm de largo, 30.5 cm de ancho y 30.5 cm de alto.

#### b) Procedimiento experimental

En los casos reales de pacientes cancerosos en tratamiento radioterapéutico, las áreas de irradiación más empleadas varían desde los 5 cm<sup>2</sup> hasta los 15 cm<sup>2</sup> [12]. Para construir el colimador se seleccionó un área de irradiación de 10 cm<sup>2</sup>.

El colimador se construyó utilizando parafina, cadmio y plomo. La parafina, por sus propiedades termalizadoras, se usó para evitar que los neutrones de la fuente alcanzaran el contenedor del medio tejido-equivalente por otro camino que no fuese el colimador. El cadmio se usó para evitar que los neutrones termalizados incidieran en el plomo y en el tejido-equivalente. Y el plomo se usó para evitar que los rayos gama, producidos por la captura de neutrones en la parafina y en el cadmio, alcanzaran el tejido-equivalente.

La fuente se colocó a una distancia "fuente a piel" de 125.0 cm, que es la distancia recomendada y utilizada por los especialistas en el tratamiento de tumores [13].

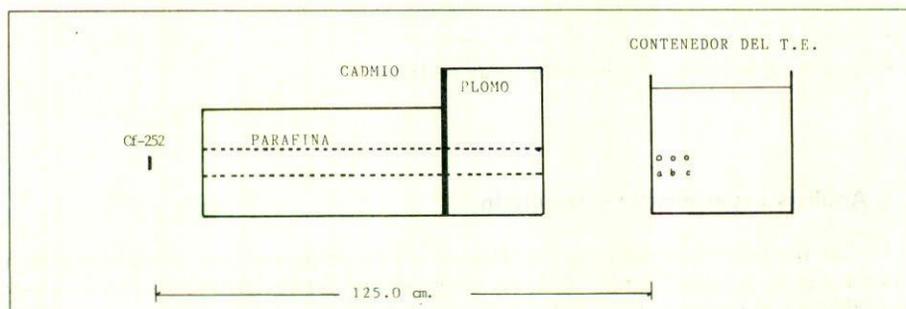


FIGURA 2. Colocación y alineación del detector.

El detector se protegió con una bolsa de polietileno, se montó en un soporte universal, y se introdujo al contenedor del tejido-equivalente. El detector se dispuso tratando de alinear el centro geométrico del colimador y el centro geométrico del detector, tal y como se muestra en la figura 2. El área de irradiación, sobre la superficie del contenedor, era de  $10.0 \text{ cm}^2$ . Las mediciones se efectuaron en tres puntos dentro del tejido-equivalente: a 2.0 cm, 5.0 cm y 9.0 cm, medidos a lo largo del eje central del colimador.

Para cada posición se hicieron 4 mediciones de irradiación, 2 para neutrones y 2 para rayos gama; de estas dos, una se hizo con el sistema espectrométrico en alta ganancia y se contó durante 4000 segundos, y la otra se hizo con el sistema de baja ganancia y se realizó la medición de fondo y el tiempo de conteo fue de 8000 segundos. De estas mediciones se obtuvo el espectro de altura de pulsos para los neutrones y los rayos gama.

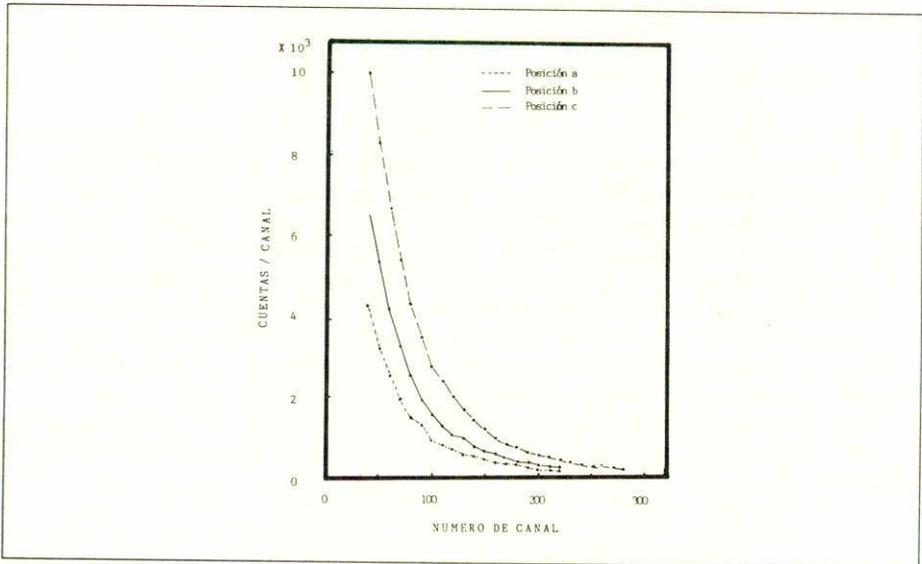


FIGURA 3. Espectro de altura de pulsos para neutrones.

### 3. Análisis experimental y resultados

Las mediciones arrojan un espectro de altura de pulsos para neutrones y para rayos gama, véanse figuras 3 y 4, los cuales deben ser reconstruidos con el objeto de obtener el espectro en energía, para lo cual se usó el código de reconstrucción FORIST [14,15]. Los espectros de altura de pulsos se asemejan a los obtenidos por H.R. Elson *et al.* [5], y los espectros de energía se muestran en las figuras 5 y 6.

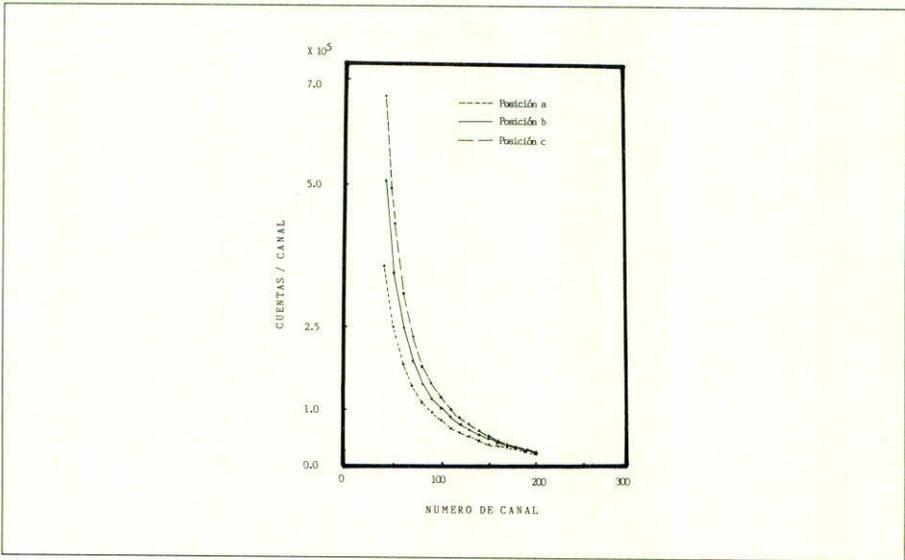


FIGURA 4. Espectro de altura de pulsos para rayos gamma.

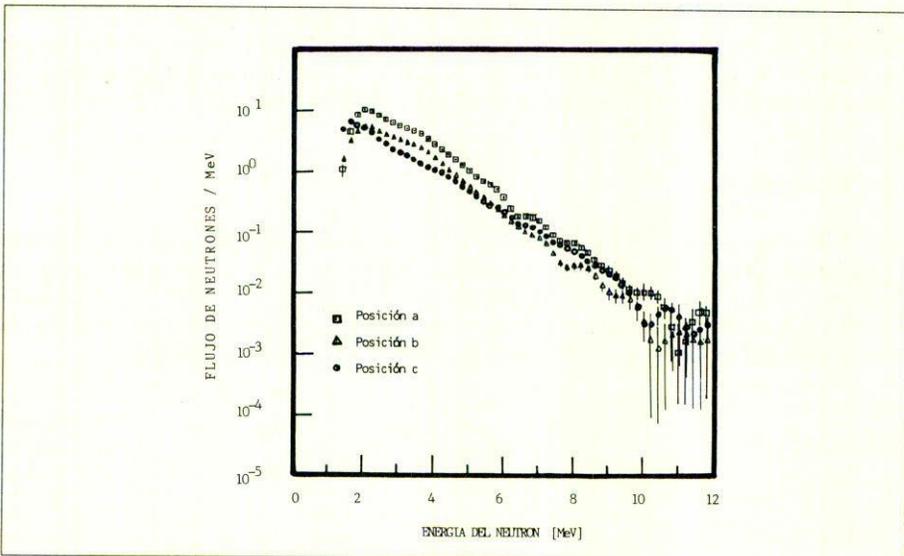


FIGURA 5. Espectro de energía para neutrones.

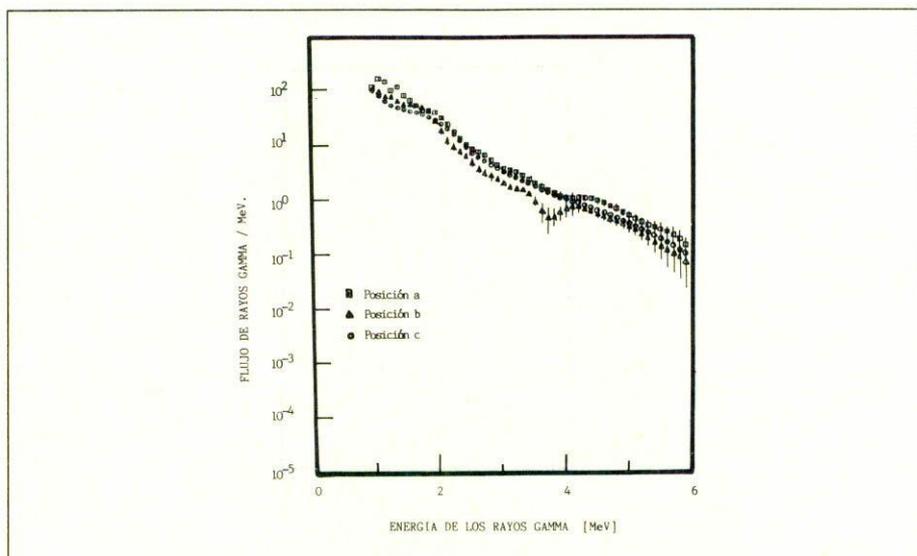


FIGURA 6. Espectro de energía para rayos gamma.

Los espectros de la figura 5 se multiplicaron por factores de conversión de fluencia de Kerma (Tabla I) [16] para obtener, en cada posición, el Kerma por neutrones. A su vez, los espectros de la figura 6 se emplearon para calcular la dosis absorbida para gamas mediante el uso de factores adecuados (Tabla II) [17].

#### 4. Conclusiones

Aun a pesar de que no se conoce exactamente el comportamiento espectral de los neutrones en el tejido, su aplicación terapéutica ha ido aumentando en los últimos años [18–20]. Los resultados que aquí se presentan, así como el método utilizado, puede servir para continuar con la obtención de datos espectrales de fuentes de neutrones con fines físicos y/o terapéuticos en nuestro país.

<i>Posición</i>	<i>Profundidad</i> [cm]	<i>Kerma</i> [rad]	<i>Kerma</i> <i>relativa</i> [%]
<i>a</i>	2.0	$1.1595 \times 10^{-6}$	100
<i>b</i>	5.0	$0.6736 \times 10^{-6}$	58
<i>c</i>	9.0	$0.5459 \times 10^{-6}$	47

TABLA I. Kerma por neutrones.

Posición	Profundidad [cm]	Dosis absorbida [rad]	Dosis relativa [%]
a	2.0	$7.6451 \times 10^{-14}$	100
b	5.0	$5.4960 \times 10^{-14}$	71.8
c	9.0	$5.7030 \times 10^{-14}$	74.5

TABLA II. Dosis por rayos gama.

## Referencias

1. H.H. Barschall, *Amer. Sci.* **64** (1976) 668.
2. E.J. Hall y H.H. Rossi, *Californium-252 in Teaching and Research*, Technical Report Serie 159, IAEA (1974).
3. ICRU, *Neutron Dosimetry in Biology and Medicine*, Report 26 (1976).
4. C.A. Kelsey, *Med. Phys.* **2** (1975) 185.
5. H.R. Elson, T.A. Stupar, A. Shapiro y J.G. Kereiakes, *Med. Phys.* **6** (1979) 426.
6. W.J. Hannan, D. Porter, R.C. Lawson y R. Railton, *Phys. Med. Biol.*, **18** (1973) 808.
7. W.E. Murphie, Tesis, Universidad de Texas. Austin, Texas, EUA (1980).
8. N.A. Frigerio, R.F. Coley y M.J. Sampson, *Phys. Med. Biol.* **17** (1969) 792.
9. G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley and Sons, Inc., New York, EUA (1979).
10. N.A. Frigerio y M.H. Branson, *Anl. Biol. Med. Res. Ann. Rep. ANL* **7635** (1969) 141.
11. N.A. Frigerio y M.J. Sampson, *Ann. Biol. Med. Res. Anl. Rep. ANL* **7635** (1969) 141.
12. J.T. Brennan, *Radiologic Clinics of North America*, Vol. II (1969).
13. F.M. Jones y C.A. Kelsey, *Med. Phys.* **1** (1974) 4.
14. R.H. Johnson y B.W. Whering, *The Forsit Unfolding Code*.
15. W.R. Burrus, *Ferd and Ferdor Type Unfolding Code*, Neutron Physics Division. ORNL.
16. R.S. Caswell, J.J. Coyne y M.L. Randolph, "Kerma Factors of Elements and Compounds for Neutrons with Energies Below 30 MeV", *Int. Appl. Rad. Isot.* **33** (1982).
17. E. Storm y H.I. Israel, *Nucl. Data Tables A* **7**, (1970) 565.
18. J.J. Batterman, "Fast Neutron Therapy for Advanced Brain Tumors", *Int. J. Rad. Oncol. Phys.* **6** (1980).
19. J.J. Broerse y J.J. Battermann, "Fast Neutron Radiotherapy: for Equal or Better?", *Med. Phys.* **8**, (1981) 68.
20. R.D. Ornitz *et al.*, "Clinical Observations of Early and Late Normal Tissue Injury in Patients Receiving Fast Neutron Irradiation", *Int. J. Rad. Oncol. Biol. Phys.* **6** (1980).

**Abstract.** In this work we got the neutron and gamma ray energy spectra from a Cf-252 source, at three different positions in the tissue-equivalent phantom. The spectra were measured with a spectrometry system based in a liquid organic scintillator. The spectra were used to determine the kerma values for neutrons and the absorbed dose for gamma rays at each position.