

## **Análisis Monte Carlo del Laboratorio de Patrones Neutrónicos del CIEMAT**

**Vega-Carrillo, HR**

*Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas  
C. Ciprés 10, Fracc. La Peñuela. 98068 Zacatecas, Zac. México  
fermineutron@yahoo.com*

**Méndez-Villafañe, R**

*Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)  
Av. Complutense 40, 28040 Madrid. España  
roberto.mendez@ciemat.es*

**Guzmán-García, KA\***

*Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid  
C. José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid. España  
karen.guzman.garcia@alumnos.upm.es*

### **Resumen**

Mediante métodos Monte Carlo se ha caracterizado el campo de neutrones producido por fuentes de calibración en el laboratorio de Patrones Neutrónicos del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. El laboratorio cuenta con dos fuentes de calibración de neutrones:  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$  que son almacenadas en una piscina de agua y se colocan sobre la bancada de calibración usando sistemas controlados a distancia. Para caracterizar el campo de neutrones se construyó un modelo tridimensional de la sala donde se incluyó la bancada de acero inoxidable, la mesa de irradiación y la piscina de almacenamiento. El modelo de las fuentes incluyó el doble encapsulado de acero, como encamisado. Con el fin de determinar el efecto que produce la presencia de los diferentes componentes de la sala, durante la caracterización se estimaron los espectros de neutrones, el flujo total y la rapidez de dosis equivalente ambiental a 100 cm de la fuente. La presencia de los muros, suelo y techo de la sala es la que causa la mayor modificación en los espectros y los valores integrales del flujo y la rapidez de dosis equivalente ambiental.

### **1. INTRODUCCIÓN**

Los neutrones en el ambiente se originan durante la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera y mediante las reacciones nucleares inducidas por las partículas emitidas durante el decaimiento de algunos radioisótopos pesados [1]. En forma artificial, los neutrones se producen

---

\* Estudiante del programa de doctorado en Ingeniería Nuclear en el DIN-UPM.

mediante reacciones nucleares en un reactor nuclear, un acelerador de partículas o mediante la unión de un radioisótopo, que emite partículas  $\alpha$  o rayos  $\gamma$ , y un material adecuado para inducir la reacción ( $\alpha, n$ ) o ( $\gamma, n$ ) [2].

En algunas aplicaciones, como en la medicina, la generación de energía, el ciclo de combustible, la producción de cemento, la seguridad de puertos marítimos y aeropuertos, etc., se usan procedimientos que implican la producción y el uso de neutrones. En estos espacios es indispensable determinar las magnitudes dosimétricas asociadas para garantizar la protección radiológica. Para medir los neutrones, o las dosis asociadas, se usan diferentes instrumentos que requieren de un proceso de calibración. Por norma, en España, esta responsabilidad recae en el Laboratorio de Metrología de las Radiaciones Ionizantes del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, LMRI-CIEMAT. A través de un decreto, al LMRI-CIEMAT, se le asignó la responsabilidad de establecer un laboratorio de patrones neutrónicos, LPN-CIEMAT, cuyo fin es ser un laboratorio nacional de referencia primaria al servicio de las instalaciones, cada vez en mayor número, que producen de manera directa o indirecta neutrones [3]. Con el fin de garantizar resultados fiables en los trabajos de dosimetría, calibración e irradiación con campos neutrones es necesario caracterizar el campo neutrónico de la instalación [4, 5].

El objetivo de este trabajo fue caracterizar el campo neutrónico del LPN-CIEMAT; esta caracterización se hizo mediante métodos Monte Carlo, donde se determinaron los espectros de neutrones,  $\Phi_E(E)$ , y los valores de la dosis equivalente ambiental,  $H^*(10)$ , a 100 cm de las fuentes de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$ , estos valores se estimaron modificando las características de las fuentes y su entorno con el fin de determinar su efecto.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La caracterización del campo neutrónico se realizó mediante métodos Monte Carlo usando el código MCNPX [6] y se estimó el  $\Phi_E(E)$  y la  $H^*(10)$  a 100 cm.

### 2.1. Descripción del LPN-CIEMAT

El LPN-CIEMAT cuenta con una sala de  $9 \times 7.5 \times 8 \text{ m}^3$ , con muros 1.5 m de espesor de concreto de  $2.3 \text{ g/cm}^3$ . En el piso se construyó una piscina de  $1.5 \times 1.0 \times 1.5 \text{ m}^3$  recubierta por polietileno de alta densidad que está llena de agua y su propósito es alojar las fuentes de neutrones. Dentro de la sala hay una bancada de acero inoxidable de 2.5 m de altura por 3.75 m de longitud; sobre la bancada hay una mesa de irradiación que permite colocar equipos a calibrar, o entidades a irradiar. La sala cuenta con sistemas de video que permiten observar todos los puntos de la sala. El traslado de las fuentes desde la piscina a la bancada se hace mediante la lanzadera cuyo control, así como la posición de la mesa de irradiación, se maneja a distancia a través de la consola de control. En la figura 1 [7] se muestra una vista de perfil de la sala con la bancada y la piscina de alojamiento de fuentes. La bancada se diseñó para colocar cualquier detector respecto al centro de la fuente a distancias de hasta 370 cm, y la fuente se ubica aproximadamente en el centro de la sala a 4 m de nivel del piso, con el fin de emular un campo

libre, donde las magnitudes a medir reciban poca influencia por las características de la sala. En la figura 2 [7] se muestra una de imagen de la sala de LPN, con la bancada y la piscina.

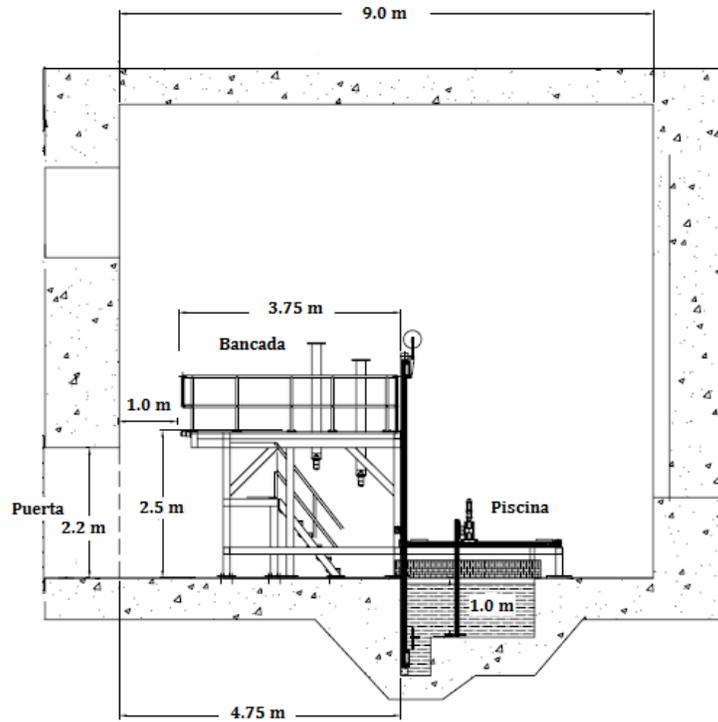
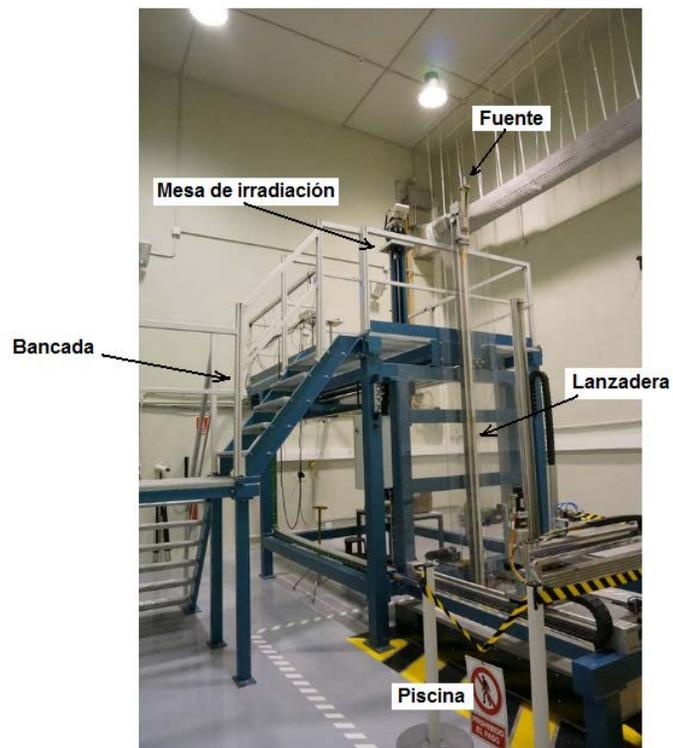


Figura 1. Sala del LPN-CIEMAT



## Figura 2. Imagen de la sala del LPN-CIEMAT

### 2.1.1. Fuentes de neutrones

El LPN cuenta con dos fuentes de calibración, una es de  $^{241}\text{AmBe}$  y la otra es de  $^{252}\text{Cf}$ , ambas son las recomendadas por la norma ISO-8529-2 [8] para la calibración de monitores y dosímetros neutrónicos debido a que sus características están bien determinadas [9].

La fuente de  $^{252}\text{Cf}$  tiene 250  $\mu\text{g}$  de  $^{252}\text{Cf}$ , su actividad es de 5 GBq y emite  $5.75 \times 10^8$  n/seg con una incertidumbre del 2.6% ( $k = 2$ ). La fuente mide 7.8 mm de diámetro por 10.0 mm de altura. En esta fuente el Cf está disperso en una matriz cerámica con un doble encapsulado de acero inoxidable A316 de 1 mm de espesor. La fuente está alojada dentro de una cápsula que se manipula mediante una porta cápsula. En la figura 3 se muestran los detalles de esta fuente.

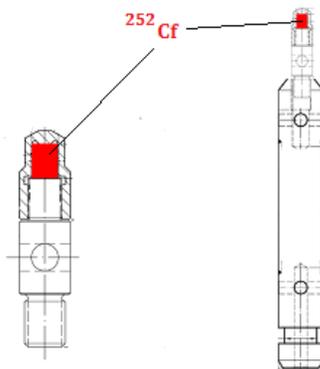
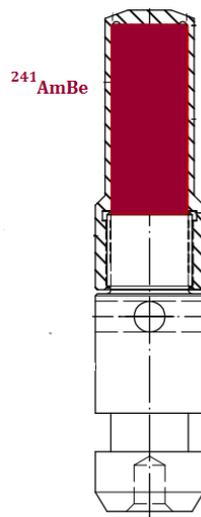


Figura 3. Fuente de  $^{252}\text{Cf}$  fuera y dentro del porta cápsula

La fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  tiene una actividad de 185 GBq, su tasa de emisión de  $1.1 \times 10^7$  n/seg, con una incertidumbre de 1.4% ( $k = 2$ ). El americio de la fuente está en forma de óxido que está disperso en una matriz de berilio metálico en polvo. La fuente mide 19.1 mm de diámetro y 48.6 mm de altura encerrada en un porta capsulas como se muestra en la figura 4.



## Figura 4. Fuente de $^{241}\text{AmBe}$ en su porta cápsula

### 2.2. Cálculos Monte Carlo

Mediante el código MCNPX [6] se construyó un modelo tridimensional de la sala del LPN, donde se incluyeron los detalles de las fuentes de neutrones, la bancada, la mesa de irradiación, el soporte de las fuentes y la piscina de almacenamiento.

Se estimó el espectro de los neutrones,  $\Phi_E(E)$ , a 100 cm de la fuente sobre la bancada y con el espectro y la intensidad de la fuente,  $Q$ , se obtuvo la fluencia total de neutrones,  $\phi$ , mediante la ecuación 1 [4].

$$\phi = Q \int_E \Phi_E(E) dE \quad (1)$$

También, se estimó el valor de la rapidez de la dosis equivalente ambiental,  $H^*(10)$ , mediante la ecuación 2 [4], donde  $h^*(10)$  representa los coeficientes de conversión de fluencia a dosis equivalente ambiental del ICRP 74 [10].

$$H^*(10) = Q \int_E \Phi_E(E) h^*(10) dE \quad (2)$$

Para caracterizar el campo neutrónico debido a cada fuente, los cálculos se hicieron usando diferentes casos donde se modificaron las características de las fuentes y los elementos de la sala del LPN.

#### 2.2.1. Casos estudiados

Para el caso de la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  los cálculos se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- Caso A: Fuente puntual en el vacío.
- Caso B: Fuente puntual en el aire.
- Caso C: Fuente real con su encamisado, en su porta capsula, en el aire.
- Caso D: Fuente, como el caso C, incluyendo los muros, piso y techo de la sala.
- Caso E: Fuente, como el caso D, incluyendo la bancada y la piscina.

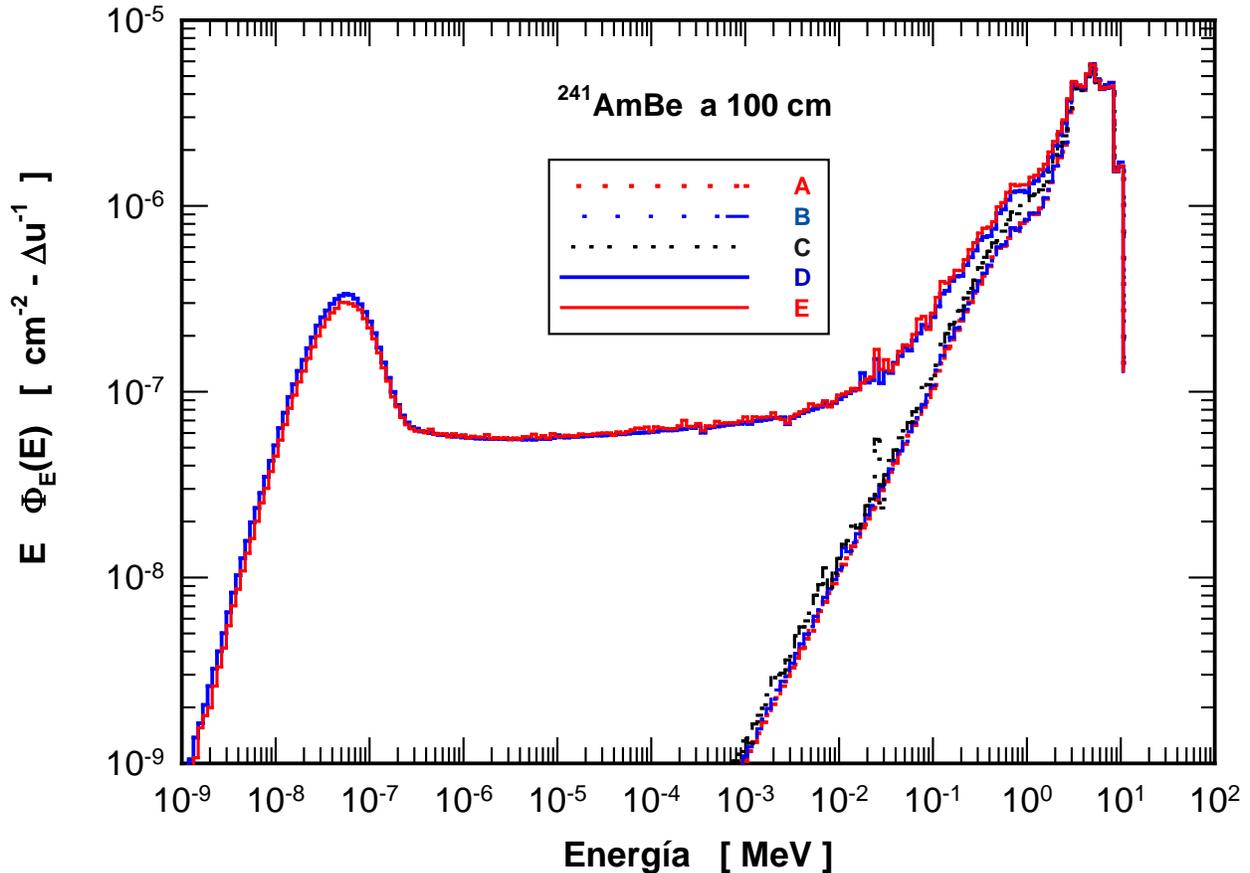
Para el caso de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  los casos estudiados fueron los siguientes:

- Caso A: Fuente puntual en el vacío.
- Caso B: Fuente puntual en el aire.
- Caso C: Fuente real con su encamisado, en su capsula y dentro del porta capsula, en el aire.
- Caso D: Fuente, como el caso C, incluyendo los muros, piso y techo de la sala.
- Caso E: Fuente, como el caso D, incluyendo la bancada y la piscina.

Para cada fuente, y para cada caso, el número de historias fue diferente, pero lo suficientemente largo para tener una incertidumbre menor o igual al 3%.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 5 y 6 se muestran los espectros por unidad de letargia de los neutrones del  $^{241}\text{AmBe}$  y el  $^{252}\text{Cf}$  respectivamente, a 100 cm de distancia, para los casos calculados.



**Figura 5. Espectros a 100 cm del  $^{241}\text{AmBe}$  sobre la bancada para los 9 casos estudiados**

Para ambas fuentes se observa que para el caso de las fuentes puntuales la presencia o ausencia de aire no modifica el espectro, sin embargo cuando se modela la fuente completa en su cápsula (para el caso del  $^{252}\text{Cf}$ ) y dentro de su porta cápsula se observa un pequeño incremento causado por las dispersiones de los materiales que rodean a la zona activa de las fuentes.

Los espectros cambian significativamente a partir de la inclusión de los muros de la sala de LPN (casos D y E). El principal cambio se traduce en la aparición de los neutrones epitérmicos y térmicos debido al fenómeno conocido como *room-return* [11, 12].

Cuando la bancada se incluye (caso E) se observa una disminución en la zona de los neutrones térmicos, esto se atribuye a que la estructura de la bancada absorbe algunos neutrones. La cantidad de los neutrones rápidos es ligeramente mayor cuando se incluye la bancada

probablemente debido a que la presencia de la bancada contribuye a que se produzca una mayor dispersión de neutrones.

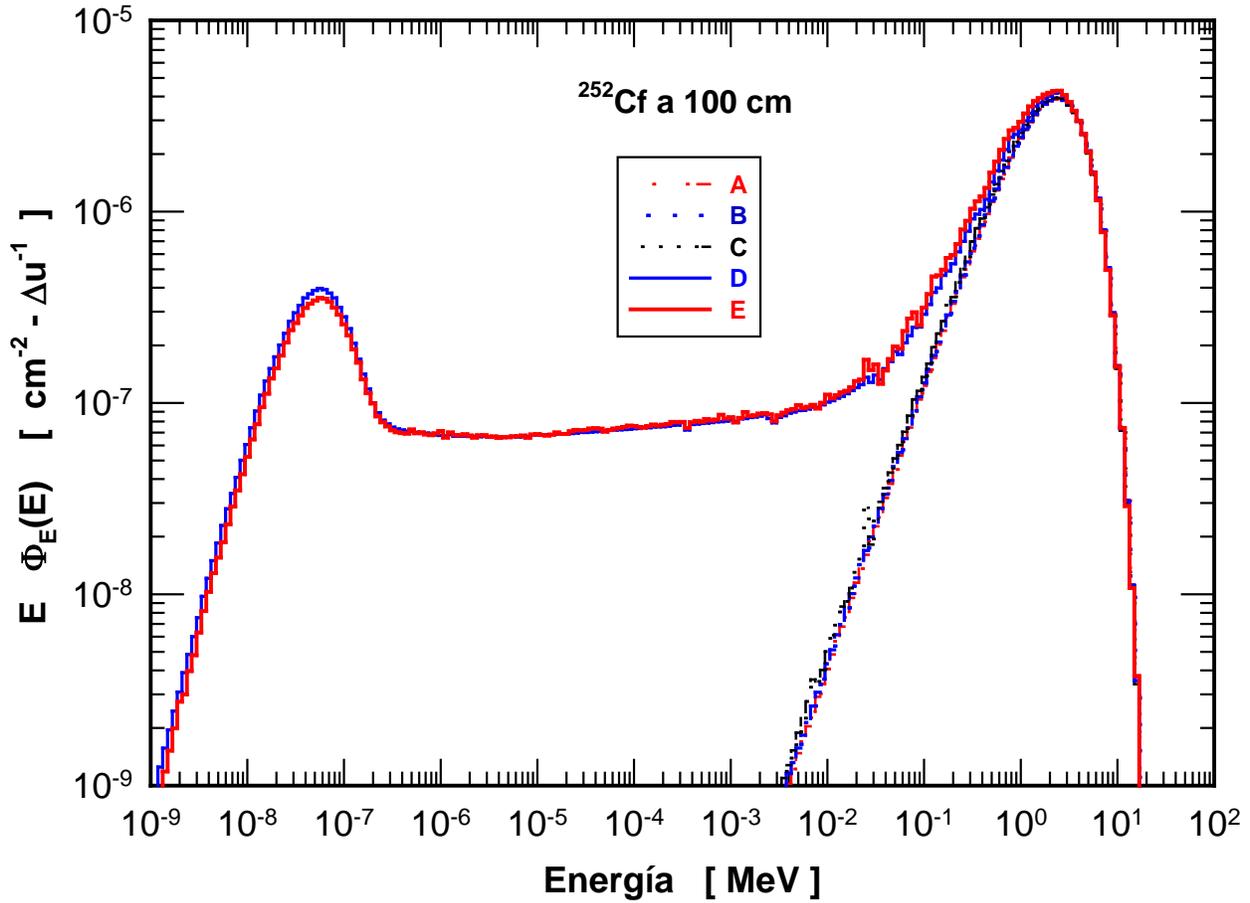


Figura 6. Espectros a 100 cm del  $^{252}\text{Cf}$  sobre la bancada para los 10 casos estudiados

En la tabla 1 se muestran los valores del flujo total de neutrones y la rapidez del  $H^*(10)$  del  $^{241}\text{AmBe}$ , a 100 cm de distancia, para los casos estudiados. Las incertidumbres asociadas son el resultado de la propagación de incertidumbres de la intensidad de la fuente y el error de los cálculos Monte Carlo.

Tabla I.  $\phi$  y  $H^*(10)$  del  $^{241}\text{AmBe}$  a 100 cm de distancia

Caso	$\phi$ [n/cm <sup>2</sup> -seg]	$H^*(10)$ [ $\mu\text{Sv/h}$ ]
A	88 ± 2	124 ± 3
B	87 ± 2	124 ± 3
C	91 ± 2	128 ± 3
D	117 ± 3	140 ± 3
E	120 ± 3	144 ± 4

Los casos A, B, y C son estadísticamente iguales, así a 100 cm las dimensiones de la fuente, presencia del aire y del porta capsula no tiene ningún impacto. El mayor impacto en el  $\phi$  y la  $H^*(10)$  se produce cuando las paredes de la sala son incluidas, sin embargo en las magnitudes integrales la presencia de la bancada no tiene ningún efecto.

En la Tabla II se muestran los valores de la rapidez del  $H^*(10)$ , a 100 cm de distancia, de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  para los casos estudiados.

**Tabla II.  $\phi$  y  $H^*(10)$  del  $^{252}\text{Cf}$  a 100 cm de distancia**

Caso	$\phi$ [n/cm <sup>2</sup> -seg]	$H^*(10)$ [mSv/h]
A	4576 ± 151	6.40 ± 0.21
B	4621 ± 152	6.46 ± 0.21
C	4730 ± 156	6.59 ± 0.22
D	6189 ± 204	7.10 ± 0.23
E	6462 ± 213	7.47 ± 0.25

Las magnitudes integrales son estadísticamente iguales para los tres primeros casos, lo que implica que la geometría, el aire, la capsula de la fuente y el porta capsula de la fuente  $^{252}\text{Cf}$  no produce ningún efecto a 100 cm de distancia. Sin embargo, los valores de estos tres casos son estadísticamente diferentes a los últimos dos donde se incluyeron los muros de la sala y la bancada.

Al comparar los valores de las magnitudes integrales calculadas con la fuente real, sin la bancada, pero con los muros de la sala (caso D) con los obtenidos cuando la bancada se incluye (caso E) se observa que las diferencias no son significativas, lo que implica que la presencia de la bancada no tiene ningún efecto en el flujo y la rapidez de la  $H^*(10)$  determinados a 100 cm de distancia.

Para ambas fuentes el mayor efecto en los espectros y las magnitudes integrales asociadas, determinadas a 100 cm de distancia, es producido por la presencia de los muros, suelo y techo de la sala.

Para el caso del  $^{241}\text{AmBe}$  al comparar el flujo total obtenido con el modelo completo (caso E) y la fuente puntual en el vacío (caso A) es 36.4% superior, mientras que en el caso de la rapidez de la  $H^*(10)$  es 16.1 % superior. Para el caso del  $^{252}\text{Cf}$  estos valores son del 41.2% y del 16.7%.

Para el caso del  $^{252}\text{Cf}$  el incremento del flujo de neutrones con el modelo completo y la fuente puntual en el vacío es mayor que el de la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$  debido a que la energía promedio de los neutrones de la fuente del  $^{252}\text{Cf}$  es menor que el promedio de la energía de los neutrones del  $^{241}\text{AmBe}$ .

Sin embargo, para el caso del incremento de la rapidez de dosis ambiental con el modelo completo y la fuente puntual en el vacío, los incrementos son prácticamente iguales para ambas fuentes debido a la cantidad de neutrones, térmicos, epitérmicos y rápidos, y a los valores de fluencia a dosis equivalente ambiental.

#### 4. CONCLUSIONES

Con el fin de caracterizar el campo neutrónico que producen las fuentes de calibración del LPN-CIEMAT se estimaron los espectros de neutrones a 100 cm de distancia de las fuentes de  $^{241}\text{AmBe}$  y  $^{252}\text{Cf}$ . Con los espectros se estimó el flujo total de neutrones y la rapidez de la dosis equivalente ambiental. Para estudiar el efecto que produce los diferentes elementos de la sala se realizaron cálculos desde una fuente puntual en el vacío hasta el caso del modelo completo.

Los muros de la sala del LPM-CIEMAT modifican los espectros de neutrones y las magnitudes integrales asociadas debido al *room-return* de los neutrones.

La energía promedio de los neutrones de ambas fuentes propicia que, a 100 cm de distancia, el flujo total con el modelo completo y el modelo de la fuente puntual en el vacío aumente en 36.4% para el caso del  $^{241}\text{AmBe}$  y de 41.2% para el caso del  $^{252}\text{Cf}$ .

Debido a la presencia de los neutrones térmicos y epitérmicos, por el *room-return*, y a la distribución de los factores de conversión de fluencia a dosis equivalente ambiental, para ambas fuentes la comparación de la rapidez de la  $H^*(10)$  con el modelo completo y el caso de la fuente puntual en el vacío aumenta en 16.1% y 16.7% para el  $^{241}\text{AmBe}$  y el  $^{252}\text{Cf}$  respectivamente.

A 100 cm de distancia el aire, el encamisado de las fuentes, la capsula y el porta capsula no producen impacto significativo en los espectros y las magnitudes asociadas.

A 100 cm de distancia la presencia de la bancada no produce una variación significativa entre el espectro de neutrones y los valores integrales asociados.

#### AGRADECIMIENTOS

La autora, KAGG, agradece a la Agencia Española para la Cooperación Internacional para el Desarrollo, por la beca otorgada para realizar una estancia de investigación en el CIEMAT, y al CONACyT por la beca otorgada para realizar estudios de doctorado en el Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid.

#### REFERENCIAS

1. H.R. Vega-Carrillo, E. Manzanares, "Background neutron spectrum at 2420 m above sea level", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **524**, p. 146-151 (2004).
2. H.R. Vega-Carrillo, M.R. Martínez-Blanco, V.M. Hernández-Dávila, J.M. Ortiz-Rodríguez "Spectra and dose with ANN of  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{241}\text{AmBe}$  and  $^{239}\text{PuBe}$ ", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **281**, p. 615-618 (2009).
3. R. Méndez-Villafañe, "Diseño del nuevo Laboratorio de Patrones Neutrónicos del Laboratorio de Metrología de las radiaciones ionizantes del CIEMAT", *Memorias del XI*

*Congreso de la Sociedad Española de Protección Radiológica*, Tarragona, España, 18-21 de Septiembre, Tarragona, España, p. 1-4 (2007).

4. E. Gallego, A. Lorente, H.R. Vega-Carrillo, “Characteristics of the neutron fields on the facility at DIN-UPM”, *Radiation Protection Dosimetry*, **110**, p. 73-79 (2004).
5. S.P. Tripathy, A.K. Bakshi, V. Sathian, S.M. Tripathi, H.R. Vega-Carrillo, M. Nandy, P.K. Sarkar, D.N. Sharma, “Measurement of  $^{241}\text{AmBe}$  spectra (bare and Pb-covered) using TLD pairs in multi-spheres: Spectrum unfolding by different methods”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **598**, p. 556-560 (2009).
6. D.B. Pelowitz, *MCNPX User's Manual Version 2.5.0*, Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-05-0369. New Mexico, USA. (2005).
7. “Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas”, <http://www.ciemat.es/portal.do?IDM=61&NM=2&identificador=301> (2014).
8. ISO, *Draft International Standard, Reference Neutron Radiations: Calibration fundamentals related to the basic quantities characterising the radiation field*. International Organization for Standardization. ISO 8529-2.DIS, (1998).
9. H.R. Vega-Carrillo, M.R. Martínez-Blanco, V.M. Hernández-Davila, J.M. Ortiz-Rodríguez, “Spectra and dose with ANN of  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{241}\text{AmBe}$ , and  $^{239}\text{PuBe}$ ”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **281**, p. 615-618 (2009).
10. ICRP, “Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation”, ICRP Publication 74. *Annals of the ICRP*, **26**, p. 199 (1996).
11. H.R. Vega-Carrillo, E. Manzanares, M.P. Iñiguez, E. Gallego, A. Lorente, “Study of room-return neutrons”, *Radiation Measurements*, **42**, p. 413-419 (2007).
12. H.R. Vega-Carrillo, E. Manzanares, M.P. Iñiguez, E. Gallego, A. Lorente, “Spectrum of isotopic neutron sources inside concrete walls spherical cavities”, *Radiation Measurements*, **42**, p. 1373-1379 (2007).