

LABORATORIO DE PATRONES NEUTRÓNICOS DEL CIEMAT

Karen A. Guzmán-García¹, Roberto Méndez-Villafañe², Héctor René Vega-Carrillo³

¹ Universidad Politécnica de Madrid
C. José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid, España
Email: karen.guzman.garcia@alumnos.upm.es

² Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT
Avenida Complutense, 40, 28040, Madrid, España.
Email: roberto.mendez@ciemat.es

³ Unidad Académica de Estudios Nucleares de la UAZ
C. Ciprés, 10, 98068, Zacatecas, México
Email: fermineutron@yahoo.com.mx

Resumen

Mediante una serie de cálculos con métodos Monte Carlo con el código MCNPX se ha caracterizado el campo de neutrones producido por las fuentes de calibración existentes en el laboratorio de Patrones Neutrónicos, LPN, del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. El laboratorio cuenta con dos fuentes de calibración de neutrones una de $^{241}\text{AmBe}$ y una ^{252}Cf que son almacenadas en una piscina de agua. Se construyó un modelo tridimensional detallado de la sala con la bancada de acero inoxidable puntualizando en el seleccionador de las fuentes que las coloca en su posición de irradiar a 4 m del suelo, en la mesa de irradiación y la piscina de almacenamiento. Cada una de las fuentes se definió en el modelo en su doble encapsulado de acero. Se calcularon los espectros con distintos casos con el fin de calcular la aportación de cada elemento que impacta al transporte de los neutrones. Se calcularon los espectros de las fuentes de calibración a diferentes distancias colocadas respecto a la fuente desde 0, 15, 35, 50 a 300 cm sobre la bancada y de igual manera los valores de la dosis equivalente ambiental utilizando los criterios del ICRP 74. Los resultados muestran claramente que la mayor contribución en la modificación del espectro se le atribuye a las paredes, y suelo del recinto del LPN.

Palabras Clave: espectros de neutrones, MCNPX, dosis

1.- INTRODUCTION

Los neutrones se producen en forma natural como un subproducto de la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera [Vega-Carrillo *et al.*, 2004], y mediante la fisión espontánea que sufren algunos radioisótopos pesados.

En forma artificial, los neutrones se producen mediante reacciones nucleares en un reactor nuclear, un acelerador de partículas o mediante la unión de un radioisótopo, que emite partículas α o rayos γ , y un material adecuado para inducir la reacción (α, n) o (γ, n) [Vega-Carrillo *et al.*, 2005].

En España algunas existen diversas actividades donde se producen neutrones, entre ésta podemos mencionar las aplicaciones en medicina, la generación de energía y el ciclo de combustible nuclear, entre otros. En estos espacios es indispensable medir los neutrones y las magnitudes dosimétricas asociadas. Estas mediciones se realizan con 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, LMRI, del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. A través de un decreto, al LMRI-CIEMAT, se le asignó la responsabilidad de establecer un laboratorio de patrones neutrónicos. [Méndez-Villafañe 2007].

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 [Gallego, Lorente y Vega-Carrillo, 2004; Tripathy *et al.*, 2009].

El Laboratorio de Patrones Neutrónicos, LPN, del CIEMAT tiene como fin 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, como la industria nuclear, los servicios de salud o los ciclotrones para la producción de radiofármacos. [Méndez-Villafañe 2007].

El objetivo de este trabajo fue caracterizar el campo neutrónico del LPN-CIEMAT; esta caracterización se hizo usando métodos Monte Carlo, con el código MCNPX [Pelowitz, 2005], donde se determinaron los espectros y los valores de la dosis equivalente ambiental sobre la bancada usando varios casos donde se modificó el entorno de las fuentes.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Descripción del LPN

El LPN cuenta con una sala de 9 m × 7.5 m de planta y 8 m de altura, con muros de hormigón con espesor de 150 cm. En la planta se sitúa una piscina de 150x100x150 cm³ recubierta por polietileno de alta densidad. La piscina tiene agua y tiene como propósito alojar las fuentes de neutrones. Dentro de la sala hay una bancada de acero inoxidable de 250 cm de altura por 375 cm de longitud. Cuenta con una mesa de irradiación que permite colocar aparatos respecto al centro de la fuente. En la figura 1 [CIEMAT, 2013] 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.

En su diseño se procuró que las magnitudes a medir reciban poca influencia por las características de la sala. La bancada con la mesa móvil permite posicionar la base que soporta los equipos a calibrar sobre el eje radial de la fuente, respecto al eje axial de la fuente de neutrones.

En la figura 2 [CIEMAT, 2013] se muestra una de imagen de la sala de LPN, con la bancada y la piscina.

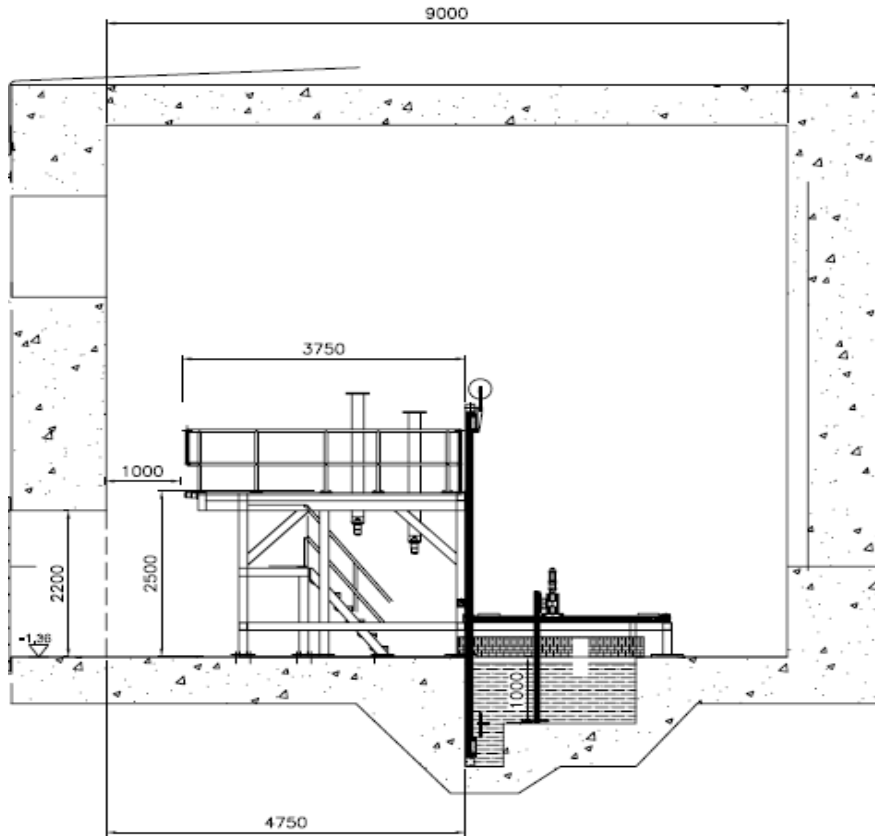


Figura 1.- Sala del LPN (medidas en mm).

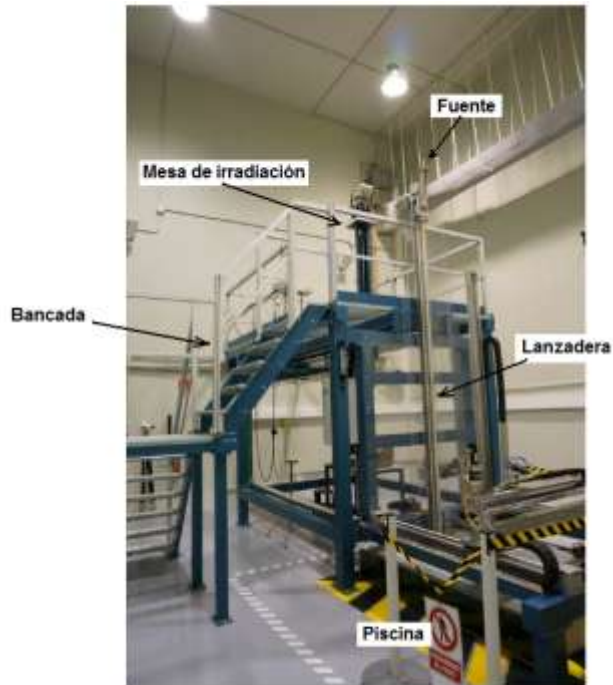


Figura 2.- Bancada del LPN-CIEMAT.

El LPN cuenta con dos fuentes de calibración, una es de $^{241}\text{AmBe}$ y la otra es de ^{252}Cf , ambas son las recomendadas por la norma ISO-8529-2 [ISO, 1998] para la calibración de monitores y dosímetros neutrónicos debido a que sus propiedades están bien determinadas [Vega-Carrillo *et al.*, 2009].

La fuente de ^{252}Cf del LPN tiene 250 μgr de ^{252}Cf , su actividad es de 5 GBq y emite $5.75 \times 10^8 \text{ seg}^{-1}$. La fuente mide 7.8 mm de diámetro por 10.0 mm de altura donde el Californio está disperso en una matriz cerámica con un doble encapsulado de acero inoxidable A316 de 1 mm de espesor soldado para garantizar su integridad en cualquier condición. Esta fuente está encerrada dentro de una cápsula que se manipula con un porta cápsula. En la figura 3 se muestran los detalles de esta fuente.

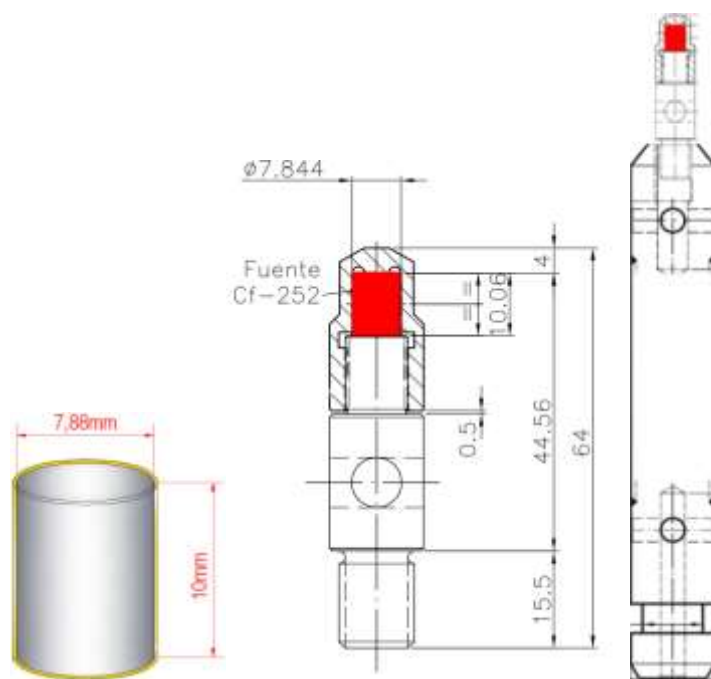


Figure 3.- Fuente de ^{252}Cf con su encapsulado, la cápsula y el porta cápsula.

La fuente de $^{241}\text{AmBe}$ tiene una actividad de 185 GBq, su tasa de emisión de $1.1 \times 10^7 \text{ seg}^{-1}$ Ese tipo de fuentes es óxido de americio, principalmente ^{241}Am , 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.

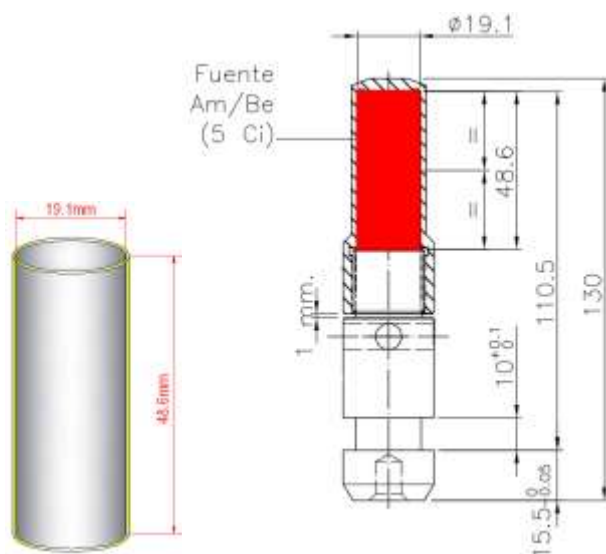


Figura 4.- Fuente de $^{241}\text{AmBe}$ encapsulada y dentro de su dispositivo portador.

2.2.- Cálculos Monte Carlo

Mediante el código MCNPX [Pelowitz, 2005] se construyó un modelo tridimensional de la sala del LPN. En el modelo se incluyeron los detalles de las fuentes, como se muestra en la figura 5.



Figura 5.- Modelos de las fuentes de neutrones.

También, se modelaron la mayoría de los elementos cuya presencia impacta en el transporte de neutrones, como la bancada, en particular la plataforma o mesa de irradiación donde se colocan los dispositivos a calibrar, el soporte de la fuente y la piscina de almacenamiento. En la figura 6 se muestran dos vistas del modelo de la bancada y la piscina.

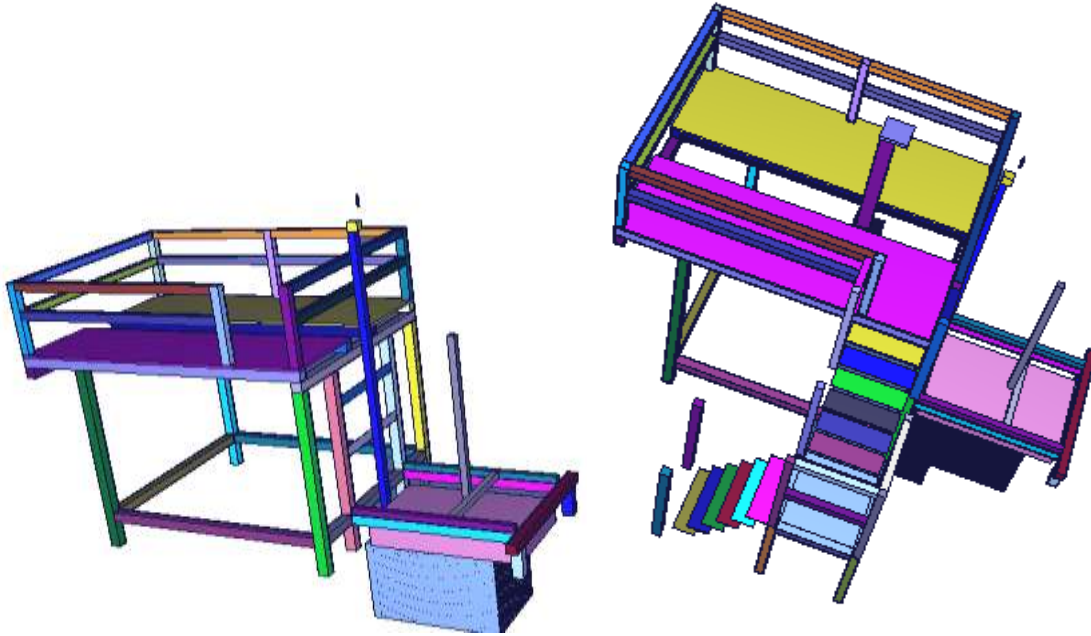


Figura 6.- Modelo de la bancada y la piscina.

Con el fin de conocer las características del campo neutrónico dentro de la sala, el modelo se modificó para evaluar el impacto de mantener una fuente en posición en la bancada, mientras que la otra se mantenía en la piscina. Para cada modelo se usó el código MCNPX para emular el transporte de los neutrones de la fuente hacia la sala. En los cálculos se colocaron detectores puntuales a distancias de 15, 35, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275 y 300 cm sobre la plataforma. Para cada caso se calculó el espectro de los neutrones, $\Phi_E(E)$, que se usó para determinar la fluencia total de neutrones, ϕ , mediante la ecuación 1 [Gallego, Lorente and Vega-Carrillo, 2004].

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

Con los espectros, también se estimaron los valores de la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$, mediante la ecuación 2.

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

En esta ecuación $h^*(10)$ representa los coeficientes de conversión de fluencia a dosis equivalente ambiental del ICRP 74 [ICRP, 1996].

Para caracterizar el campo neutrónico debido a cada fuente, los cálculos se hicieron usando diferentes casos donde se modificaron los elementos de la sala del LPN. Para el caso de la fuente de $^{241}\text{AmBe}$ los cálculos se realizaron bajo las siguientes condiciones:

- Caso 0: $^{241}\text{AmBe}$ fuente puntual en el vacío.
- Caso 1: $^{241}\text{AmBe}$ fuente puntual con aire.
- Caso 2: $^{241}\text{AmBe}$ fuente real en capsula.
- Caso 3: $^{241}\text{AmBe}$ fuente real en capsula y porta capsula.
- Caso 4: $^{241}\text{AmBe}$ fuente real en capsula y sala.
- Caso 5: $^{241}\text{AmBe}$ fuente real en capsula, porta capsula y sala.
- Caso 6: $^{241}\text{AmBe}$ fuente a 4 m del suelo con bancada.
- Caso 7: $^{241}\text{AmBe}$ fuente a 4 m del suelo con bancada con lanzadera.
- Caso 8: $^{241}\text{AmBe}$ fuente a 4 m del suelo con bancada mesa de irradiación, piscina cerrada.
- Caso 9: $^{241}\text{AmBe}$ fuente a 4m del suelo con bancada mesa de irradiación, piscina abierta.

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

- Caso 0: ^{252}Cf fuente puntual en el vacío.
- Caso 1: ^{252}Cf fuente puntual en el aire.
- Caso 2: ^{252}Cf fuente real en capsula.
- Caso 3: ^{252}Cf fuente real en capsula y porta capsula.
- Caso 4: ^{252}Cf fuente real en capsula, porta capsula y carro porta capsula.
- Caso 5: ^{252}Cf fuente real en capsula y sala.
- Caso 6: ^{252}Cf fuente real en capsula, porta capsula y sala.
- Caso 7: ^{252}Cf fuente real en capsula, porta capsula y carro porta capsula y sala.
- Caso 8: ^{252}Cf fuente real a 4 m de distancia del suelo con bancada.
- Caso 9: ^{252}Cf fuente real a 4 m de distancia del suelo con bancada con mesa de irradiación, piscina de almacenamiento de fuentes cerrada.
- Caso 10: ^{252}Cf fuente real a 4 m de distancia del suelo con bancada, con mesa de irradiación, piscina de almacenamiento de fuentes abierta.

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

En la tabla 1 se muestran los valores de la $H^*(10)$ del $^{241}\text{AmBe}$ para los 9 casos y en dos puntos a 0 cm (contacto) y a 100 cm. Los resultados Monte Carlo se escalaron a la rapidez de emisión de la fuente. Bajo estas mismas características, en la tabla 2 se muestran los resultados de la fuente de ^{252}Cf .

Tabla 1. $H^*(10)$ del $^{241}\text{AmBe}$, a 0 y 100 cm de distancia, para los 9 casos

Caso	$H^*(10)$ [$\mu\text{Sv/h}$]	
	Distancia	Distancia
	0 [cm]	100 [cm]
0	1236142	124
1	1236268	124
2	449001	126
3	324960	128
4	449044	137
5	324976	140
6	325295	142
7	325175	142
8	325148	144
9	325096	144

Tabla 2. $H^*(10)$ del ^{252}Cf , a 0 y 100 cm, para los 10 casos estudiados.

Caso	$H^*(10)$ [$\mu\text{Sv/h}$]	
	Distancia	Distancia
	0 [cm]	100 [cm]
0	64019925	6402
1	64028412	6458
2	65149938	6473
3	34269057	6587
4	34275267	6613
5	65150766	7103
6	34268643	7213
7	34285203	7237
8	34268850	7359
9	16236832	7467
10	16237018	7465

En la figura 7 y 8 se muestran los espectros de neutrones del $^{241}\text{AmBe}$ y el ^{252}Cf respectivamente, a 100 cm de distancia, para los casos calculados.

En la figura 9 se presentan los espectros del $^{241}\text{AmBe}$ en la bancada, a diferentes distancias, cuando la fuente de ^{252}Cf se encuentra en la piscina abierta.

En la figura 10 se muestran los espectros de la fuente de ^{252}Cf , a diferentes distancias en la bancada, cuando la fuente de $^{241}\text{AmBe}$ se encontraba dentro de la piscina y ésta se encontraba cerrada.

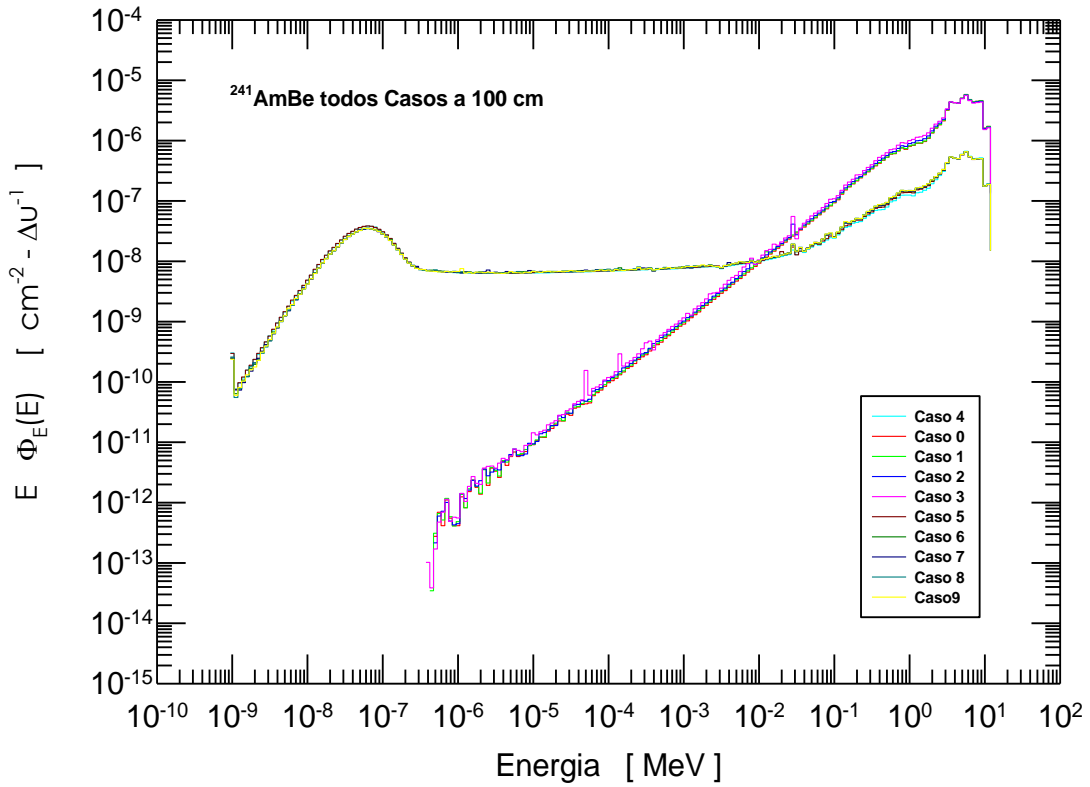


Figura 7.- Espectros del $^{241}\text{AmBe}$, a 100 cm de distancia de la fuente, para los 9 casos.

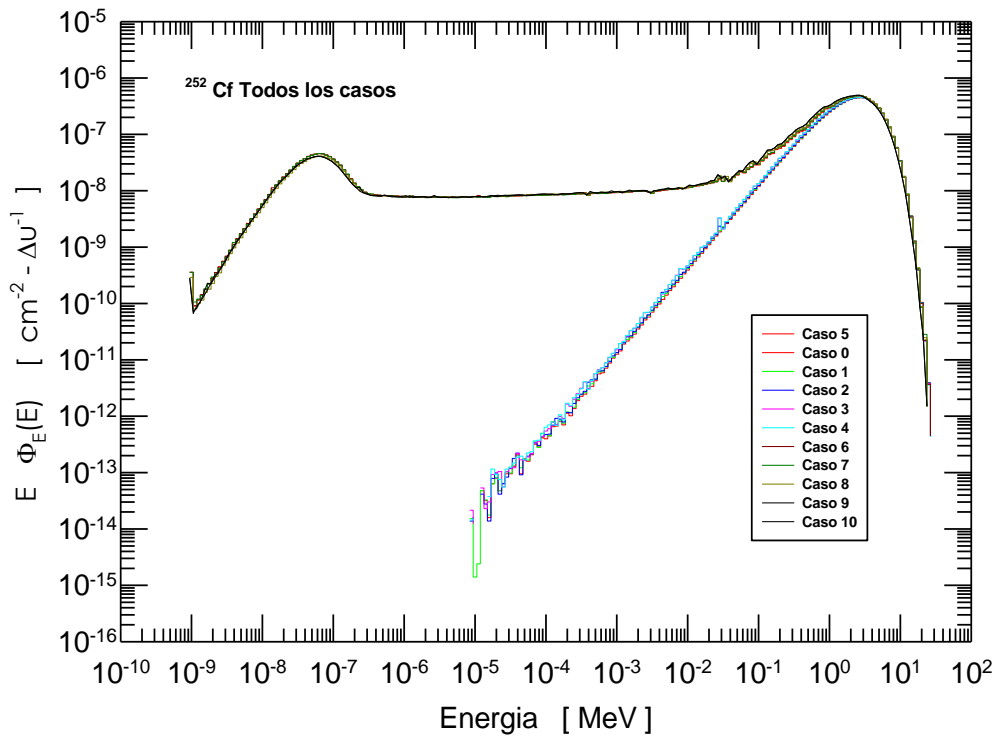


Figura 8.- Espectros del ^{252}Cf , a 100 cm de distancia, para los 10 casos.

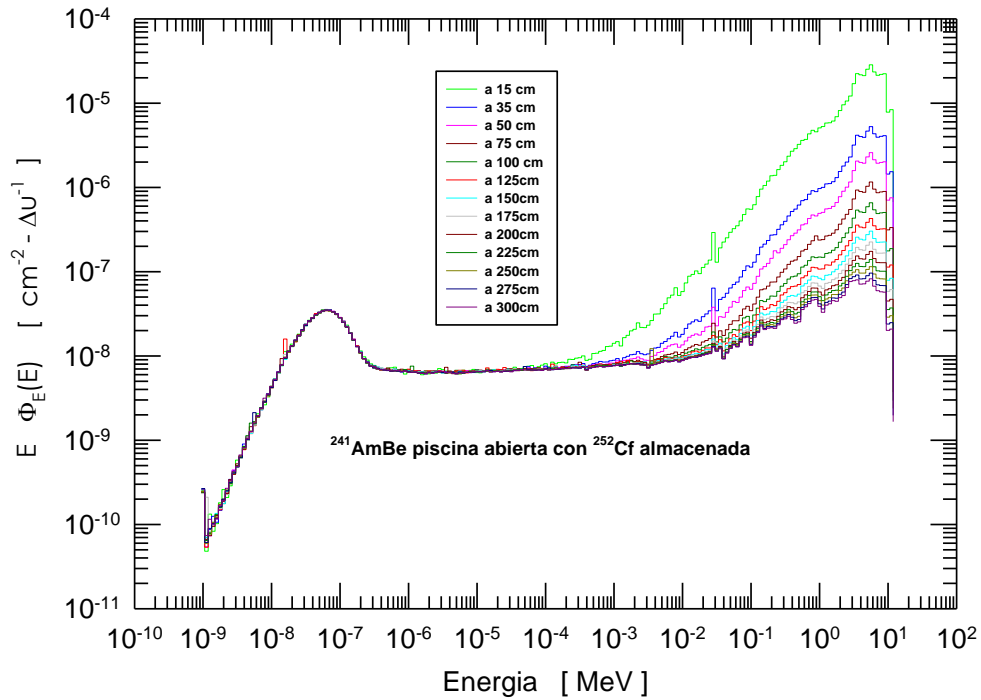


Figura 9.- Espectros del $^{241}\text{AmBe}$ a diferentes distancias con el ^{252}Cf en la piscina abierta.

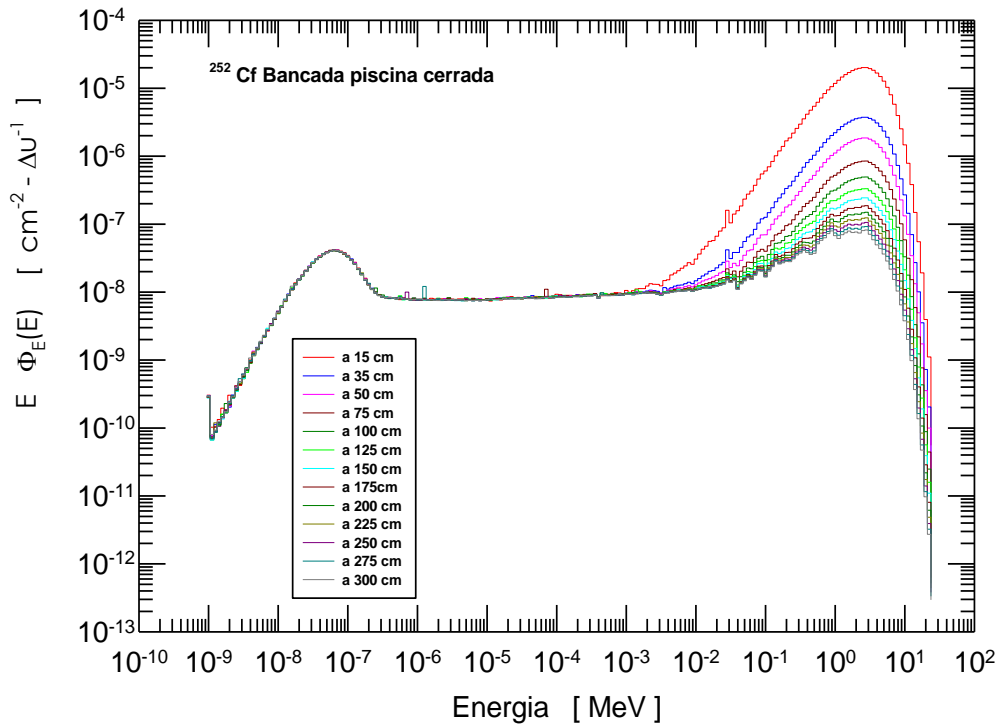


Figura 10.- Espectros del ^{252}Cf a diferentes distancias, con el $^{241}\text{AmBe}$ en la piscina cerrada

En la tabla 3 se incluyen los valores del flujo total de neutrones producido por la fuente de $^{241}\text{AmBe}$, a diferentes distancias y para los 9 casos estudiados. Estos valores se obtuvieron escalando los valores calculados con el valor de la rapidez de emisión de la fuente.

Tabla 3. Flujo de neutrones, en $\text{cm}^{-2}\text{-seg}^{-1}$, del $^{241}\text{AmBe}$ a distintas distancias para los 9 casos estudiados.

Distancia [cm]	ϕ_0	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7	ϕ_8	ϕ_9
0	875353	875452	318580	231083	318625	231113	231350	231279	231252	231219
15	3891	3896	3937	4032	3963	4057	4060	4063	4063	4063
35	715	717	725	743	750	768	770	772	772	772
50	350	352	356	365	381	390	392	394	394	394
75	156	155	158	162	184	188	190	191	191	191
100	88	87	89	91	114	117	118	119	120	120
125	56	57	57	59	82	84	85	85	87	87
150	39	39	40	41	65	66	67	67	69	69
175	29	29	29	30	54	55	56	56	57	57
200	22	22	22	23	47	48	49	49	49	49
225	17	18	18	18	43	43	44	44	44	44
250	14	14	14	15	39	40	41	40	41	41
275	12	12	12	12	37	37	38	38	38	38
300	10	10	10	10	35	36	36	36	36	36

En la tabla 4 se presentan los valores del flujo total de neutrones del ^{252}Cf , a diferentes distancias y para los 10 casos estudiados. Estos valores se obtuvieron escalando los valores calculados con el valor de la rapidez de emisión de la fuente.

Tabla 4. Flujo de neutrones, en $\text{cm}^{-2}\text{-seg}^{-1}$, del ^{252}Cf a distintas distancias del caso 3 al caso10.

Distancia [cm]	ϕ_3	ϕ_4	ϕ_5	ϕ_6	ϕ_7	ϕ_8	ϕ_9	ϕ_{10}
0	24579410	24584125	46658720	24580388	24595165	24583263	24583320	24583550
15	208474	209247	205951	210034	210813	210912	211126	211128
35	38390	38552	39186	39953	40096	40201	40336	40336
50	18842	18923	20023	20403	20473	20571	20668	20666
75	8392	8428	9780	9953	10046	10067	10143	10139
100	4730	4751	6189	6287	6301	6377	6462	6457
125	3032	3045	4523	4587	4597	4670	4776	4768
150	2108	2116	3615	3661	3662	3726	3811	3804
175	1549	1556	3065	3099	3098	3153	3197	3195
200	1187	1192	2707	2734	2733	2778	2801	2796
225	938	942	2461	2484	2489	2527	2531	2530
250	759	762	2284	2305	2308	2336	2336	2335
275	627	630	2156	2173	2177	2199	2194	2191
300	526	528	2059	2075	2077	2093	2081	2079

4.- DISCUSION

En la tabla 1 se observa que los valores de la $H^*(10)$, a 100 cm de la fuente de $^{241}\text{AmBe}$, para los casos 0 y 1 son iguales. Para el caso del ^{252}Cf , como se muestra en la tabla 2, la diferencia entre estos mismos casos es despreciable ya que la dosis para el caso 1 es 0.8% mayor que en el caso 0, por lo cual la inclusión del aire en los modelos puntuales de las fuentes no afecta el valor de la dosis en comparación con el caso de la fuente en el vacío.

Cuando se usa el modelo real de la fuente de $^{241}\text{AmBe}$, caso 3, y está en el porta cápsula (caso 4), la dosis se incrementa en 1.6 y 3.2% en comparación de la dosis producida por la fuente puntual en aire (caso 2). Estos valores son 1.8 y 2.2% para el caso del ^{252}Cf , estos valores son diferentes en comparación con el $^{241}\text{AmBe}$, probablemente porque la energía media de los neutrones del ^{252}Cf es menor que la del $^{241}\text{AmBe}$, y al hecho de que la fuente de ^{252}Cf es más pequeña y la autoabsorción de neutrones es menor; así, el encamisado del ^{252}Cf modifica ligeramente el espectro de los neutrones, y permite que una mayor cantidad alcance el punto del cálculo.

Cuando las fuentes se colocan en el porta cápsula, se nota que el incremento de la dosis se invierte, siendo mayor para el caso del $^{241}\text{AmBe}$, esto se debe a que el material de porta cápsula absorbe un mayor número de neutrones de ^{252}Cf .

El efecto de incluir los muros de la sala la $H^*(10)$ es 2.2% mayor al caso de la fuente en el porta cápsula sin los muros para el caso del $^{241}\text{AmBe}$, este valor alcanza una diferencia de 7.41% para el caso del ^{252}Cf . Esto se atribuye a la retrodispersión de los neutrones en los muros de la sala que para el caso del ^{252}Cf , debido a que su energía media es menor son retrodispersados después de transportarse a poca profundidad en los muros, por otro lado los neutrones de $^{241}\text{AmBe}$, debido a su energía media, alcanzan mayores profundidades donde son también absorbidos, así pocos son retrodispersados y contribuyen con una menor dosis.

Cuando se incluye la bancada (caso 6 para el $^{241}\text{AmBe}$ y caso 8, para el ^{252}Cf), la dosis aumenta en 1.4% cuando se compara con la fuente sin la bancada (caso 5) para el caso del $^{241}\text{AmBe}$, mientras que para el caso del ^{252}Cf aumenta en 1.7% (caso 8 comparado con el caso 7). Bajo estas condiciones se observa que el efecto de los materiales de la bancada es relativamente pequeño y aproximadamente igual para las dos fuentes.

Para el caso del $^{241}\text{AmBe}$ se observa que el hecho de que la piscina esté cerrada (caso 8) o abierta (caso 9) no tiene ningún efecto en la $H^*(10)$ ya que es la misma. Esto mismo ocurre para el caso del ^{252}Cf , ya que al compararla la dosis con la piscina cerrada (caso 9) y abierta (caso 10) la diferencia es de 0.03%.

En las figuras 7 y 8 se observa como los espectros del $^{241}\text{AmBe}$ y el ^{252}Cf cambian significativamente a partir de la inclusión de los muros de la sala de LPN. El principal cambio se traduce en la aparición de los neutrones epitérmicos y térmicos debido al fenómeno conocido como *room-return* [Vega-Carrillo *et al.*, 2007a]. Este mismo fenómeno se observa en las figuras 9 y 10 donde la cantidad de neutrones rápidos disminuye conforme la distancia respecto a la fuente aumenta, sin embargo los epitérmicos y térmicos se mantienen constantes sin importar la distancia respecto a la fuente; esto es una característica del *room-return*, tal y como ha sido señalado en la literatura [Vega-Carrillo *et al.*, 2007b].

5.- CONCLUSIONES

Con el fin de caracterizar el campo neutrónico que producen las fuentes de calibración del LPN-CIEMAT se estimaron los espectros de neutrones en distintos puntos sobre la bancada y con usando diferentes condiciones, donde se modificaron los elementos cuya presencia influyen en el transporte de los neutrones, modificando el espectro y los valores de la $H^*(10)$.

Los muros de la sala del LPM modifican los espectros de neutrones, su presencia propicia el fenómeno del *room-return* en los espectros.

Con una de las fuentes en la posición de irradiación en la bancada y la otra en la piscina, se encontró que los espectros y las dosis a lo largo de las posiciones de irradiación sobre la bancada no se ven afectados, para el caso de la piscina cerrada o abierta.

Agradecimientos

La primer autora 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.

REFERENCIAS

- CIEMAT. [online]. *El Laboratorio de Patrones Neutrónicos comienza a funcionar como referencia nacional*. (2013). Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. < <http://www.ciemat.es/portal.do?IDM=61&NM=2&identificador=301>>. [Reviewed on February 2014].
- Gallego, E.; Lorente, A.; Vega-Carrillo, H.R. (2004). *Characteristics of the neutron fields on the facility at DIN-UPM*. Radiation Protection Dosimetry **110**: 73-79.
- ICRP. (1996). *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*. ICRP Publication 74. Annals of the ICRP **26**: 199.
- ISO. (1998). 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, 24 February 1998.
- Pelowitz, D.B. (2005). *MCNPX User's Manual Version 2.5.0*. Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-05-0369. Los Alamos NM, EUA.
- Méndez-Villafañe, R. (2007). *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. 18-21 de Septiembre, Tarragona, España.

- Tripathy SP; Bakshi AK; Sathian V; Tripathi SM; Vega-Carrillo HR; Nandy M; Sarkar PK; Sharma DN. (2009). *Measurements 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**: 556-560
- Vega-Carrillo, H.R.; Manzanares, E. (2004). *Background neutron spectrum at 2420 m above sea level*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A **524**: 146-151.
- Vega-Carrillo, H.R.; Manzanares, E.; Hernandez-Davila, V.M.; Mercado, G.A.; Gallego, E.; Lorente, A. (2005). *Características dosimétricas de fuentes isotópicas de neutrons*. Revista Mexicana de Física **51**: 494-501.
- Vega-Carrillo, H.R.; Manzanares, E.; Iñiguez, M.P.; Gallego, E.; Lorente, A. (2007a). *Study of room-return neutrons*. Radiation Measurements **42**: 413-419.
- Vega-Carrillo, H.R.; Manzanares, E.; Iñiguez, M.P.; Gallego, E.; Lorente, A. (2007b). *Spectrum of isotopic neutron sources inside concrete walls spherical cavities*. Radiation Measurements **42**: 1373-1379.
- Vega-Carrillo, H.R.; Martinez-Blanco, M.R.; Hernandez-Davila, V.M.; Ortiz-Rodriguez, J.M. (2009). *Spectra and dose with ANN of ^{252}Cf , $^{241}\text{AmBe}$, and $^{239}\text{PuBe}$* . Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **281**: 615-618.