

CARACTERIZACIÓN Y EMPLEO DE “CONOS DE SOMBRA” EN UN LABORATORIO PARA CALIBRACIÓN NEUTRÓNICA

E. Gallego Díaz^{1,*}, A. del Valle Díez¹, A. Lorente Fillol¹,

H.R. Vega Carrillo², R. Méndez Villafañe³, S. Ibáñez Fernández¹

¹Depto. de Ingeniería Nuclear, ETSII, Univ. Politécnica de Madrid

²Unidad Académica de Estudios Nucleares, Univ. Autónoma Zacatecas, México

³Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes, CIEMAT, Madrid

RESUMEN

Introducción: En laboratorios de calibración neutrónica, si las diferencias entre los espectros neutrónicos “en el lugar de trabajo” y los utilizados en la instalación de calibración son muy acusadas, resulta muy complicado obtener factores de normalización adecuados, siendo conveniente tratar de producir campos neutrónicos “realistas”, es decir, cuyo espectro energético sea similar al existente en el lugar de trabajo, lo que permitiría la calibración directa de los instrumentos dosimétricos. Uno de los métodos utilizados, es el método de los “conos de sombra”.

En este trabajo se presentan el diseño, caracterización y empleo de los conos de sombra del Laboratorio de medidas neutrónicas del Departamento de Ingeniería Nuclear de la ETSII-UPM (LMN-UPM), empleándose una fuente de ²⁴¹Am-Be.

Material y métodos: Se interponen entre la fuente y el detector los conos de sombra y se estima con el código MCNP5, tanto para la radiación total como para la dispersada, las siguientes magnitudes: distribución espectral en energías, fluencia y dosis equivalente ambiental. Además, se han efectuado medidas sin conos y con ellos, empleando el sistema de espectrometría con esferas de Bonner, obteniendo el espectro mediante su deconvolución con el programa BUNKI. También se ha medido la tasa de dosis equivalente ambiental con un monitor Berthold LB6411 calibrado.

Resultados: Los resultados obtenidos son plenamente coherentes y quedan validados experimentalmente. Por ejemplo, detrás de cada cono, la radiación dispersa debería ser la misma, lo que se verifica en los cálculos ya que se obtienen espectros casi idénticos para todos ellos.

Conclusiones: Cabe concluir que tanto cálculos como experimentos confirman la finalidad perseguida con el empleo de los “conos de sombra”, permitiendo discernir perfectamente entre las componentes directa y dispersada de la radiación neutrónica.

Palabras clave: Neutrón, fuente de neutrones, Am-Be, radiación dispersa, conos de sombra

ABSTRACT

Introduction: In neutron calibration laboratories, if differences between the neutron spectrum "at the workplace" and the one used in the calibration facility are very marked, it is very difficult to obtain appropriate normalization factors and it will be desirable to attempt to produce neutron "realistic" fields, i.e. whose energy spectrum is similar to that in the workplace, allowing direct calibration of dosimetric instruments. One method used is the "shadow cone method".

We present the design, characterization and use of shadow cones of the Neutron Measurements Laboratory of the Department of Nuclear Engineering, UPM ETSII (LMN-UPM), using an ²⁴¹Am-Be source.

* eduardo.gallego@upm.es

Material and methods: Interposing between the source and the detector a shadow cone, and using MCNP5 code, the following quantities are estimated for both, the total radiation and the scattered radiation: neutrón spectral energydistribution, neutron fluence and ambient dose equivalent. In addition, measurements were performed without cones and with them, using the Bonner sphere spectrometer system, obtaining the spectrum by deconvolution with the BUNKI program. Also the ambient dose equivalent rate is measured with a calibrated monitor Berthold LB6411.

Results: The results are fully consistent and are experimentally validated. For example, behind each cone, the scattered radiation should be the same, which is verified in the calculations and in the measurements, with an almost identical spectrum obtained for all of them.

Conclusions: We conclude that both calculations and experiments confirm the purpose of the use of "shadow cone", allowing perfectly distinguish between the direct and scattered neutron radiation.

Key Words: Neutron, neutrón source, Am-Be, scattered radiation, shadow cone

1. Introducción.

En un laboratorio de calibración neutrónica, para disponer de un patrón de calibración a partir de una fuente isotópica de neutrones, lo ideal sería poder trabajar en un "campo libre", es decir, aquel en el que se tuviera solamente la fluencia que viene directamente de la fuente, en ausencia de cualquier radiación dispersada. Desde hace años se han propuesto procedimientos estándar de calibración que resulten independientes del laboratorio de calibración y de la técnica experimental usada. La norma ISO-8529^{1, 2, 3} recoge las conclusiones de dichos trabajos y propone varios métodos alternativos, entre ellos el del llamado "cono de sombra", cuyo principal atractivo reside en su naturaleza puramente experimental.

Por otro lado, cuando las diferencias entre los espectros neutrónicos "en el lugar de trabajo" y los utilizados en la instalación de calibración son muy acusadas, resulta muy complicado obtener factores de normalización adecuados, siendo conveniente tratar de producir campos neutrónicos "realistas", es decir, cuyo espectro energético sea similar al existente en el lugar de trabajo, lo que permitiría la calibración directa de los instrumentos dosimétricos. En la norma ISO 12789⁴ se describen varios métodos con ese objetivo; entre ellos, teniendo fuentes isotópicas, se pueden aprovechar los neutrones reflejados en las paredes de la sala de irradiación, interponiendo entre la fuente y el detector unos "conos de sombra", para obtener espectros que resultan razonablemente próximos a los existentes en las centrales nucleares.

Se presentan el diseño, caracterización y empleo de los conos de sombra del Laboratorio de medidas neutrónicas del Departamento de Ingeniería Nuclear de la ETSII-UPM (LMN-UPM), que cuenta con una sala de irradiación de dimensiones 9m x 16m x 8m en la que se emplea una fuente de ²⁴¹Am-Be de 111 GBq (3 Ci).

2. Material y métodos

El tamaño adecuado del cono de sombra viene determinado por la geometría del experimento del usuario. Los conos de sombra con los que cuenta el laboratorio se han construido con 20 cm de hierro (en el lado cerca de la fuente) y 30 cm de politileno de alta densidad. La elección del diámetro de la base del cono más cercana a la fuente y ángulo de apertura viene determinada por el tamaño de la fuente de neutrones y el blanco de neutrones. Sus dimensiones (bases y ángulo de apertura) se adaptan para "dar sombra" completamente al instrumento de medida. En el caso del sistema de espectrometría mediante esferas de Bonner del Laboratorio, han hecho falta cuatro conos cuyas características se incluyen en la tabla 1.

Tabla 1. Conos de sombra. Dimensiones de las bases circulares de cada sección.

	Sección hierro (mm)	Sección polietileno (mm)
Cono 1	D=69,8 ; D=114,7	D=114,7 ; D=182
Cono 2	D=67,5 ; D=106	D=106 ; D=164
Cono 3	D=58,9 ; D=72,9	D=72,9 ; D=92,8
Cono 4	D=54,6 ; D=59,2	D=59,2 ; D=66,1

Para su caracterización se ha utilizado el modelo existente del LMN-UPM para MCNP5⁵, verificándolo y mejorándolo en cuanto a la forma de modelar la fuente, así como para permitir incluir un mayor número de elementos geométricos y celdas de materiales en el mismo, necesario para incorporar al mismo los conos de sombra. Se ha utilizado como apoyo en la elaboración del modelo el programa VISED (Visual Editor)⁶. Para los puntos de referencia de la bancada de irradiación, tanto para la radiación total como para la dispersada, se han estudiado las siguientes magnitudes: distribución espectral en energías, fluencia, dosis equivalente ambiental.

Se han probado diferentes “tallies” o funciones respuesta del código MCNP5; concretamente el tipo f4 y el f5:

- El tally f4 es un estimador de la fluencia (en cm⁻²) en la celda o celdas consideradas, es decir

$$F4 = \iiint \phi(\bar{r}, E, t) dEdt \frac{dV}{V} \quad (1)$$

- El tally f5 se utiliza para calcular fluencia (en cm⁻²) en detectores puntuales.

Se ha calculado el espectro neutrónico en dos estructuras de intervalos de energía para su caracterización con el código MCNP5 y se ha utilizado una tercera para el cálculo de dosis. La primera estructura de intervalos de energía la llamaremos estructura BUNKI y cuenta con 26 intervalos de energía. Se ha elegido esta estructura para poder comparar con los resultados experimentales deconvolucionados con el programa BUNKI⁷.

La segunda estructura de intervalos de energía está formada por intervalos equiletárgicos de 20 bins por década. Se ha elegido esta estructura por caracterizar de un modo más fino el espectro.

Se ha utilizado también una tercera estructura de intervalos de energía igual a la que aparece en la publicación ICRP74⁸, utilizada para los “tallies” de dosis. Para el cálculo de la dosis equivalente ambiental se han utilizado los factores de conversión fluencia-dosis, $h(\varepsilon)$, de la ICRP74 así como los correspondientes al detector Berthold LB6411⁹ (unidades pSv·cm²), para estimar la respuesta del detector, de la forma siguiente:

$$H^*(10) = \int_E h(\varepsilon) \varphi_\varepsilon(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2)$$

En los experimentos, el esquema de montaje seguido es el definido por la norma ISO-8529. La cara más cercana del cono se situó a 8 cm de la fuente y el centro de la esfera del detector quedó situado a 115 cm del centro geométrico de la fuente.

Además, se han efectuado medidas sin conos y con ellos, empleando el sistema de espectrometría de esferas de Bonner, obteniendo el espectro mediante su deconvolución con el programa BUNKI, empleando la matriz de respuesta UTA-4¹⁰. También se ha medido la tasa de dosis equivalente ambiental con un monitor Berthold LB6411 calibrado.

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos son plenamente coherentes en todos sus aspectos. Se observa en la figura 1 la diferencia entre el espectro con cono y sin cono. El espectro con cono representa la radiación dispersa, o "room return". Ambos espectros difieren en la zona rápida, siendo la del caso sin cono superior, debido a que el cono absorbe la radiación directa que llega al detector directamente de la fuente. En el resto del rango de energías ambos espectros son iguales.

En todos los espectros se observan dos picos, uno ubicado en la zona térmica que aparece para energías menores a $4,14 \text{ E}^{-7} \text{ MeV}$ y el otro ubicado aproximadamente en 4 MeV . Para el caso con cono, el pico en la zona alta de energía disminuye con respecto al caso sin cono, por la razón explicada anteriormente. Sin embargo, la magnitud del pico térmico se mantiene constante. Este comportamiento del grupo térmico representa la contribución característica de los neutrones dispersados por las paredes y suelo de la sala de Medidas Neutrónicas de la UPM, y se debe principalmente a las dimensiones del recinto; a esta característica se le conoce como "room return".

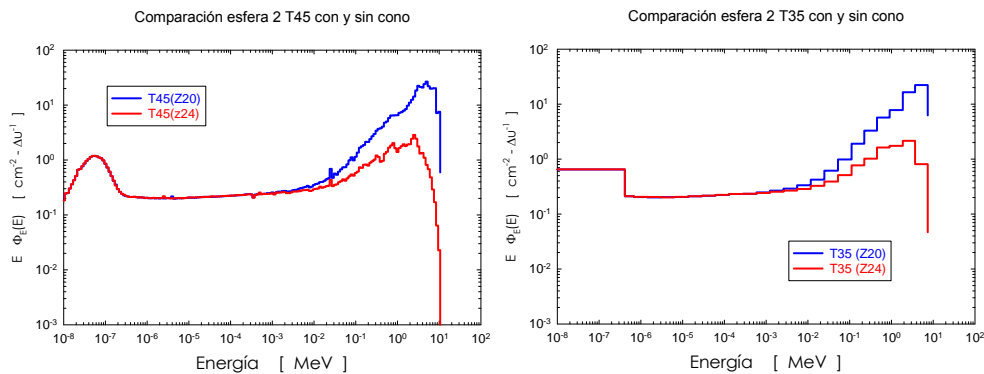


Fig. 1 Comparación de los espectros neutrónicos por unidad de letargia para los casos con y sin cono con los dos tipos de estructuras de energía (fina, a la izquierda; gruesa, a la derecha).

La radiación dispersa obtenida debería ser la misma detrás de cada cono, lo que se verifica en los cálculos, ya que se obtienen espectros casi idénticos para todos ellos (figura 2), quedando así caracterizada la radiación dispersa de la sala de medidas del Laboratorio.

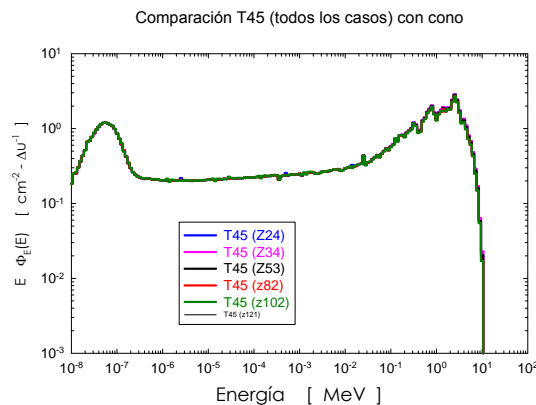


Fig. 2 Comparación de los espectros por unidad de letargia obtenidos con MCNP5 en los 6 casos con cono planteados.

Si se comparan los espectros obtenidos a partir del tally puntual (f5) con los obtenidos a partir del tally evaluado en una celda (f4) se comprueba que los estimadores puntuales son más apropiados

para el cálculo de espectros (figura nº 3), ya que en la zona térmica del espectro evaluado en una celda aparecen fluctuaciones (rosa) no quedando el espectro bien definido. Estas fluctuaciones se hacen más patentes cuando se simulan los casos de las esferas Bonner más pequeñas (detector), por ser menor el volumen de la celda en la que se evalúa el tally. La única manera de eliminarlas sería aumentando mucho el número de historias simulado con el Monte Carlo, lo cual lleva a consumir muchos recursos de cálculo.

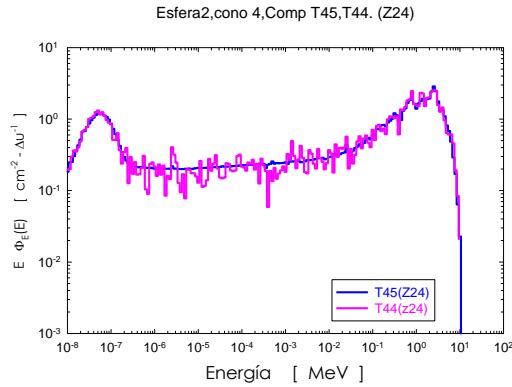


Fig. 3 Comparación de los espectros por unidad de letargia estimados con tally puntual (azul) y con tally evaluado en una celda (rosa).

Los resultados experimentales se muestran en la figura 3. La radiación directa se calcula como la diferencia entre el haz directo (sin cono, azul en la fig. 3) y la radiación dispersa (con cono, rojo en la fig. 3).

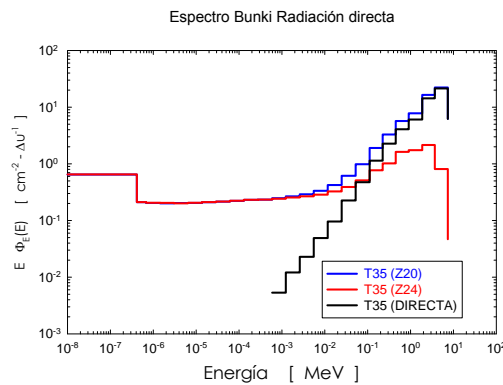


Fig. 3 Espectros por unidad de letargia obtenidos experimentalmente con el sistema de esferas Bonner y el código BUNKI-UT. El espectro de radiación directa se obtiene por diferencia.

Al representar gráficamente los resultados de cálculos y medidas experimentales-deconvolución del espectro (figura 4), se observa la perfecta coherencia. Se comprueba además como una estructura más fina del espectro energético no altera las conclusiones, resultando los espectros coherentes entre sí.

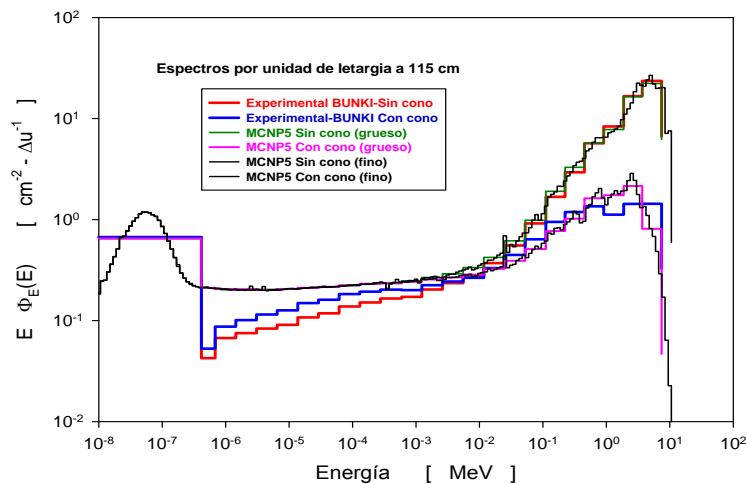


Fig. 4 Espectros por unidad de letargia, con cono y sin cono de sombra, calculados con MCNP5 y obtenidos experimentalmente.

Por último, se ha calculado la dosis equivalente ambiental, $H^*(10)$, a 115 cm de la fuente, con los coeficientes de conversión fluencia-dosis de la ICRP74 y del Berthold LB6411, y han contrastado con las medidas experimentales obtenidas con un monitor Berthold LB6411 calibrado. Los resultados se muestran en la tabla 2. La respuesta del detector Berthold subestima $H^*(10)$ en la zona térmica del espectro, y esto se refleja principalmente en la dosis debida a la radiación dispersa.

Tabla 2. Dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$). Medidas experimentales con el monitor Berthold LB6411 calibrado y comparación con los cálculos con MCNP5 empleando los factores de paso fluencia-dosis del propio monitor y de la ICRP74.

	Experimental		Berthold		ICRP74	
	Tasa en base a la acumulada en 460 s ($\mu\text{Sv/h}$)	Error estadístico \pm	Monte-Carlo. T24 ($\mu\text{Sv/h}$)	Monte-Carlo. T25 ($\mu\text{Sv/h}$)	Monte-Carlo. T14 ($\mu\text{Sv/h}$)	Monte-Carlo. T15 ($\mu\text{Sv/h}$)
Total	62,1	0,4	64,4 \pm 0,2%	64,2 \pm 0,01%	62,9 \pm 0,2%	62,9 \pm 0,01%
Dispersa	6,5	0,1	6,93 \pm 0,5%	6,91 \pm 0,04%	7,2 \pm 0,48%	7,18 \pm 0,04%
Directa	56	0,4	57,5 \pm 0,7%	57,3 \pm 0,04%	55,7 \pm 0,52%	55,7 \pm 0,04%

4. Conclusiones.

Cabe concluir que tanto cálculos como experimentos confirman la finalidad perseguida con el empleo de los “conos de sombra”, ya que estos permiten discernir perfectamente entre las componentes directa y dispersada de la radiación neutrónica existente en el punto de medida.

Además, con los conos de sombra se dispone de un campo de radiación neutrónica mucho más “realista” con respecto a los que existen en centrales nucleares, para su uso en calibración de instrumentos de dosimetría neutrónica, que es el fin perseguido por el Laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] International Standard ISO 8529: 'Neutron reference radiations for calibrating neutron-measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy'; 1989.
- [2] International ISO, International Organization for Standardization. Reference neutron radiations. Calibration Fundamentals of Radiation Protection Devices Related to the Basic Quantities Characterizing the Radiation Field. ISO-Standard 8529, Part 2; 2000.
- [3] ISO, International Organization for Standardization. Reference Neutron Radiations. Characteristics and Methods of Production. ISO-Standard 8529, Part 1; 2001.
- [4] ISO, International Organization for Standardization. Reference Neutron Radiations: Characteristics, and methods of Production of Simulated Workplace Neutron Field. ISO-Standard NP 12789; 2000.
- [5] MCNP5, "X-5 Monte Carlo team, MCNP A general Monte Carlo N-particle transport code version 5," LANL Report LA-UR-03-1987. 2003.
- [6] Schwarz A.L., Schwarz R.A., and Carter L.L., MCNP/MCNPX Visual Editor Computer Code Manual. February, 2008.
- [7] Lowry, K.A., Johnson, T.L., Modifications to Iterative Recursion Unfolding Algorithms and Computer Codes to Find More Appropriate Neutron Spectra. Memorandum report 5340. US Naval Research Laboratory NRL, Washington, DC. 1984.
- [8] ICRP, "Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation," ICRP Publication 74, Ann. ICRP, 26. 1996.
- [9] Burgkhardt, B. et al., The Neutron Fluence and H*(10) Response of the New LB 6411 Rem Counter. Rad. Prot. Dosim. 70, pp. 361-364; 1997.
- [10] Hertel N.E., Davidson J.W., "The response of Bonner spheres to neutrons from thermal to 17.3 MeV," Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 238 509. 1985.