

# SISTEMA DE ESPECTROMETRÍA NEUTRÓNICA PARA EVALUACIONES EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

Gregori, B. ; Cruzate, J.A.; Papadópulos, S.; Lombardi, R\*.; Kunst, J.J.

Autoridad Regulatoria Nuclear- Av. Del Libertador 8250- Bs.As. Argentina.

\*Facultad de Ingeniería.UBA . Paseo Colón 850 -Bs. As. Argentina

*email: bgregori@cae.am.gov.ar*

La Autoridad Regulatoria Nuclear ha fijado, desde 1995, como límites anuales para la dosis efectiva de trabajadores y de público, 20mSv y 1mSv, respectivamente. En consecuencia, se hace necesario contar con sistemas con capacidad de medir bajas tasas de dosis efectiva. Para cumplimentar este objetivo se ha diseñado un sistema de espectrometría basado en la combinación de esferas de polietileno de distintos diámetros (esferas de Bonner, EB) con un contador proporcional de  $^3\text{He}$  sensible a neutrones térmicos. El detector se coloca en el centro de cada una de las esferas y tiene asociada una electrónica formada por un preamplificador de carga, un amplificador y un sistema multicanal que permite el análisis del espectro de salida.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados obtenidos en el desarrollo del espectrómetro de esferas, en los aspectos teóricos y experimentales. Se presenta la caracterización de la respuesta energética del sistema EB obtenida por medio de la calibración experimental en campos monoenergéticos de neutrones y de cálculos con el código MCNP-4A. Se comparan los resultados con los informados por PTB y IAEA. Las magnitudes de interés en protección radiológica son obtenidas con un error menor al 1%. El límite de detección del sistema presentado es de 140nSv/h.

Since 1995, the Nuclear Regulatory Authority has established the workers and public annual limits effective dose as 20 mSv and 1mSv respectively. By that fact, it is necessary to rely on measurement devices capable of determine small effective dose rates. In order to achieve those requirements it has been designed an spectrometric system based on the combination of several diameters polyethylene spheres (Bonner Spheres, E.B.), and an  $^3\text{He}$  proportional counter sensitive to thermal neutrons. The detector is placed in the centre of each of the spheres and the associated electronics (charge preamplifier, amplifier and multichannel system) allows the output spectra analysis.

In this work are shown the results obtained during the spheres spectrometer development, with respect to the theoretical and experimental points of view. The energetic response of the E.B. system obtained by the experimental calibration in neutron monoenergetic fields and that obtained by the MCNP-4A Code is shown. The results were compared with those from PTB and IAEA. The interest quantities in radiation protection are obtained with a precision better than 1%. The detection limit of this system has been stated in 140nSv/h.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Autoridad Regulatoria Nuclear ha fijado como límites anuales para la dosis efectiva de trabajadores y de público, 20mSv y 1mSv, respectivamente (1). En consecuencia, se hace necesario contar con sistemas con capacidad de medir tasas de dosis efectiva del orden de 100nSv/h.

La magnitud operativamente accesible en dosimetría y fácilmente relacionable con la dosis efectiva,  $E$ , es la dosis equivalente ambiental,  $H^*(10)$ . La dosis equivalente ambiental en un punto del campo de radiación es la dosis equivalente a una profundidad de 10mm en una esfera de 30 cm de diámetro, densidad unitaria y composición equivalente a tejido humano producida por el correspondiente campo alineado y expandido (2). A pesar que  $H^*(10)$  tiende a sobrestimar a  $E$  para ciertos rangos de energía, los instrumentos de campo han sido diseñados y calibrados

para medirla.

Por lo tanto frente a una situación próxima al límite es fundamental contar con mediciones más confiables. La única forma de lograrlo es conociendo el espectro del campo de radiación en estas condiciones de baja tasa de dosis efectiva.

La espectrometría en estas condiciones es difícil, pero se logra con un sistema históricamente conocido como espectrómetro de esferas de Bonner (EB). Este sistema, tiene una respuesta isotrópica, cubre el rango energético desde energías térmicas hasta decenas de MeV, tiene alta sensibilidad a neutrones y baja sensibilidad a radiación gamma para los niveles de tasa de dosis requeridos por los límites.

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados obtenidos en el desarrollo de un espectrómetro de esferas, en los aspectos teóricos y experimentales.

## 2. SISTEMA DE ESPECTROMETRIA

El sistema de espectrometría diseñado se basa en la combinación de esferas de polietileno de distintos diámetros con un contador proporcional sensible a neutrones térmicos.

La obtención del espectro de neutrones por medio de las mediciones realizadas con este dispositivo se logra debido al diferente grado de moderación de cada una de las esferas. El sistema, con las esferas de menor diámetro es más sensible a la parte de baja energía del espectro, mientras que con las de mayor diámetro lo es a la de alta energía. La componente térmica del campo de neutrones se evalúa directamente realizando mediciones con el detector desnudo y cubierto con 1mm de Cd.

Las esferas utilizadas son de densidad  $0.95 \text{ g/cm}^3$ , de polietileno, con diámetros de 2", 2.5", 3", 3.5", 4", 4.2", 5", 6", 7", 8", 9", 10", 12".

El detector de neutrones térmicos, de 8 atm de  $^3\text{He}$ , marca LMT, modelo 0.5NHF, es un cilindro de 9mm de diámetro y 10mm de longitud. Se coloca en el centro de cada una de las esferas y tiene asociada una electrónica formada por un preamplificador de carga, un amplificador y un sistema multicanal que permite el análisis del espectro de salida

La caracterización de la respuesta energética del sistema EB es posible de obtener por medio de la calibración experimental en campos monoenergéticos de neutrones y por medio de cálculos de transporte de neutrones.

Dado que los experimentos están limitados por el escaso número de haces disponibles en condiciones de calibración, se ha obtenido la respuesta teóricamente, modelando el sistema experimental descrito con el código Monte Carlo Neutron Photon (MCNP) (3). El código básicamente desarrolla el transporte de neutrones y fotones mediante el método Monte Carlo, utilizando las bibliotecas de secciones eficaces ENDF/B IV y ENDF/B V.

La respuesta de EB fue calculada para haces paralelos monoenergéticos de energías comprendidas entre el rango térmico y 20 MeV.

El error estadístico de la simulación es menor que el 3%.

En la Figura 1 se muestra la respuesta energética del sistema.

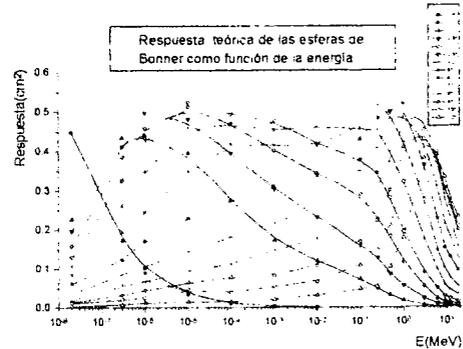


Figura 1: Respuesta del sistema EB en función de la energía de neutrones, para los distintos diámetros de las esferas y con el detector desnudo encapsulado en Cd.

Los resultados obtenidos se compararon con los experimentales obtenidos por el Physikalish Technische Bundesanstalt (PTB) (4) y los teóricos correspondientes a Organización Internacional de Energía Atómica (IAEA, en inglés) (5). En la Figura 2 se muestran las respuestas comparativas para la esfera de 10", observándose la muy buena correlación que existe entre ellos. La esfera de 10" se seleccionó por tener una respuesta similar a las funciones de conversión de fluencia en  $H^*(10)$ .

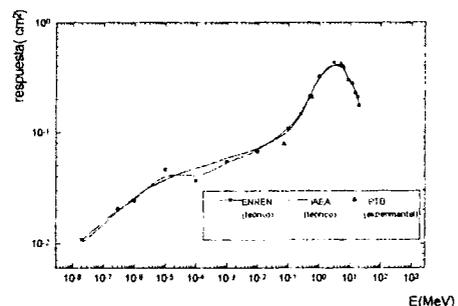


Figura 2: Comparación de la respuesta de la esfera de 10" de diámetro, en función de la energía.

Se realizó la validación experimental de la respuesta energética con una fuente de Am-Be, de  $1.14 \times 10^7 \text{ n/s}$ , con una energía media de 4.4MeV. El error estadístico asociado a la respuesta es de 8.7%.

En la Figura 3 se comparan la respuesta teórica con la experimental obtenidas en nuestro laboratorio. En ellas se puede observar una muy buena correspondencia entre ambas.

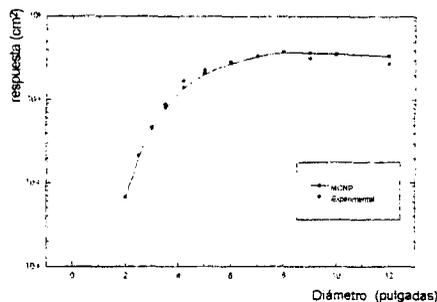


Figura 3: Comparación de la respuesta del sistema EB para el espectro de AmBe.

Para la obtención de un espectro de neutrones con el sistema EB se necesita aplicar un método de deconvolución. Se ha implementado el uso del código de deconvolución LOUHI82 (4). El código se basa en la resolución de la ecuación que describe la respuesta en un dado campo neutrónico para una dada fluencia en función de la energía

$$R_i = \int_{E_{min}}^{E_{max}} R_i(E) \phi(E) dE \quad (1)$$

$i=1, \dots, d$ ; donde  $d$  es el número de esferas

La integral puede expresarse en forma discreta como

$$R_i = \sum_{k} R_i(E_k) \phi(E_k) \Delta(E_k) \quad (2)$$

La matriz  $R_i(E_k)$  es la matriz de respuesta del espectrómetro EB, construida teóricamente como se explicó en el párrafo anterior.

El código utiliza el método de cuadrados mínimos con información adicional necesaria, como la no negatividad de la solución, la suavidad de la curva, la presentación de una solución inicial, etc. La solución aproximada inicial puede ser arbitraria pero lo ideal es que se aproxime a la real, para evitar que la solución diverja y no encuentre un mínimo.

La deconvolución de las respuestas de las esferas de Bonner es un problema matemático discutido ampliamente pero aún abierto. Sin embargo, el LOUHI82 ha producido buenos resultados en

intercomparaciones entre códigos de deconvolución (6).

Como aplicación del programa LOUHI82, se procedió a la deconvolución de un espectro de AmBe. Para ello se trabajó con las respuestas obtenidas y luego se deconvolucionó tomando como solución inicial un espectro aproximado a la forma  $1/E$  en todo el rango energético, de acuerdo con las recomendaciones de la bibliografía (7).

El espectro resultante se muestra en la Figura 4 conjuntamente con el espectro real de AmBe. La curva obtenida tiene el mismo flujo integrado que el de la curva real, y le corresponde un valor de dosis equivalente ambiental igual a la del espectro real con un 0.84% de diferencia.

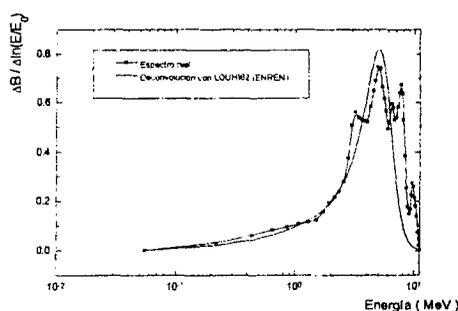


Figura 4: Comparación del espectro de Am-Be según el sistema EB y el espectro real (8).

### 3. CONCLUSIONES

El sistema espectrométrico desarrollado es un dispositivo adecuado para realizar mediciones en ambientes con baja tasa de dosis efectiva.

Se han presentado los resultados teóricos y experimentales que demuestran la factibilidad de aplicar la matriz teórica de respuestas del detector en la evaluación de los espectros medidos.

La deconvolución de las mediciones en las distintas esferas da como corolario la obtención de las magnitudes de interés en protección radiológica con un error menor al 1%.

El límite de detección del sistema presentado es de 140nSv/h. En la actualidad se está implementando otro sistema con un límite 10 veces menor.

### Referencias

- 1- Normas Básicas de Seguridad Radiológica. AR 10.1.1, Autoridad Regulatoria en Seguridad Radiológica y Nuclear Salvaguardias y Protección Física. 1995.

- 2- ICRU, Measurement of Dose from External Photon and Electron Radiations, publicación 47, Bethesda, MD. (1992).
- 3- MCNP4A . "A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport". Version 4A. Los Alamos National Laboratory.
- 4- Alevra, A.V. y col. Physikalish Technische Bundesanstalt . "Unfolding Bonner-Sphere Data: A European Intercomparison of Computer Codes". PTB-7.22-90-1.
- 5- Technical Reports Series n° 316, IAEA, Vienna, 1990.
- 6- Routti, J.T, and Sandberg, J.V. "General Purpose Unfolding Program LOUHI78, with Linear and Nonlinear Regularizations". LComputer Physics Communications, 21(1980)119-144.
- 7- Routti, J.T. (PhD. Thesis) "HighnEnergy Spectroscopy with Acivation Detectors, incorporating new methods for the analysis of Ge(Li) Gamma Rays spectra and the solution of Predholm integral equations"UCRL 18514 (1969).
- 8- ISO 8529 (1989).