

PUESTA A PUNTO DE UN SISTEMA DE DOSIMETRÍA PERSONAL NEUTRÓNICA. PROYECTO DOPEN



SERGIO RIVERA VÁZQUEZ

CIEMAT. Unidad de Dosimetría de Radiaciones.
UPM-ETSII Universidad Politécnica de Madrid,
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Industriales.



ANA Mª ROMERO GUTIÉRREZ

CIEMAT. Unidad de Dosimetría de Radiaciones.



MONTSERRAT MORALEDA CHAVES

CIEMAT. Unidad de Dosimetría de Radiaciones.



JOSÉ Mª GÓMEZ ROS

CIEMAT. Unidad de Dosimetría de Radiaciones.



ICIAR SARASOLA MARTÍN

CIEMAT. Unidad de Dosimetría de Radiaciones.



RAFAEL RODRÍGUEZ JIMÉNEZ

CIEMAT. Unidad de Dosimetría de Radiaciones.



JORGE FABA RODRÍGUEZ

CSN. Subdirección de Protección Radiológica
Operacional-APRT.

INTRODUCCIÓN

En el área de la dosimetría de radiaciones ionizantes, la dosimetría de campos fotónicos y beta es un tema bastante bien resuelto, con técnicas de medida de eficacia comprobada y normativa específica para acreditar la fiabilidad de los resultados.

Sin embargo, la dosimetría neutrónica presenta dificultades técnicas considerables, por lo que no existe ningún sistema o método de medida que cumpla todos los requerimientos normativos en los diferentes campos neutrónicos que se encuentran en la práctica, especialmente para la dosimetría personal.

El trabajo que se presenta tiene como objetivo el desarrollo de un sistema de dosimetría personal neutrónica, que desempeña un papel esencial en la protección contra la radiación en diversas instalaciones, desde plantas nucleares hasta centros médicos y laboratorios de investigación. Este aspecto adquiere una relevancia crucial en la salvaguarda de la salud y seguridad de quienes trabajan en entornos donde la exposición a radiación neutrónica es una realidad constante.

Entre las diversas técnicas de dosimetría personal neutrónica, que incluyen dosímetros de albedo y termoluminiscencia, entre otras, una de las metodologías más ampliamente adoptadas se basa en el análisis de las trazas inducidas por la radiación en materiales, empleando detectores plásticos.

La técnica, al permitir la evaluación precisa y fiable de la dosis y fluencia de neutrones, ha ganado popularidad gracias a su relativa simplicidad, bajo costo y versatilidad.

Con el objetivo de implementar la dosimetría personal de neutrones, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) han firmado el proyecto DOPEN, en el que se ha optado por el uso de detectores de trazas como dosímetros personales basados en PADC (Polyallyl-diglycol carbonate). El presente trabajo ofrece una visión detallada de los materiales empleados, los métodos utilizados y los avances alcanzados en la caracterización del sistema de dosimetría de neutrones hasta la fecha.

Este empeño responde a la imperiosa necesidad de comprender y cuantificar la exposición a neutrones, especialmente en entornos laborales donde la radiación nuclear forma parte integral de las operaciones diarias (centrales nucleares, aceleradores de alta energía, instalaciones de protonterapia, etc.), y de prever la evaluación de dosis neutrónicas en las actividades cuya operación está prevista para los próximos años (IFMIF-DONES, ATC, etc.) La investigación se presenta como un paso significativo hacia el desarrollo de protocolos de seguridad más efectivos y la aplicación de estándares internacionales, como la norma ISO 21909-1 [1], en la caracterización y validación de los sistemas de dosimetría personal de neutrones.

METODOLOGÍA

Se llevaron a cabo simulaciones con Monte Carlo PHITS 3.27 [2] con el objetivo de diseñar la carcasa del dosímetro para ampliar el rango de energía y mejorar la eficiencia de detección. Para ello se ha colocado el material PADC frente a un maniquí de torso ISO y se ha simulado un haz de neutrones plano-paralelo mono-energético utilizando diferentes valores de energía, para estudiar la respuesta del material en diferentes rangos del espectro (**Figura 1**).

Los detectores PADC se irradiaron utilizando fuentes de neutrones de AmBe y ^{252}Cf en el Laboratorio de Patrones Neutrónicos del Ciemat (LPN), empleando un maniquí de torso ISO para simular condiciones realistas. Es importante destacar que el soporte del dosímetro utilizado para estos primeros ensayos fue proporcionado por el United Kingdom Health Security Agency (UKHSA) (**Figura 2**).

A partir de dicho diseño y de las simulaciones realizadas, se han diseñado y construido varios prototipos de chasis para los PADC mediante una impresora 3D en el Ciemat, utilizando Nylon como material (**Figura 3**).

En cuanto al proceso de revelado de los detectores, se utilizó una disolución de NaOH al 6.25 M en un baño calefactor de 25 litros (**Figura 4**). Se llevaron a cabo pruebas con dos métodos de revelado: uno a 75° C durante 6 horas y otro a 85° C

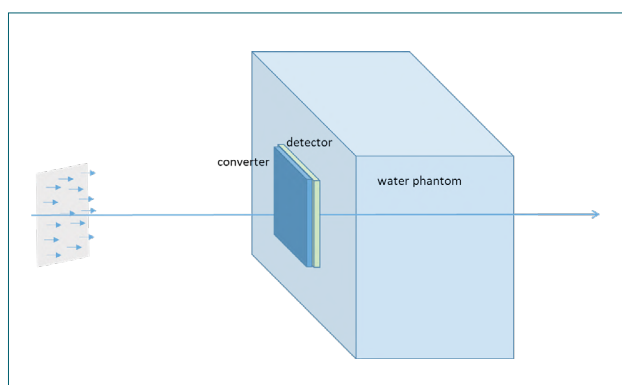


Figura 1. Geometría de simulación de irradiación del detector con un convertidor sobre él.

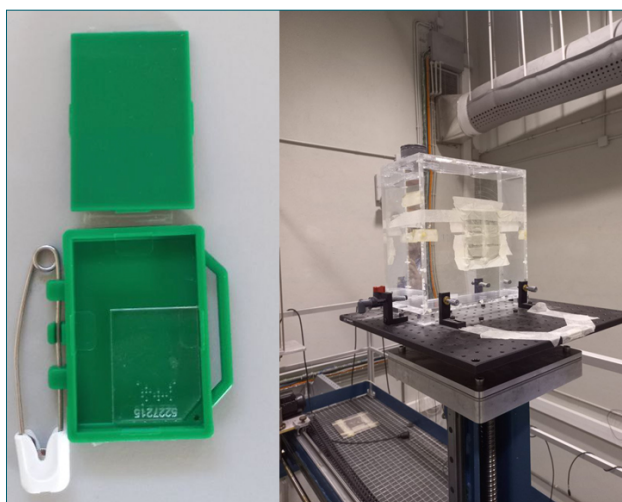


Figura 2. Chasis cedido por el UKHSA y disposición de los dosímetros en el maniquí ISO.



Figura 3. Prototipo del chasis diseñado y construido en el Ciemat.



Figura 4. Baño calefactor para el revelado de detectores.

durante 2 horas y 50 minutos. Estos métodos de revelado son cruciales para la correcta visualización y análisis de las trazas dejadas por la radiación en los detectores PADC.

Para realizar la lectura de los detectores PADC, se adquirió el sistema de imágenes TASL desarrollado por la empresa inglesa Track Analysis Systems, Ltd (**Figura 5**). Este sistema proporciona una plataforma integral para realizar el escaneo, análisis de imágenes, y evaluación detallada de dosis en los detectores PADC.

En conjunto, estas acciones han permitido avanzar significativamente en el diseño, irradiación y análisis de los detectores PADC, contribuyendo al desarrollo de un sistema de dosimetría más preciso y efectivo.

RESULTADOS

En este apartado se estudiarán los resultados obtenidos de las simulaciones y de las lecturas realizadas tras las irradiaciones.

Resultados de las simulaciones

Para el estudio de simulación de la respuesta del detector

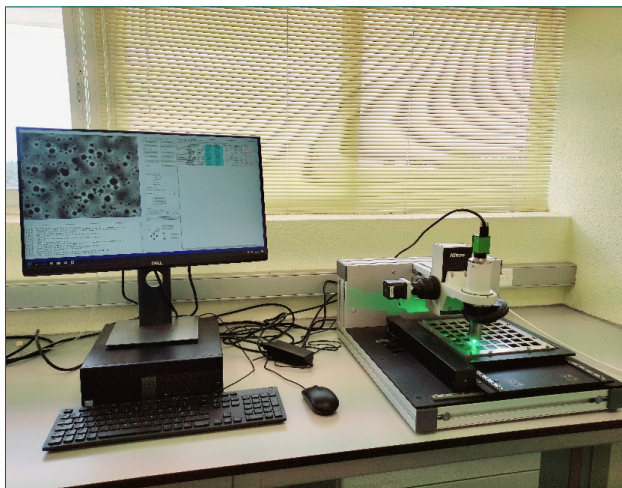


Figura 5. Sistema TASL de lectura y análisis de detectores PADC.

se ha utilizado el código de Monte Carlo PHITS 3.27 [2]. Para ello se utiliza el estimador [T-Cross] que proporciona la corriente de partículas (en unidades de cm^{-2}) que atraviesan de una región a otra de la geometría y al que se le pueden añadir subsecciones para obtener la distribución energética y angular de esas partículas.

La lámina de PADC, con un área de $10,53 \text{ cm}^2$ y $0,05 \text{ cm}$ de espesor, se ha colocado en la superficie del maniquí de agua ISO ($30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$) (Figura 1) puesto que al ser un dosímetro personal estará colocado sobre la persona y esto supone una contribución debida a la retrodispersión en el cuerpo. Las paredes del maniquí son de metacrilato (PMMA) y tienen un espesor de 2.5 mm .

La producción de trazas en el detector ocurre tras la inte-

racción de neutrones rápidos con el material que da lugar a iones de retroceso de H, C y O (scattering elástico) y reacciones nucleares (n, α) , (n, p) y (n, d) , que generan partículas cargadas. Para que se genere una traza visible es necesario que haya una pérdida energética suficiente y un mínimo ángulo de incidencia o se borrará durante el ataque químico de la superficie [3].

- Ángulo crítico con la normal a la superficie del detector menor de 70° (aunque puede variar según la energía de la partícula).

- Energía del protón entre 10 keV y 5 MeV .

- Energía de los iones de retroceso O y C mayor que $0,2 \text{ MeV}$

- Energía de las partículas alfa mayor que $0,1 \text{ MeV}$

Sobre el detector se puede colocar una lámina convertora para aumentar la respuesta mediante materiales que reaccionen con los neutrones (especialmente en el rango térmico) y produzca como resultado partículas cargadas que lleguen al detector y dejen la señal deseada. En este estudio se han probado N, B y Li que interaccionan de acuerdo a las reacciones: $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$, $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ y $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$.

Aunque inicialmente se probó con los espesores mínimos de las láminas convertoras de manera que las partículas de corto alcance llegaran a la superficie del detector colocado detrás, finalmente se han aumentado los espesores para poder aprovechar también la producción de protones en el propio convertor a energías más altas. Se han utilizado los siguientes dispositivos:

- Lámina de nylon de $0,3 \text{ cm}$ + detector PADC

- Lámina de poliamida PA12 de $0,3 \text{ cm}$ + detector PADC

- Lámina de ^6LiF 30 micras + detector PADC

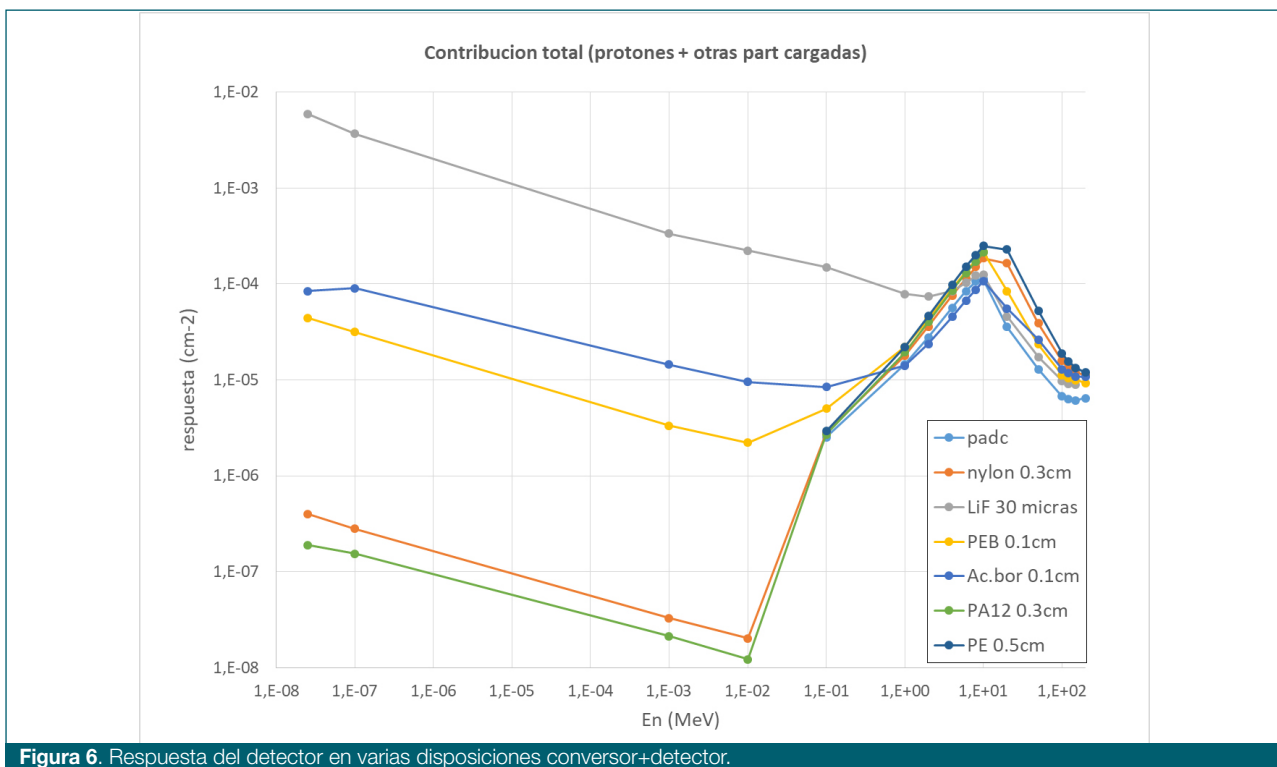


Figura 6. Respuesta del detector en varias disposiciones convertor+detector.

- Lámina de polietileno borado (PEB) 0,1 cm + detector PADC
- Lámina de ácido bórico 0,1 cm + detector PADC
- Lámina de polietileno (PE) 0,1 cm + detector PADC

Las respuestas de cada dispositivo se muestran en la **Figura 6**, sumando las contribuciones que idealmente producen todas las partículas generadas.

Resultados experimentales

Se han irradiado detectores PADC con las fuentes de calibración de ^{252}Cf y Am-Be en el Laboratorio de Patrones Neutrónicos (LPN) del Ciemat, con emisión de certificado de calibración. Los detectores se han irradiado sobre maniquí de agua de torso de la norma ISO dentro del chasis utilizado por el servicio de dosimetría del UK Health Security Agency (UKHSA), que ha cedido al Ciemat varias muestras para las pruebas. Además, se han incluido dosímetros de fondo.

Se han realizado varias irradiaciones con diferentes asignaciones de equivalente de dosis personal $H_p(10)$ para cada fuente, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO-29109-1 [1] (**Tabla 1**).

El proceso de revelado que se ha utilizado es el de disolución de hidróxido sódico (NaOH) 6,25 M, durante 2h 50min a 85°C.

El proceso va seguido de 3 baños consecutivos:

- 15 s en agua destilada.

- 30 min en disolución al 2% de ácido acético para neutralizar.
- 10 min en agua destilada.

La lectura de los detectores se realizó en todos los casos utilizando el sistema de TASLImage. Este sistema escanea las trazas en los detectores y evalúa la dosis en función del número de trazas y de su forma. El sistema utiliza diversos parámetros que son configurables para realizar esta evaluación.

1. Análisis preliminar del coeficiente de variación

Aplicando el método de interpretación de resultados de la norma ISO 21909-1 para el ensayo del coeficiente de variación en las condiciones en las que se han realizado las irradiaciones, obtenemos:

- Para las irradiaciones con fuente de Cf-252 (**Figura 7 y Tabla 2**).
- Para las irradiaciones con fuente de AmBe (**Figura 8 y Tabla 3**).

De los resultados presentados se interpreta que, aunque las condiciones de ensayo no han sido exactamente las requeridas en la norma (se requieren 6 dosímetros para cada test y solo se han irradiado 4 por punto de referencia), el sistema cumple el criterio establecido para el coeficiente de variación. Tan solo en el caso de los dosímetros irradiados con Cf-252 a $H_p(10) = 1\text{mSv}$ no se cumple el criterio, pero la desviación es inferior al 10%.

2. Análisis preliminar de la linealidad

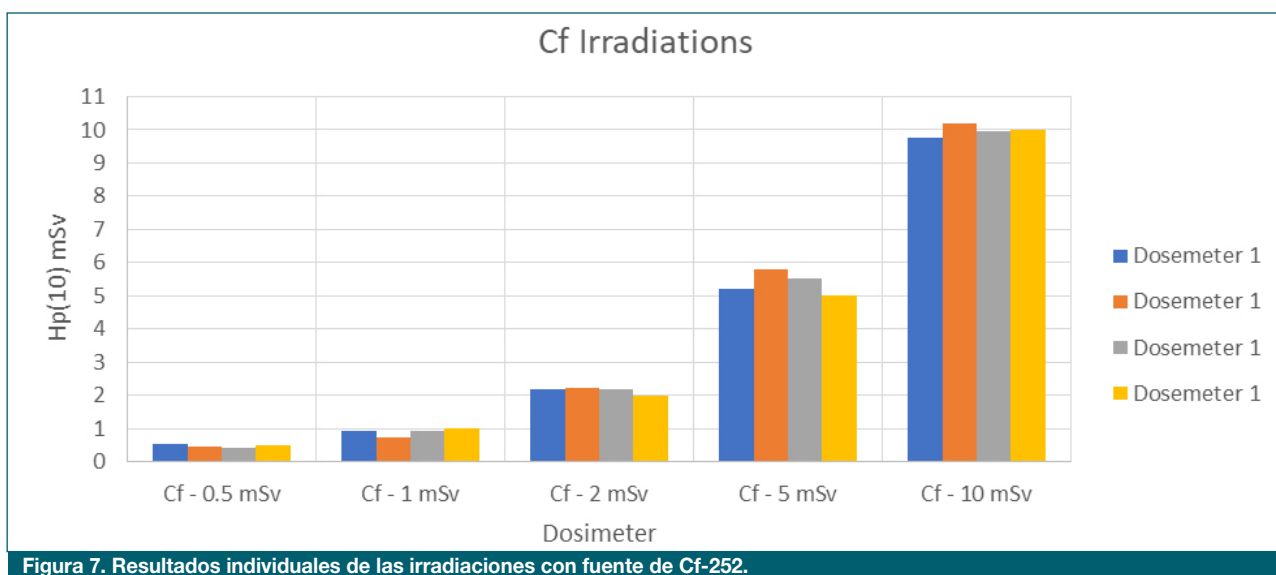
Aplicando el método de interpretación de resultados de la norma ISO 21909-1 para el ensayo de linealidad en las condiciones en las que se han realizado las irradiaciones, obtenemos:

- Para las irradiaciones con fuente de Cf-252 (**Figuras 9 y 10**).
- Para las irradiaciones con fuente de AmBe (**Figuras 11 y 12**).

De los resultados representados se interpreta que, aunque las condiciones de ensayo no han sido exactamente las requeridas en la norma (se requieren 6 dosímetros para cada test y solo se han irradiado 4 por punto de referencia y más valores de dosis de referencia), el sistema cumple el criterio establecido para la linealidad para los valores de dosis ensayados. El cri-

Fuente	Dosis asignada $H_p(10)$ (mSv)
Cf-252	0.5
Cf-252	1
Cf-252	2
Cf-252	5
Cf-252	10
AmBe	0.5
AmBe	1
AmBe	2

Tabla 1. Irradiaciones certificadas en el LPN.



<i>Hp(10) referencia</i>	CV (%)	CRITERIO ISO	
Cf - 0.5 mSv	8%	< 25%	CUMPLE
Cf - 1 mSv	11%	< 10%	NO CUMPLE
Cf - 2 mSv	5%	< 10%	CUMPLE
Cf - 5 mSv	4%	< 10%	CUMPLE
Cf - 10 mSv	2%	< 10%	CUMPLE

Tabla 2. Aplicación del criterio ISO 21909 a los resultados obtenidos para el ensayo de coeficiente de variación con fuente de Cf-252.

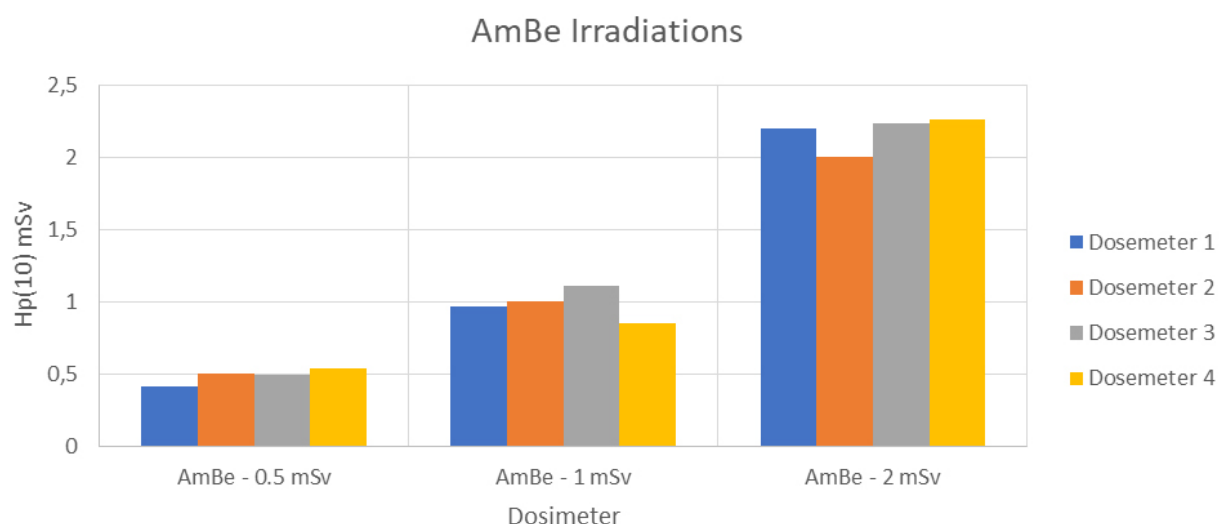


Figura 8. Resultados individuales de las irradiaciones con fuente de AmBe.

<i>Hp(10) referencia</i>	CV (%)	CRITERIO ISO	
AmBe - 0.5 mSv	9%	< 25%	CUMPLE
AmBe - 1 mSv	6%	< 10%	CUMPLE
AmBe - 2 mSv	3%	< 10%	CUMPLE

Tabla 3. Aplicación del criterio ISO 21909 a los resultados obtenidos para el ensayo de coeficiente de variación con fuente de AmBe.

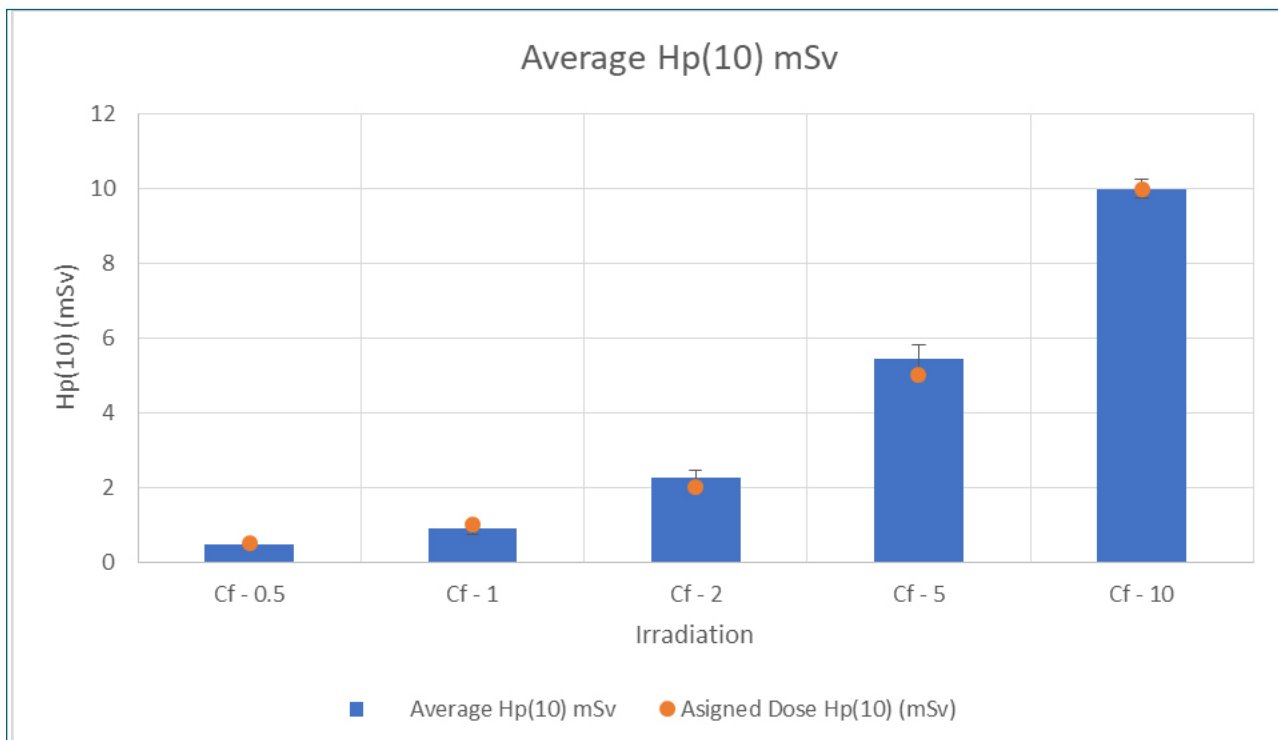


Figura 9. Aplicación del criterio ISO 21909 a los resultados obtenidos para el ensayo de coeficiente de variación con fuente de Cf-252.

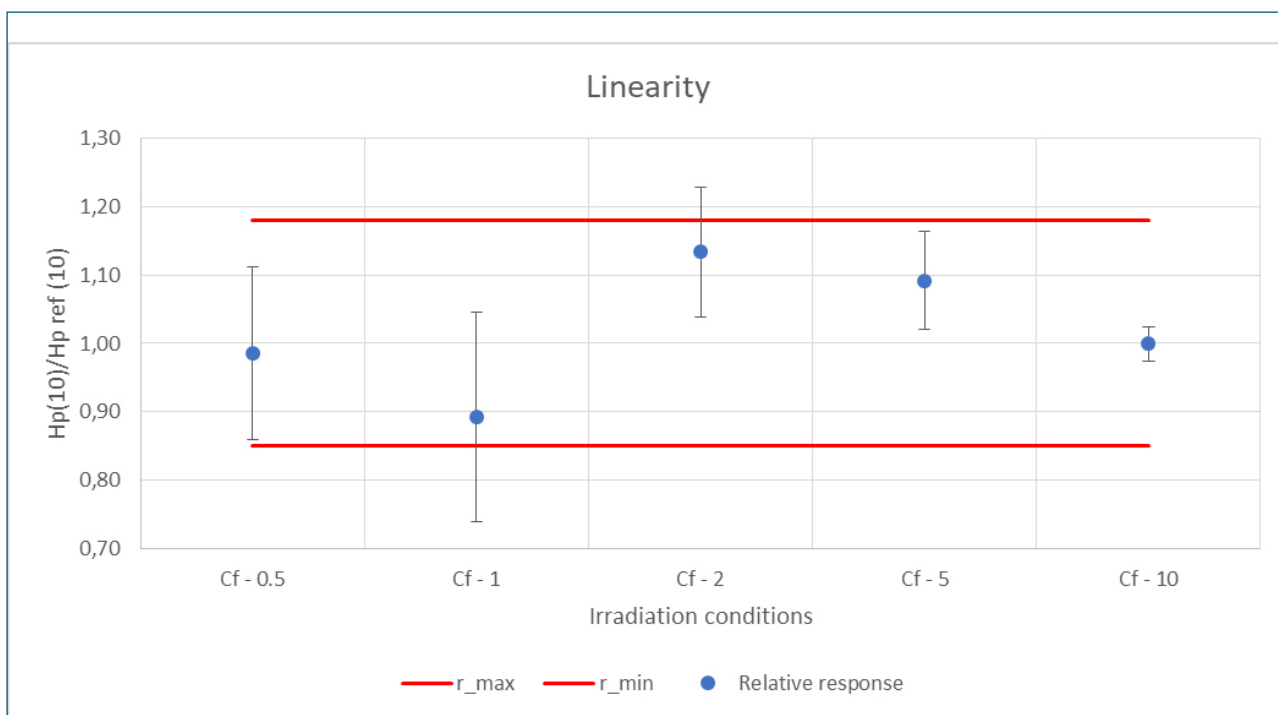


Figura 10. Resultados de linealidad para los ensayos con fuente de Cf-252.

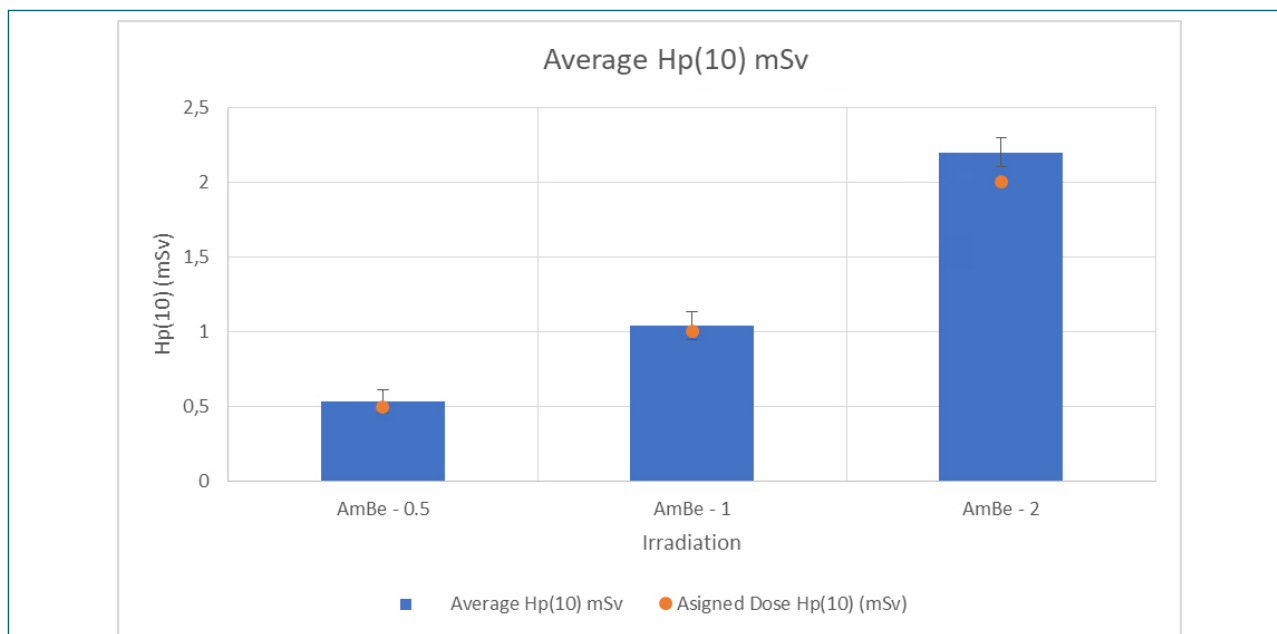


Figura 11. Valores de equivalente de dosis personal Hp(10) promedio y de referencia para las irradiaciones con fuente de AmBe.

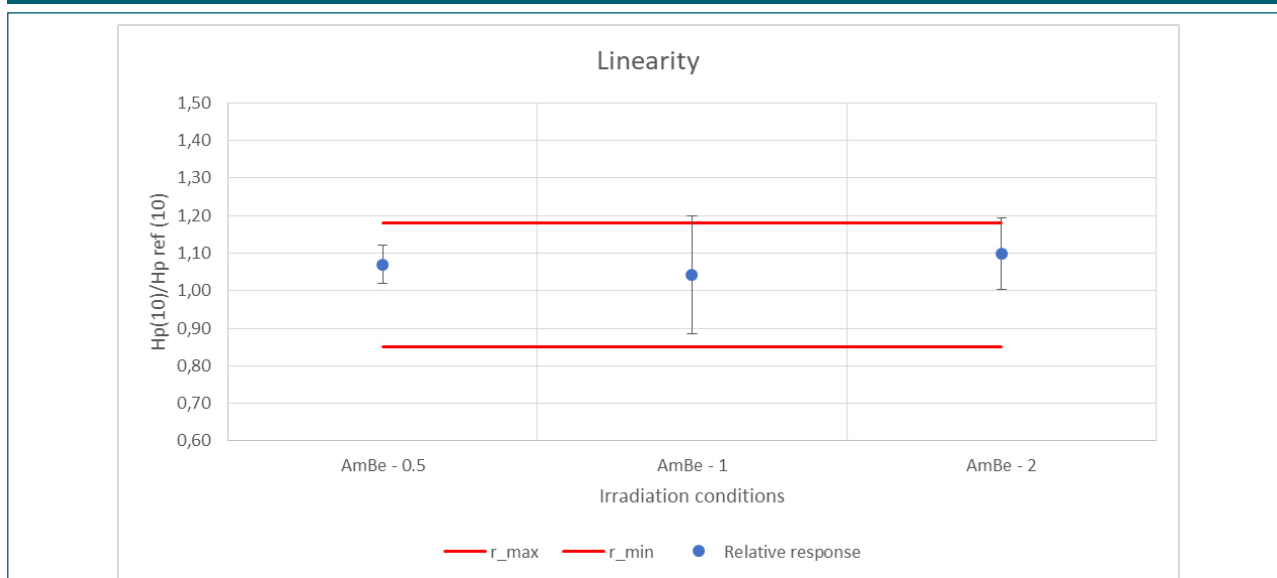


Figura 12. Resultados de linealidad para los ensayos con fuente de AmBe.

terio ISO es un poco más permisivo que el representado en las Figuras 10 y 12 ya que se han considerado solo los valores de $r_{\max}$ y $r_{\min}$ [1] sin tener en cuenta la incertidumbre combinada.

CONCLUSIONES

De los resultados presentados se concluye que el sistema de dosimetría neutrónica utilizado cumple, excepto en un punto, los requisitos de la norma ISO 21909-1 para los ensayos de coeficiente de variación y linealidad.

En estas conclusiones hay que tener en cuenta dos factores:

1. El chasis empleado no es el definitivo.
2. Los ensayos no se han realizado con el número de dosímetros que requiere la norma.

Por lo tanto, es necesario repetir estos ensayos con el chasis definitivo y utilizando el número de dosímetros indicado en la

norma. Además, para completar los ensayos de linealidad y coeficiente de variación, habrá que irradiar dosímetros a diferentes dosis y con otras calidades de radiación.

REFERENCIAS

- [1]. ISO 21909-1:2021. Passive neutron dosimetry systems. Part 1: Performance and test requirements for personal dosimetry.
- [2]. T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, H.N. Ratliff, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018).
- [3]. M.R. Deevband, P.Abdolmaleki, M.R.Kardan, H.R.Khosravi, M.Taheri. An investigation on the response of PADC detectors to neutrons. Applied Radiation and Isotopes 69, 340-345, 2011. ■