

Nuevo patrón primario de medida del LMRI-CIEMAT para la magnitud kerma en aire en haces de ^{137}Cs

N. Cornejo Díaz⁽¹⁾, E. Guantes Diez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes
Avenida Complutense 40, 28040, Madrid.

⁽¹⁾ Telf.: (+34) 913466288, e-mail: nestorarmando.cornejo@ciemat.es

RESUMEN:

La magnitud kerma en aire es la magnitud física fundamental a partir de la cual se obtienen las magnitudes de protección radiológica para la radiación gamma. Los patrones primarios de esta magnitud están constituidos fundamentalmente por cámaras de ionización de paredes de grafito, que permiten obtener el kerma en aire de forma absoluta mediante la aplicación del principio dosimétrico de Bragg-Gray. El presente trabajo presenta los detalles y la caracterización de dos cámaras de ionización de paredes de grafito, que conformarán el primer patrón primario español para la magnitud kerma en aire, en haces de radiación gamma. Los parámetros físicos y los factores de corrección fueron determinados conforme a las recomendaciones más recientes de la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU) en su informe 90. El valor de referencia proporcionado por el nuevo patrón es coherente con el valor existente en el laboratorio, en el marco de las incertidumbres involucradas. El nuevo patrón permite reducir la incertidumbre típica relativa del kerma en aire de referencia, del 0,76 % al 0,30 %.

1. INTRODUCCIÓN

Las magnitudes de protección radiológica para evaluar la exposición de las personas a la radiación gamma se obtienen a partir de la magnitud kerma en aire. Los patrones primarios de esta magnitud están constituidos fundamentalmente por cámaras de ionización de paredes de grafito, diseñadas para obtener el kerma en aire de forma absoluta, a partir de la carga eléctrica medida, aplicando la teoría dosimétrica sobre la ionización en cavidades (Bragg-Gray [1]).

El patrón nacional correspondiente a la magnitud kerma en aire, cuya unidad es el gray (Gy), siendo $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, es custodiado, mantenido, conservado y diseminado por el Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes del CIEMAT (LMRI-CIEMAT), bajo la supervisión y coordinación del Centro Español de Metrología, con arreglo a la Orden ICT/149/2020. El patrón nacional actual de kerma en aire para la radiación gamma del ^{137}Cs es una cámara de ionización de la marca PTW y modelo 32005, calibrada en el Instituto Nacional de Metrología del Reino Unido (NPL). Con el fin de contar con una referencia propia y reducir las incertidumbres asociadas a la determinación del kerma en aire en niveles de protección radiológica, se construyeron dos cámaras de ionización de paredes de grafito, en colaboración con el Laboratorio Nacional Henri Becquerel (LNE-LNHB) de Francia.

El presente trabajo presenta los detalles y los resultados de la caracterización de las dos nuevas cámaras de ionización, que conformarán el primer patrón primario español para la magnitud kerma en aire en haces de radiación gamma. A menos que se especifique, las incertidumbres se presentan como incertidumbres típicas. Cuando se expresan entre paréntesis tras un valor, éstas corresponden a la incertidumbre típica de las últimas cifras.

2. DESCRIPCIÓN

Para mayor consistencia, las cámaras se construyeron con geometrías diferentes. La cámara codificada como CIEMAT-CS-001 es cilíndrica con extremos semiesféricos, mientras que la cámara CIEMAT-SP-001 es esférica. Se fabricaron además: un tallo adicional y dos juegos de caperuzas de grafito de diferentes espesores, para evaluar experimentalmente los efectos del tallo y de la pared de las cámaras, respectivamente. La **Fig. 1** muestra una imagen de las radiografías realizadas a las cámaras tras su ensamblaje y del conjunto completo que conforma

el patrón primario, con el tallo y las caperuzas adicionales para cada una de las cámaras. Los datos geométricos de las cámaras se recogen en la **Tabla 1**.

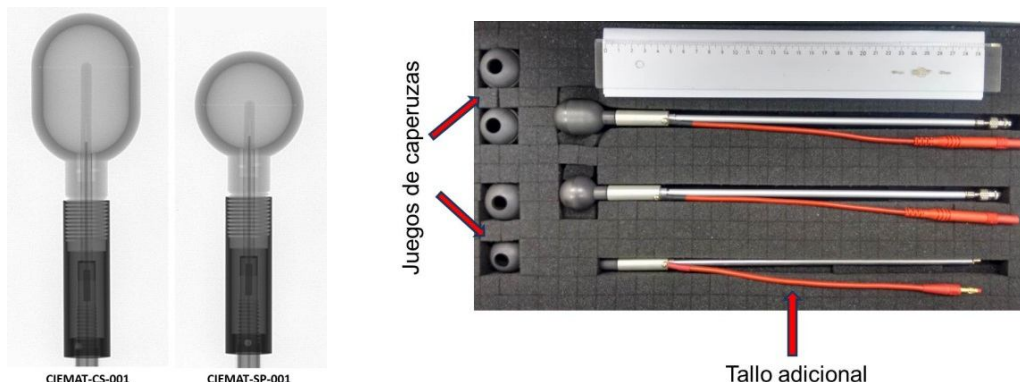


Figura 1. Radiografías de las cámaras de ionización (izquierda) y conjunto del patrón (derecha).

Las paredes, el electrodo central y las caperuzas adicionales de ambas cámaras son de grafito de alta pureza 5890 PT (99,998 %), con densidad igual a 1.8281(10) g.cm⁻³. El espesor radial de las paredes es 3 mm, con una tolerancia de ± 0,05 mm. Las caperuzas adicionales de cada una de las cámaras tienen espesores de 2 mm y 4 mm, con igual tolerancia, de ± 0,05 mm. Los electrodos de guarda y el tallo de las cámaras son de Dural (Al-Mg). Las piezas de los aislantes están fabricadas con poliestireno reticulado. El conector en el extremo del tallo o vástago de las cámaras es coaxial, del tipo SMC. El conductor central del conector queda conectado directamente al electrodo central de la cámara o electrodo de colección de carga eléctrica, mientras que la parte externa del conector está en contacto con el electrodo de guarda, a través del tallo. A este conector se acopla el electrómetro. El voltaje de polarización de las cámaras de aplica a su pared exterior.

La ecuación utilizada en el LMRI-CIEMAT para determinar el kerma en aire de forma absoluta con las cámaras de grafito, a partir del principio dosimétrico de Bragg-Gray [1] es:

$$K_{\text{air}} = \frac{Q}{\rho_0 \cdot V_{\text{col}}} \cdot \left(\frac{\bar{W}}{e}\right)_{\text{air}} \cdot \left(\frac{\bar{S}_{\text{el}}}{\rho}\right)_{\text{c,air}} \cdot \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho}\right)_{\text{air,c}} \cdot \frac{1}{(1 - \bar{g}_{\text{air}})} \cdot \prod_i k_i \quad (1)$$

Donde: Q es la carga eléctrica medida como consecuencia de la ionización producida por la radiación gamma en el aire de la cavidad de la cámara, ρ_0 es la densidad del aire seco para las condiciones ambientales de referencia, V_{col} es el volumen de colección de carga eléctrica de la cámara de ionización, $(\bar{W}/e)_{\text{air}}$ representa la energía promedio necesaria por unidad de carga eléctrica liberada en aire, $(\bar{S}_{\text{el}}/\rho)_{\text{c,air}}$ es el cociente de los valores medios de los poderes de frenado electrónicos másicos del grafito y el aire, $(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,c}}$ es el cociente de los valores medios de los coeficientes másicos de absorción de energía del aire y el grafito, \bar{g}_{air} es la fracción promedio de la energía cinética de los electrones secundarios que se pierde como consecuencia de procesos radiativos en el aire. El término $\prod_i k_i = k_{PT} k_h k_{\text{att}} k_{\text{pos}} k_s k_{\text{st}} k_{\text{wall}} k_{\text{an}} k_{\text{rn}} k_{\text{SA}}$ corrige la carga eléctrica medida para tener en cuenta las desviaciones producidas por el haz de radiación de referencia y las cámaras de grafito utilizadas respecto a las condiciones ideales en las que se soporta la teoría dosimétrica de Bragg-Gray. Se tiene que: k_{PT} y k_h son los factores para corregir la carga eléctrica medida a las condiciones ambientales de referencia para la presión atmosférica, la temperatura del aire en el interior de la cavidad y su humedad relativa, k_{att} corrige la atenuación de la radiación gamma en el aire entre la fuente y la cámara de ionización, k_{pos} es el factor de corrección

debido al posicionado del punto de referencia de la cámara, k_s es el factor de corrección a la pérdida de carga eléctrica como consecuencia de la recombinación y difusión de iones en el aire del volumen de colección de carga eléctrica, k_{st} es el factor de corrección al efecto del tallo de la cámara, k_{wall} representa el factor que corrige la perturbación introducida por las paredes de la cámara en lo relacionado con la atenuación y la dispersión de los fotones incidentes, k_{an} es el factor de corrección para la falta de uniformidad axial del haz de fotones a la distancia del punto de referencia de la cámara, k_{rn} es el factor de corrección a la falta de uniformidad radial del haz de fotones en el punto de referencia de la cámara y k_{SA} el factor de corrección definido por Borg y col. [2] para posibles desviaciones respecto a la teoría de la cavidad de Spencer-Attix [1], mediante la que se obtiene el cociente de los poderes de frenado, $(\bar{S}_{el}/\rho)_{c,air}$.

Parámetros	Cámaras	
	CS-001	SP-001
Altura externa / mm	39	-
Diámetro externo / mm	28	28
Altura interna / mm	33	-
Diámetro interno / mm	22	22
Espesor de pared / mm	3	3
Diámetro del electrodo / mm	3	3
Longitud del electrodo / mm	23	12
Volumen nominal / cm ³	9,6	5,5

Tabla 1. Dimensiones de las cámaras de grafito

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas necesarias sobre las propiedades eléctricas, de respuesta angular y de estabilidad de ambas cámaras resultaron satisfactorias. La **Fig. 2** (izquierda) muestra las curvas de saturación de la respuesta de las cámaras expuestas a una tasa de kerma en aire de 500 mGy/h en el haz de referencia de ¹³⁷Cs del LMRI-CIEMAT. Se incluyen además las gráficas con las corrientes medidas, normalizadas respecto a la corriente medida a 400 V. Se utilizó un electrómetro Keithley modelo 6517A en modo de medida de carga eléctrica. El efecto de la polaridad para el voltaje de trabajo de las cámaras, igual a 400 V, se evaluó mediante el factor de corrección de polaridad, k_{pol} , según la ecuación (2). Este efecto resultó insignificante, con k_{pol} igual a 1,0001(2) para la cámara CS-001 y 1,0000(3) para la cámara SP-001.

$$k_{pol} = \frac{I_+ + |I_-|}{2I_+} \quad (2)$$

Donde I_+ e I_- son los promedios de las corrientes medidas con polaridad positiva y negativa, respectivamente.

La corriente de fuga promedio en ambas cámaras resulta inferior a 10^{-15} A, por lo que la relación "señal/ruido" es mejor que 3×10^4 en el haz de ¹³⁷Cs del LMRI-CIEMAT, teniendo en cuenta que las corrientes de ionización medidas a la distancia de referencia en este haz son de unos 30 pA y 50 pA con las cámaras SP-001 y CS-001, respectivamente.

Los resultados del estudio de la dependencia angular de la respuesta de las cámaras se muestran en la **Fig.2** (derecha). Las corrientes de ionización fueron referidas a las condiciones atmosféricas de referencia y normalizadas con el valor promedio de todos los valores de corriente. Las desviaciones resultaron inferiores a las incertidumbres expandidas ($k = 2$) correspondientes y en ningún caso superiores al 0,04 %.

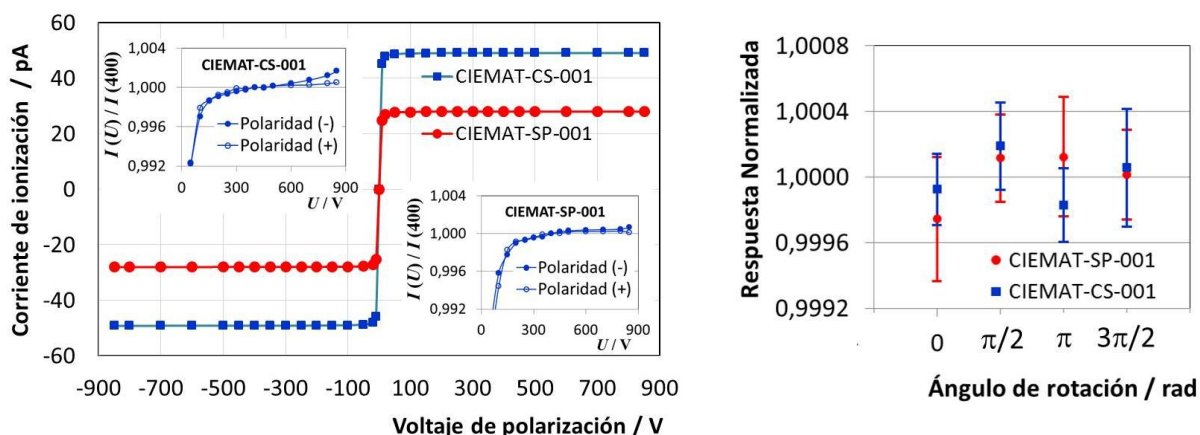


Figura 2. Curva de saturación de las cámaras de ionización (izquierda). Respuesta de las cámaras en función del ángulo de rotación alrededor de su eje de simetría (derecha). Las barras de error representan las incertidumbres expandidas, para $k = 2$.

Las medidas de estabilidad realizadas con las cámaras en el transcurso de dos años presentan una desviación inferior al 0,1 % respecto a su valor promedio. Las desviaciones son consistentes con la incertidumbre típica relativa, igual a 0,06 %, debida al posicionado de las cámaras en el punto de referencia, en el haz de ^{137}Cs del LMRI-CIEMAT.

En la ecuación (1), la densidad del aire seco, ρ_0 , para las condiciones ambientales de referencia ($T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ y $P_0 = 101,325\text{ kPa}$) se adopta igual a $1,293\text{ kg m}^{-3} \pm 0,01\%$, de conformidad con el informe BIPM-2011/04 [3]. El volumen de colección de carga, V_{col} , ha sido determinado para cada cámara a partir de las medidas dimensionales de sus componentes, según se detalla en el informe DT-LMRI-1909 del LMRI [4]. Los valores de V_{col} son: $9,6126(31)\text{ cm}^3$ para la cámara CS-001 y $5,5104(23)\text{ cm}^3$ para la cámara SP-001. La energía promedio requerida por carga eléctrica liberada en aire seco, $(\bar{W}/e)_{\text{air}}$, es igual a $(33,97 \pm 0,12)\text{ J C}^{-1}$, según el informe 90 de ICRU [5]. Según este mismo informe, el factor de corrección k_h se puede tomar igual a $0,9970(3)$, cuando la temperatura del aire está controlada en torno a $20\text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad relativa del aire está en el rango entre 15 % y 70 %.

El resto de parámetros físicos y factores de corrección se obtienen experimentalmente o mediante la simulación estadística, aplicando el método Monte Carlo. Los valores obtenidos y sus incertidumbres se detallan en el informe DT-LMRI-2202 del LMRI [6] y en la publicación [7]. Debido al diseño y a los materiales utilizados en la construcción de las cámaras, los valores son muy próximos a la unidad. Sin embargo, existen algunos parámetros y factores de corrección que tienen mayor relevancia y que resultan claves en la caracterización de un patrón primario de este tipo. A continuación se resumen los resultados obtenidos en la determinación de esos parámetros físicos y factores de corrección.

3.1 Cociente de los poderes de frenado electrónicos, $(\bar{S}_{\text{el}}/\rho)_{\text{c,air}}$

En los cálculos se empleó la ecuación de Nahum [8] para la teoría de la cavidad de Spencer-Attix [1], en la forma recomendada en la publicación ICRU 90 [5]:

$$\left(\frac{\bar{S}_{\text{el}}}{\rho}\right)_{\text{c,air}} = \frac{\int_{\Delta}^{E_{\text{máx}}} \Phi_E^{\text{air}} \cdot \left(\frac{S_{\Delta}(E)}{\rho}\right)_{\text{c}} dE + \Phi_E^{\text{air}}(\Delta) \cdot \left(\frac{S_{\text{el}}(\Delta)}{\rho}\right)_{\text{c}} \cdot \Delta}{\int_{\Delta}^{E_{\text{máx}}} \Phi_E^{\text{air}} \cdot \left(\frac{S_{\Delta}(E)}{\rho}\right)_{\text{air}} dE + \Phi_E^{\text{air}}(\Delta) \cdot \left(\frac{S(\Delta)}{\rho}\right)_{\text{air}} \cdot \Delta} \quad (3)$$

Donde: Δ representa la energía mínima de los electrones que atraviesan la cavidad de la cámara, Φ_E^{air} es la distribución en energía de la fluencia total de electrones en la cavidad de la

cámara, considerando las interacciones de los fotones primarios, sin atenuación, ni dispersos. $(S_{\Delta}(E)/\rho)$ representa el poder de frenado electrónico másico restringido a transferencias de energía inferiores a Δ . Se obtiene a partir de las ecuaciones deducidas de la fórmula de Bethe, incluidas en la publicación ICRU 37 [9]. Los valores de la energía media de excitación, I , y del factor de corrección al efecto densidad (polarización del medio) se toman de las recomendaciones más recientes dadas en la publicación ICRU 90 [5], considerando que la conducción eléctrica en el grafito se debe a un solo electrón de valencia. $(S_{el}(\Delta)/\rho)$ es el poder de frenado electrónico másico correspondiente a la energía Δ .

Los espectros de electrones en ambas cámaras, Φ_E^{air} , se calcularon con el código CAVITY del sistema EGSnrc [10] a partir del espectro de fotones incidentes en el punto de referencia de la cámara. Este espectro había sido obtenido mediante la simulación estadística con el código MCNPX (2.6.0) [11] según se detalla en informe DT-LMRI-1804 [12]. La **Fig. 3** muestra el espectro de fotones de ^{137}Cs en el punto de referencia del laboratorio (izquierda) y el espectro de electrones correspondiente en la cavidad de una de las cámaras (derecha).

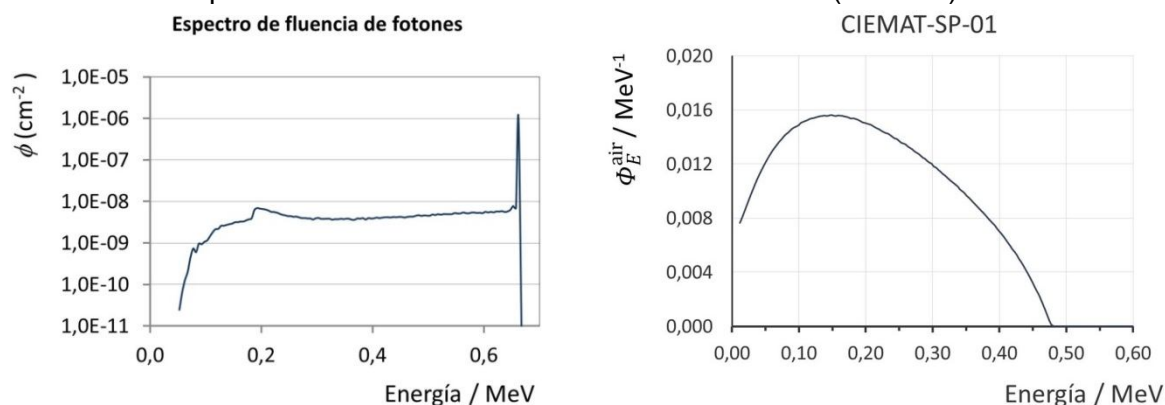


Figura 3. Espectro de fotones en el haz de ^{137}Cs expresado en unidades de fluencia por partícula emitida por la fuente (izquierda). Espectro de electrones en la cavidad de la cámara SP-01, expresado en unidades de fluencia diferencial en energía, normalizada con la fluencia de los fotones incidentes en la cámara (derecha).

Los valores obtenidos de $(\bar{S}_{el}/\rho)_{c,air}$ son: 1,0034(4) para la cámara CIEMAT-CS-001 y 1,0035(4) para la cámara CIEMAT-SP-001. La incertidumbre que se obtiene para el producto $(W/e)_{air} (\bar{S}_{el}/\rho)_{c,air}$ es 0,13 %, teniendo en cuenta las recomendaciones del CCRI [13, 14].

3.2 Cociente de los coeficientes másicos de absorción de energía, $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,c}$

El valor del parámetro $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,c}$ se obtuvo como el cociente de los valores del kerma en el aire y en el grafito, para la distribución en energía de la fluencia de fotones, ϕ_E , existente en el punto de referencia (Ver la **Fig.3**). Se utilizaron los coeficientes másicos de absorción de energía, $(\bar{\mu}_{en}/\rho)$, del aire y del grafito, según la fórmula:

$$\left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho}\right)_{air,c} = \frac{\int \phi_E E (\mu_{en}/\rho)_{air} dE}{\int \phi_E E (\mu_{en}/\rho)_c dE} \quad (4)$$

Los cálculos se realizaron de forma independiente para tres conjuntos de valores aceptados de $(\bar{\mu}_{en}/\rho)$, correspondientes al aire y al grafito: los calculados por Seltzer [15], los publicados en ICRU 90 [5] y los utilizados por el código PENELOPE [16]. En ausencia de una referencia recomendada formalmente por el CCRI, el valor de $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,c}$ se ha obtenido entonces como el promedio de los resultados calculados a partir de las tres bases de datos indicadas

anteriormente [7]. Se tiene que $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,c} = 0,9994(5)$. Además, para el producto $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{air,c} (1 - \bar{g}_{air})^{-1}$ se establece una incertidumbre del 0,1 %, según las recomendaciones de la publicación ICRU 90 [5].

3.3 Factor de corrección a la perturbación de la pared de la cámara, k_{wall}

El factor k_{wall} , que corrige el efecto de la atenuación y dispersión de los fotones en la pared de la cámara se calculó mediante el método Monte Carlo, acorde con el procedimiento propuesto por Roger y col. [17], formalmente validado por Bielajew [18]. Las simulaciones se realizaron con el programa CAVITY/EGSNRC [10], partiendo del espectro de fotones del haz de ^{137}Cs del LMRI-CIEMAT en el punto de referencia (Ver la Fig. 3). Los valores obtenidos son $k_{wall} = 1,0233(8)$ para la cámara CS-001 y $k_{wall} = 1,0272(9)$ para la cámara SP-001. La validación experimental se realizó con las caperuzas adicionales, que permiten obtener espesores totales de pared de 3 mm, 5 mm y 7 mm. Se realizaron mediciones y se calcularon las correcciones k_{wall} para los diferentes espesores de pared. La corriente medida, corregida para las variables ambientales de referencia, I , y multiplicada por el factor k_{wall} correspondiente al espesor de la pared de la cámara debe permanecer constante para cualquier espesor de pared. Los resultados obtenidos son satisfactorios y se muestran en la Fig. 4. Las barras de error corresponden a las incertidumbres típicas de los cocientes representados.

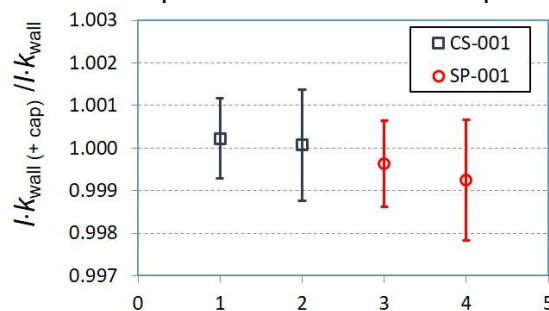


Figura 4. Valores de $I \cdot k_{wall}$ con las caperuzas adicionales, normalizados con el valor de $I \cdot k_{wall}$ sin caperuza adicional, para ambas cámaras. Los valores (1, 3) y (2, 4) en el eje de abscisas corresponden a espesores totales de pared de 5 mm y 7 mm, respectivamente.

3.4 Factor de corrección al efecto del tallo de la cámara, k_{st}

Los fotones pueden dispersarse en el tallo o vástago de las cámaras y producir una contribución no deseable. Para cuantificar el efecto del tallo se realizaron mediciones con el tallo adicional y sin éste, como se puede ver en la Fig. 5, para la cámara SP-001.

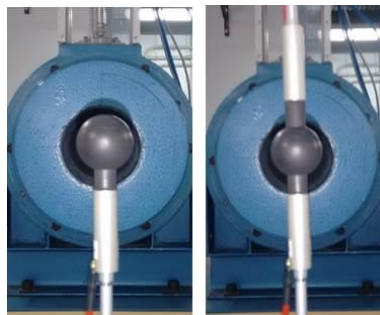


Figura 5. Cámara SP-001 colocada en el punto de referencia en el haz de ^{137}Cs , sin el tallo adicional (izquierda) y con el tallo adicional (derecha).

Los valores obtenidos son $k_{st} = 0,9986(3)$ para la cámara CS-001 y $k_{st} = 0,9985(2)$ para la cámara SP-001.

3.5 Valor de referencia y balance de incertidumbre

El valor de referencia del kerma en aire en el haz de ^{137}Cs del LMRI-CIEMAT es el promedio de los valores obtenidos con ambas cámaras, que difieren en menos del 0,07 %, en el marco de las incertidumbres asociadas a los parámetros específicos de cada una de las cámaras. Los balances de incertidumbre correspondientes a la determinación absoluta del kerma en aire según la ecuación (1) se muestran en la **Tabla 2**. Se incluyen además los valores obtenidos para cada uno de los parámetros físicos y factores de corrección.

	CIEMAT-CS-001			CIEMAT-SP-001		
	Valores	Incertidumbres		Valores	Incertidumbres	
		100 u_A	100 u_B		100 u_A	100 u_B
Parámetros físicos						
$\rho_0 / \text{kg m}^{-3}$	1,2930	-	0,01	1,2930	-	0,01
$(\bar{W}/e)_{\text{air}} / \text{J C}^{-1}$	33,97	-	0,13	33,97	-	0,13
$(\bar{S}_{\text{el}}/\rho)_{\text{c,air}}$	1,0034	-	0,10	1,0035	-	0,10
$(\bar{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,c}}$	0,9994	-	0,10	0,9994	-	0,10
$1 - \bar{g}_{\text{air}}$	0,9985	-	-	0,9985	-	-
Factores de corrección						
k_{PT}	-	-	0,07	-	-	0,07
k_h	0,9970	-	0,03	0,9970	-	0,03
k_{att}	1,0000	-	0,03	1,0000	-	0,03
k_{pos}	1,0000	-	0,06	1,0000	-	0,06
k_s	1,0009	0,01	0,02	1,0011	0,01	0,02
k_{st}	0,9986	0,03	-	0,9985	0,02	-
k_{wall}	1,0233	0,01	0,08	1,0272	0,01	0,09
k_{an}	1,0000	0,05	0,03	1,0000	0,05	0,03
k_{rn}	1,0007	0,06	0,08	1,0005	0,06	0,08
k_{SA}	1,0000	-	0,10	1,0000	-	0,10
Volumen / cm^3	9,6126	-	0,03	5,5104	-	0,04
Carga eléctrica medida	-	0,01	0,14	-	0,01	0,14
Incertidumbre combinada		0,09	0,29		0,08	0,29
		0,30			0,30	

Tabla 2. Valores e incertidumbres de los factores de la ecuación (1) para la obtención absoluta del kerma en aire, en el haz de referencia de ^{137}Cs del LMRI del CIEMAT (u_A y u_B representan las incertidumbres típicas relativas de tipo A y B, respectivamente).

El grado de equivalencia actual respecto a la referencia internacional ($KCRV$) es $(4,2 \pm 8,6)$ mGy/Gy [19]. El grado de equivalencia respecto al $KCRV$, calculado para la referencia proporcionada por el patrón primario es $(-0,3 \pm 4,7)$ mGy/Gy. Por otro lado, la incertidumbre típica de la referencia nacional para el kerma en aire en ^{137}Cs se reducirá, de 0,76 % a 0,30 %.

4. CONCLUSIONES

El trabajo presenta los detalles constructivos y los resultados de la caracterización del primer patrón primario de medida de España para la magnitud kerma en aire, en haces de radiación gamma. Se han aplicado métodos actualizados en la obtención de los diferentes parámetros y factores de corrección, con consideraciones novedosas, como la adopción de un único electrón de conducción en el grafito para el cálculo de los cocientes de los poderes de frenado electrónicos o el cálculo de los cocientes de los coeficientes másicos de absorción de energía a partir de tres bases de datos recomendadas. El valor de referencia proporcionado por el nuevo patrón es coherente con el valor existente en el laboratorio, en el marco de las incertidumbres

involucradas. El nuevo patrón permite reducir la incertidumbre típica relativa del kerma en aire de referencia, del 0,76 % al 0,30 %. Una nueva participación en la comparación clave: BIPM.RI(I)-K5, con la referencia propia del laboratorio será el próximo paso para soportar la evidencia de su equivalencia internacional.

5. REFERENCIAS

- [1] L. Büermann and D. T. Burns. *Metrologia* 46, S24-S38 (2009)
- [2] J. Borg, I. Kawrakow, D. W. O. Rogers and J. P. Seuntjens. *Medical Physics* 27 (8) 1804 – 1813 (2000).
- [3] P. J. Allisy-Roberts, D. T. BURNS, C. KESSLER, *Measuring conditions and uncertainties for the comparison and calibration of national dosimetric standards at the BIPM*, Rapport BIPM-2011/04, 21 pp (2011).
- [4] N. Cornejo, *Determinación del volumen de colección de carga en las cámaras de ionización de paredes de grafito CIEMAT-SP-001 y CIEMAT-CS-001*. LMRI-CIEMAT, DT-LMRI-1909 (2019).
- [5] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Key data for ionizing – radiation dosimetry: Measurement standards and applications*. ICRU Report No. 90. ICRU Vol. 14 No.1 (2016).
- [6] N. Cornejo, *Caracterización del patrón de referencia primario del LMRI para la magnitud kerma en aire, en haces de ^{137}Cs* . LMRI-CIEMAT, DT-LMRI-2202 (2022).
- [7] N. Cornejo. *Measurement* 188, 110374 (2022).
- [8] A. E. Nahum. *Physics in Medicine & Biology* 23, 24–38 (1978).
- [9] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Stopping powers for electrons and positrons*. ICRU Report 37. Bethesda, MD (1984).
- [10] I kawrakow, E Mainegra-Hing, DWO Rogers, F Tessier, BRB Walters, *The EGSnrc Code System: Monte Carlo simulation of electron and photon transport*. Technical Report PIRS-701, National Research Council Canada (2017).
- [11] J. S. Hendricks, et. Al., *MCNPX 2.6.0 Extensions*. Los Alamos National Laboratory. LA-UR-08-2216 (2008).
- [12] N. Cornejo, E. Guantes, *Caracterización del haz de fotones del irradiador NI-645 mediante simulación estadística*. CIEMAT, DT-LMRI-1804 (2018).
- [13] Consultative Committee for Ionizing Radiation, *Report on the 16th meeting of the CCRI*, BIPM (1999).
- [14] D. Burns, C. Kessler. *Metrologia* 55, R21 (2018).
- [15] S. M. Seltzer. *Radiation Research* 136 (2), 147–170 (1993).
- [16] F. Salvat, *PENELOPE-2014: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport*. NEA/NSC/DOC(2015)3, Nuclear Energy Agency Data Bank (2015).
- [17] D W O Rogers et al. *Physics in Medicine & Biology* 30, 429 (1985).
- [18] A. F. Bielajew. *Physics in Medicine & Biology* 31, 161–70 (1986).
- [19] BIPM. <https://www.bipm.org/kcdb/comparison?id=309#degreesOfEquivalence> (BIPM.RI(I)-K5).

6. AGRADECIMIENTOS

El desarrollo e implementación del patrón primario ha sido financiado por el LMRI-CIEMAT en el marco del proyecto interno 266.268. Se agradece al Dr. Valentin Blideanu y al Dr. Aime Ostrowski, del LNE-LNHB de Francia, por su valiosa colaboración en la construcción de las cámaras de ionización y por las sugerencias para su puesta en funcionamiento. Se reconoce igualmente el aporte del Dr. Ernesto Mainegra-Hing de la NRC de Canadá por proporcionar las modificaciones requeridas en los códigos del sistema EGSnrc, acordes con las recomendaciones del informe 90 de ICRU.