

# REQUERIMIENTOS PARA DESARROLLAR UN PATRON PRIMARIO DE KERMA EN AIRE EN MEXICO

J.T. Álvarez Romero, V.M. Tovar Muñoz, P. Cruz Estrada y C.R. Cabral Cruz  
Departamento de Radiaciones Ionizantes, Departamento de Electrónica  
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares  
Carretera Federal México Toluca S/N La Marquesa, Salazar Edo. de México, 52750  
55 53297255, [trinidad.alvarez@inin.gob.mx](mailto:trinidad.alvarez@inin.gob.mx)

**Resumen:** Se analizan las restricciones para el desarrollo y construcción de un patrón primario de kerma en aire para las condiciones ambientales del ININ - situado a 3000 metros sobre el nivel del mar- como son: las incertidumbres asociadas con el factor de corrección por densidad del aire, y la incertidumbre en determinación del volumen efectivo de la cámara patrón, así como los requisitos de estabilidad del sistema de medición de carga/corriente.

## 1. INTRODUCCION

En radioterapia el kerma en aire  $K_a$  y la dosis absorbida en agua  $D_w$  son dos magnitudes dosimétricas utilizadas en la calibración de haces de radiación ionizante – para la energía de  $^{60}\text{Co}$ , electrones o fotones de rayos X de alta energía. Estos haces son usados en el control del volumen tumoral de pacientes con cáncer. Para tener éxito en dicho control tumoral, la dosis absorbida impartida al tumor debe tener una incertidumbre expandida  $U(k=2) < 10\%$ , sin embargo se está proponiendo cambiar el valor de esta incertidumbre a un 5%, y de ahí las constantes investigaciones en el área de metrología de radiaciones ionizantes, para cambiar de patrones primarios ionométricos de  $K_a$  a patrones primarios ionométricos de  $D_w$ , [1], y de patrones primarios ionométricos de  $D_w$  a patrones primarios de  $D_w$  basados en calorímetros, [2].

Por otra parte, el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Departamento de Metrología de Radiaciones Ionizantes del ININ, pertenece a la red de laboratorios secundarios auspiciada por el Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA y la Organización Mundial de la Salud; y entre otras funciones calibra las cámaras de ionización de centros de radioterapia mexicanos en términos de  $K_a$  y/o  $D_w$  [3]

Además, es el ININ el instituto designado (propuesto por el CENAM en la reunión de Acuerdo de Reconocimiento Mutuo entre Institutos Nacionales de Metrología INM, ante la Oficina Internacional de Pesas y Medidas BIPM), para desarrollar y mantener los patrones nacionales de

México en el área de radiaciones ionizantes (dosimetría y actividad).

En el año 2002 se inició la comparación regional SIM.RI(I)-K1 para  $K_a$  en la energía del  $^{60}\text{Co}$ . En esta comparación el LSCD-ININ obtuvo un grado de equivalencia  $D=3.2 \text{ mGy/Gy} = 0.0032$  con una incertidumbre  $U=16.4 \text{ mGy/Gy} = 0.0164$ ; donde, a pesar de su valor de  $U$  que  $D$  no es el mayor de la comparación, si lo es su incertidumbre, ver tablas 4 y 5 de [4].

Este valor grande de  $U$  se debe a la incertidumbre del coeficiente de calibración  $N_K$  de la cámara que se usó en la comparación, cuya calibración se realizó en los laboratorios del OIEA, [4]; y en considerar una distribución uniforme más que triangular en la estimación de la incertidumbre estándar con evaluación tipo B, para el cálculo de la incertidumbre combinada  $u_c$  en la medición del  $K_a$ , (aunque esta última consideración no es fundamental si es conveniente mencionarla, [4,6]).

Las acciones tomadas para disminuir el valor de  $D$  y de  $U$  son: i.- Calibrar los patrones nacionales de  $K_a$  en la sección de Radiaciones Ionizantes del BIPM, para reducir la  $u_c$  del coeficiente de calibración  $N_K$ , [5]; ii. Medir la magnitud de influencia temperatura dentro de la cavidad de aire de la cámara, usando una cavidad de aire similar a la de la cámara patrón, así como emplear un patrón secundario de temperatura con una precisión del 0.05%, [6].

Con estas acciones correctivas incertidumbre combinada tiene un valor de  $u_c=0.55\%$  respecto al valor de la comparación de 0.89%, es decir se reduce su valor en un 54%. Sin embargo, este valor

es aun grande con respecto a las incertidumbres manejadas por los INM's con patrones primarios, cuyas incertidumbres están en el orden de  $u_c=0.15\%$  [7,8].

Finalmente, se estimó una componente de incertidumbre por estabilidad de largo plazo del 0.34% [6] la cual hay que reducirla, pero antes identificar las causas de su alto valor (el valor típico por estabilidad para patrones primarios, en un plazo de tres meses es del orden de 0.01%, [7]); y una componente de incertidumbre en la medición de la corriente del 0.30%, incertidumbres que analizaremos a continuación.

**2. CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DEL ALTIPLANO MEXICANO**

La realización de la unidad del  $Ka$  - en todos INM- se efectúa con cámaras de ionización de paredes de grafito llenas de aire, (las cámaras son capacitores cilíndricos o esféricos con aire como medio dieléctrico, que al someterse al campo de radiación ioniza las moléculas de aire, ver Fig. 1). Las cámaras de ionización son diseñadas para cumplir las condiciones de la teoría de la cavidad de Bragg-Gray o Spencer Attix, de acuerdo con la siguiente ecuación, [9]:

$$K_{aire} = \left[ \frac{Q}{\rho_0 \cdot V_{air}} \right] \cdot \left( \frac{\bar{W}}{e} \right)_{aire} \cdot \left( \frac{\bar{\mu}}{\rho} \right)_{aire,c} \cdot \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{c,aire}$$

$$\times \left( \frac{1}{1 - \bar{g}_{aire}} \right) \cdot k_{\rho} \cdot k_h \cdot k_s \cdot k_{st} \cdot k_{wall} \cdot k_{an} \cdot k_{rn} \tag{1}$$

donde:  $Q$  es la carga medida corregida por  $k_{\rho}$  y  $k_h$  que toman en cuenta cambios en la densidad del aire y humedad, respecto de las condiciones de referencia ( $\rho_0$  a  $T_0=20$  C y  $P_0= 1013.25$  hPa) y  $V_{aire}$  es el volumen efectivo del aire contenido en la cámara de ionización, los demás factores se pueden consultar en [9];

En el artículo de revisión de patrones primarios de cavidad para  $Ka$  [9], se enfatiza que un factor de corrección que se incremente rápidamente mas allá de un valor del 1.01 llega a tener incertidumbres inaceptables, ya que los valores típicos de los factores de corrección empleados para estas cámaras están en el rango de 0.9985 a 1.0016 con incertidumbres del orden del 0.05%, ver tabla 2 de [6], o Tabla 8 de [4].

Sin embargo, en nuestro laboratorio el factor  $k_{\rho} \approx 1.426$  con  $u_c \approx 0.07\%$  (calculado a partir de la ecuación de los gases ideales para una presión atmosférica de 710 hPa respecto a una presión de referencia), lo cual hace casi únicas nuestras condiciones de medida.

Por lo tanto, surgen las siguientes preguntas: ¿es suficiente aplicar un solo factor de corrección  $k_{\rho}$ , o habría que esperar efectos físicos más complejos asociados a las bajas presiones?, ¿cuáles son estos fenómenos para cuantificarlos y poder corregirlos? Una respuesta parcial se obtiene de las investigaciones realizadas en el BIPM para calibrar nuestras cámaras de ionización [2] y otras investigaciones realizadas para rayos X en el National Research Council NRC de Canadá [10,11], y con fotones de baja energía para cámaras de pozo la Universidad de Wisconsin [12,13].

Concretamente, para la realización del  $Ka$  en las condiciones del ININ, con solo la aplicación del factor  $k_{\rho}$  se espera una sobreestimación (del 0.2% al 0.5% para el caso del  $^{60}Co$ , del 1% para el caso de rayos-X y hasta del 15% en mediciones de fotones de  $I^{125}$  con cámaras de pozo); donde los fenómenos físicos asociados a estas sobreestimaciones no han sido identificados satisfactoriamente y merecen un estudio adicional, [9].

**3. PATRÓN NACIONAL DE EXPOSICIÓN VS KERMA EN AIRE**

El ININ como instituto designado tiene acreditada ante la Dirección General de Norma de la Secretaria de Economía, una cámara de ionización BEV modelo CC01 ser 131, como patrón nacional de exposición, [14,15].

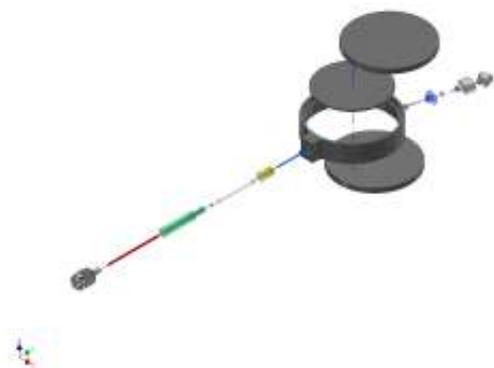
La exposición con su unidad röntgen, es una magnitud que no es coherente con el sistema internacional de unidades [16], por lo que el ININ debe acreditar este u otro patrón en términos de la magnitud del  $Ka$ .

El problema fundamental asociado con esta clase de patrones primarios es que la determinación de su volumen tiene una incertidumbre del  $u_c= 0.1\%$  para el modelo CC01-ND 1005/A [17] y del 0.2% para el modelo CC01 [15].

Esta contribución del volumen, junto con la asociada a los efectos de la densidad del aire (0.2%) y de la componente de incertidumbre del producto del poder de frenado grafito-aire por la energía necesaria para generar un par de iones (0.11%) conducen a una incertidumbre combinada del 0.30%, que es el doble de la típica de los patrones primarios [7,9]. Por esta razón esta cámara CC01 es inadecuada como patrón primario.

Por lo tanto, se pidió la asesoría del BIPM para iniciar la construcción de una cámara patrón primario del tipo CH, ver Figs. 1 y 2, [18,19]

En efecto, la determinación del volumen de la cámara y su incertidumbre son tareas esenciales en la caracterización de los patrones primarios de  $K_a$ , [9]. La determinación del volumen de esta cámara patrón debe realizarla el LSCD-ININ con una incertidumbre tentativa del 0.01% (target uncertainty, [20]). Por tal motivo el ININ también solicitó la asesoría técnica del CENAM para efectuar las medidas dimensionales de la cámara.



**Fig. 1.** Cámara de ionización de placas planas paralelas del BIPM modelo CH, [15,16]

### 3.1 Desarrollo de un sistema de medición de carga/corriente de alta exactitud y precisión.

Para realizar las mediciones de corto (incertidumbre tentativa del 0.02%) y largo plazo (incertidumbre tentativa del 0.03%) de las cargas/corrientes producto de la ionización en las cámaras primarias y/o secundarias, se construyó en el Departamento de Sistemas Electrónicos del ININ un sistema basado en el principio de medición de la carga de un capacitor (esto es el cociente  $dv/dt$ ), colocado en modo retroalimentado en el amplificador de entrada

de un electrómetro y que reproduce la siguiente expresión, [21]:

$$I = C \cdot dV / dt \quad (2)$$

con lo cual las mediciones son trazables a voltaje y tiempo más que a carga o corriente.

La calibración del voltaje se efectuará con una fuente de referencia de diodos Zener, lo cual garantizaría calibraciones en línea con una estabilidad y exactitud del orden de 10 ppm. El tiempo se medirá con electrómetro Keithley modelo 6517, el cual se calibrará en el CENAM.

## 4. DISCUSION

El LSCD-INN estrictamente al tener trazabilidad del  $K_a$  o  $D_w$  a través del OIEA sus patrones son terciarios; ahora actualmente se tiene la trazabilidad directamente de la sección de radiaciones ionizantes del BIPM, sus patrones son secundarios.

Con lo cual, actualmente los coeficientes de calibración  $K_a$  o  $D_w$  suministrados a los centros de radioterapia tienen una incertidumbre expandida <1%, no obstante se depende tecnológicamente de las capacidades de medida del BIPM.

Sin embargo, el ININ al ser instituto designado tiene la tarea de desarrollar patrones primarios de  $K_a$  y  $D_w$ , y otras magnitudes dosimétricas requeridas por centros hospitalarios, industrias y centros o institutos de investigación, que dan servicios a la población Mexicana.

## 5. CONCLUSIONES

En el caso concreto del desarrollo de patrones ionométricos primarios para  $D_w$ , debemos realizar primero patrones de  $K_a$  y antes de intentar realizar esta magnitud, debemos ser capaces de medir magnitudes básicas, como son: longitudes, temperaturas, presiones y carga, pero con alta exactitud y precisión.

Más aun debemos de entender, y profundizar el estudio de las condiciones atmosféricas del altiplano Mexicano para la realización del  $K_a$  y/o  $D_w$  mediante patrones ionométricos, como no los han mostrado los trabajos realizados en el extranjero, tanto con investigaciones experimentales [9], como con simulación de Montecarlo [12-13].

Finalmente, ninguna palabra se ha dicho para la determinación de los factores de corrección restantes de la Ec. (1), de los cuales el más importante es el  $k_{wall}$  y  $k_{an}$  y deberán ser calculados mediante técnicas de Montecarlo.

## RECONOCIMIENTOS

Al Sr. Philipe Rogers, Dr. David Burns y la Dra. Penelope Allisy del BIPM por sus amables comentarios y apoyo técnico.

## REFERENCIAS

- [1] Andreo P., Burns DT., Hohfeld K., Huq MS., Kanai T., Laitano F., Smythe VG., Vynkier S. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed dose to Water*, IAEA TRS-398, Vienna 2000.
- [2] ICRU, *Dosimetry of High-Energy Photon Beams based on Standards of Absorbed Dose to Water*, ICRU Report 64, Journal of ICRU 1 (1) 2001.
- [3] [www-naweb.iaea.org/nahu/dmrip/SSDLReport/default.asp](http://www-naweb.iaea.org/nahu/dmrip/SSDLReport/default.asp)
- [4] Ross C.K., Shortt K.R., Saravi M., Meghzifene A., Tovar V.M., Barbosa R.A., da Silva C.N., Carrizales L., Seltzer S.M. *Final report of the SIM <sup>60</sup>Co air-kerma comparison SIM.RI(I)-K1*, *Metrologia*, 45, *Tech. Suppl.*, 06010, 2008.
- [5] BIPM, *Calibration certificate BIPM to ININ N°12 Ionization chamber NE2611A N° 176 in a <sup>60</sup>Co gamma ray beam BIPM and N°11 Ionization chamber Exradin A12 N° 71931*, Sevres, France, May 2008.
- [6] Víctor Tovar M, José T Álvarez R. *Resultados del ININ en las comparaciones SIM.RI(I)-K4 para dosis absorbida en agua y SIM.RI(I)-K1 para kerma en aire en haces de <sup>60</sup>Co*. Memorias del Simposio de Metrología 2008, CENAM, México, 2008.
- [7] Allisy-Roberts J.P., Burns D.T. y Kessler C. *Measurement conditions for the calibration of National ionometric standards at the BIPM*, Report BIPM/ 09-04. 2009.
- [8] P J Allisy-Roberts, D T Burns and C Kessler. *Summary of the BIPM.RI(I)-K1 comparison for air kerma in <sup>60</sup>Co gamma radiation*. *Metrologia* 44, 06006, 2007.
- [9] Büermann L., Burns D.T. *Air kerma cavity standards*, *Metrologia*, 46, (2), S24-S38. 2009
- [10] La Russa D., Mc Ewen M., y Rogers DWO. *An experimental and computational investigation of the standard temperature-pressure correction factor for ion chambers in kilovoltage x rays*. *Med. Phys.* 34, 4690, 2007.
- [11] La Russa D. y Rogers D.W.O *An EGSnrc investigation of the PTP correction factor for ion chambers in kilovoltage x rays*. *Med. Phys.* 33, 4590, 2006.
- [12] Bohm T., Griffin S. DeLuca P. y DeWerd L. *The effect of ambient pressure on well chamber response: Monte Carlo calculated results for the HDR 1000Plus*. *Med. Phys.* 32, 1103, 2005.
- [13] Griffin SL, DeWerd LA, Micka JA, y Bohm TD. *The effect of ambient pressure on well chamber response: Experimental results with empirical correction factors*. *Med. Phys.* 32, 700, 2005.
- [14] <http://www.cenam.mx/patrones/Default.aspx>
- [15] BEV, *Primary standard Graphite Cavity chamber type CC01 ser 131*, 1992.
- [16] ICRU, *Quantities and Units*, ICRU Report, No 33, 1980.
- [17] BIPM, *Chamber volume measurements Workshop on Dosimetry Uncertainty BIPM*, 2005
- [18] Allisy A. *Contribution à la Mesure de l'Exposition Produite par les Photons Emis par le <sup>60</sup>Co* *Metrologia*, 3(2), 41-51, 1967.
- [19] Boutillon M., Niatel M.T. *A Study of a Graphite Cavity Chamber for Absolute Exposure Measurements of <sup>60</sup>Co Gamma Rays* *Metrologia*, 9(4), 139-146, 1973.

[20] *International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms* VIM, 3rd edition, JCGM 200, 2008.

*Small DC Currents at NPL. IEEE Trans. on Instrument. and Measurement.* 56, 2, 2007

[21] Fletcher N., Giblin P., Williams J. y Lines K. *New Capability for Generating and Measuring*



**Fig. 2** Piezas que componen la cámara patrón primario modelo CH construida en el BIPM para el ININ.