

DESARROLLO DE UN PATRON PRIMARIO PARA DOSIS ABSORBIDA EN AGUA IMPARTIDA POR RAYOS GAMMA DE ^{60}Co

José Álvarez R, Héctor Garnica G, Víctor Tovar M.
SSDL, Departamento de Metrología ININ,
Carretera México Toluca S/N, La Marquesa, Ocoyoacac, Edo. de México 52750, México.
Tel.: 55-532972 00 Ext 3840, Fax: 55-53297200,
jtar@nuclear.inin.mx, hgarnica@nuclear.inin.mx, vmtm@nuclear.inin.mx

Resumen: Debido a que en la República Mexicana se carece de un patrón primario de dosis absorbida en agua D_w para rayos gamma de ^{60}Co para dar trazabilidad en esta magnitud a los usuarios de radioterapia que usan haces externos de radiación ionizante para el tratamiento de cáncer, se caracteriza la cámara de ionización CC01-131 para acreditarse como un patrón nacional de dosis absorbida en agua D_w para rayos gamma de ^{60}Co . 1) se determina la fluencia espectral del cabezal Picker C/9 para un tamaño de campo de $10 \times 10 \text{ cm}^2$, a 1 m de distancia de la fuente, mediante simulación Monte Carlo de una geometría realista del cabezal con el código MCNP4C, bajo estas condiciones geométricas existe una contribución de 26 % de radiación dispersa a la fluencia total del Picker C/9 en aire. 2) La fluencia espectral obtenido se valida mediante simulaciones de porcentajes de dosis en profundidad PDD y factores de campo para el kerma en aire K_a , los cuales fueron comparados con medidas experimentales, obteniéndose desviaciones menores al 1,5 % para los PDD y menores al 0,5 % para los factores de rendimiento. 3) La fluencia espectral se emplea en la simulación con MCNP4C de los factores de corrección indicados por método del BIPM para la determinación de la D_w obteniendo los siguientes resultados: factor de perturbación global $k_p=1,119 4 \pm 0,95 \%$ ($k=1$), factor de corrección por la camisa protectora contra agua $k_{ps}=1,009 4 \pm 0,61 \%$ ($k=1$), factor de corrección por la ventana de entrada del haz en el maniquí de agua $k_{pf} = 1,002 2 \pm 0,61 \%$ ($k=1$). También se determina la incertidumbre expandida $U(k=2)= 3,54 \%$ para la D_w , éste valor es alto, pero consistente con la infraestructura que actualmente posee el LSCD-ININ-México para realizar la unidad de dosis absorbida. Finalmente se presentan las cartas de control IMR R/S determinadas para las mediciones de D_w , las que sirven para estimar el comportamiento de la desviación de corto y largo plazo de la cámara de grafito.

1. INTRODUCCIÓN

En medicina las radiaciones ionizantes se emplean con fines de diagnóstico y terapia, en radioterapia se usan para el tratamiento con radiaciones ionizantes de diversos tipos de cánceres que afectan a los seres humanos. Para tener éxito en dichos tratamientos es necesario, entre otros factores, que la dosis absorbida impartida al tumor tenga una incertidumbre expandida porcentual de $U= \pm 3,5$ al $\pm 5 \%$, [1].

En el caso del ser humano, el agua es de interés especial como sustituto del tejido blando que forma parte de los músculos y casi todas las estructuras anatómicas, exceptuando los huesos, porque tiene propiedades dosimétricas muy similares a las de este tejido blando, [2]. Por esta razón, el agua es el material de uso rutinario empleado para la calibración de haces de radiación de los equipos e instrumentos de radioterapia en hospitales; de ahí

que sea de interés actual tener un patrón de referencia en función de la dosis absorbida en agua para radiación gamma proveniente de una fuente de ^{60}Co : D_w , [3]; cabe aclarar que de aquí en adelante cuando nos se refiera a dosis absorbida en agua se entenderá que se trata de dosis absorbida en agua para radiación gamma proveniente de una fuente de ^{60}Co .

En efecto, para garantizar que la dosis absorbida recibida en el volumen del tumor por el paciente cumpla con la exactitud correspondiente a la U requerida, se ha realizado esfuerzos internacionales por sustituir los patrones primarios para kerma en aire K_a , por patrones primarios para D_w que disminuyan las incertidumbres los protocolos de calibración que emplea el usuario final; de ahí la necesidad de sustituir el empleo de el protocolo del OIEA TRS 277 basado en patrones de K_a por el protocolo TRS 398 que se basa en patrones de D_w . Estos esfuerzos son entre otros: a) Establecer

patrones primarios de D_W , [3], b) Establecer protocolos de calibración que parten de patrones de D_W , como son el TRS 398, TG 51, etc., [1,4]

Por las anteriores razones es conveniente que en la República Mexicana se cuente con un patrón primario de dosis de radiación gamma absorbida en agua, como es sabido este tipo de patrones no necesitan de ser calibrados por otro patrón, ya que poseen las más altas características metroológicas. Sin embargo deben compararse con patrones de la misma jerarquía metroológica.

2. DESCRIPCIÓN DEL PATRÓN PARA D_W

El patrón para D_W consiste de:

- Cámara de ionización de grafito marca BEV modelo CC01 serie 131.
- Cabezal Picker C9 con fuente de ^{60}Co para producir un campo de radiación ionizante, Fig. 1.
- Maniquí de agua de $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$
- Electrómetro Keihtley modelo 617
- Fuente de alta tensión eléctrica Keithley 232
- Banco transportador con sistema de posicionamiento en X-Y-Z.



Fig. 1 Irradiador Picker C9 de ^{60}Co y cámara BEV CC01-131 sumergida en maniquí de agua

La cámara BEV CC01-131 fue diseñada para ser un patrón primario para K_a , [5] y actualmente está declarada como patrón nacional de exposición ante la Dirección General de Normas de la Secretaría de Economía [6]. El diseño de la cámara obedece a la teoría de la cavidad de Spencer-Attix (S-A) por lo cual puede aprovecharse para caracterizarla como un patrón primario de D_W de acuerdo con investigaciones realizadas en el BIPM [7].

2.1 Método Ionométrico del BIPM para la determinación de D_W en un campo de ^{60}Co .

La determinación de la D_W en un maniquí de agua, a partir de la ionización medida en la cavidad de la cámara se hace mediante la teoría de la cavidad de S-A, sin embargo ésta usa una cavidad en condiciones ideales, es pertinente aclarar que la intensidad de corriente eléctrica producida por la ionización es el mesurando. Al considerar la cavidad real de la cámara de ionización, es necesario introducir un factor de corrección k_{cav} que toma en cuenta las desviaciones de las condiciones ideales de S-A (ver Tabla 2 para significado de factores de corrección), por lo tanto en la dosis absorbida en agua se determina como:

$$D_W = \frac{Q}{m} \cdot \left(\frac{W}{e} \right)_{\text{aire}} \cdot \bar{S}_{g,\text{aire}} \cdot k_p \tag{1}$$

donde Q es la carga colectada en la cavidad, m la masa de aire contenida por el volumen de la cavidad (mesurando), $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{w,g}$ razón de los promedios de los coeficientes de absorción másicos agua grafito, $\bar{S}_{g,\text{aire}}$ cociente de los promedios de los poderes de frenado másico grafito aire y k_p el factor de perturbación global; que incluye cuatro términos responsables de la perturbación introducida por la presencia de la cámara de ionización real en el maniquí de agua, ver Tabla 1:

$$k_p = \Psi_{w,g} \cdot \left(\frac{\bar{\mu}_{en}}{\rho} \right)_{w,g} \cdot (1 + \mu' \cdot \bar{y})_{w,g} \cdot k_{cav} \tag{2}$$

En la práctica, se deben introducir algunos factores de corrección $\prod_i k_i$ para considerar las magnitudes de influencia [7], finalmente se llega a la relación:

$$D_W = \frac{Q}{m} \cdot \left(\frac{W}{e} \right)_{\text{aire}} \cdot \bar{S}_{g,\text{aire}} \cdot k_p \cdot \prod_i k_i \tag{3}$$

donde $\prod_i k_i = k_{\text{rec}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_{\text{dec}} \cdot k_{\text{PT}} \cdot k_h \cdot k_{\text{ps}} \cdot k_{\text{pf}} \cdot k_m \cdot k_{\text{an}}$,

k_{rec} corrige la deficiencia en la colección de carga, debido a pérdidas por recombinación de los iones.

k_{pol} corrige el efecto de polarización en la colección de la carga.

k_{dec} corrige el decaimiento radiactivo de la fuente.

k_{PT} corrige por la magnitudes de influencia la presión atmosférica y temperatura de referencia $P_0=1013,25$ hPa y $T_0=293,15$ K

k_h toma en cuenta la presencia de humedad en el aire de la cámara y la corrige a la humedad de referencia.

k_{ps} considera la perturbación de la camisa protectora de la cámara de ionización, usada para sumergir la cámara en el maniquí de agua,

k_{pf} considera la presencia de la ventana de Polimetilacrilato del maniquí de agua.

k_{rn} toma en cuenta la no uniformidad radial del haz de radiación.

k_{an} toma en cuenta la no uniformidad axial del haz de radiación.

Cabe señalar que salvo los factores k_{PT} y k_h que están asociados con las magnitudes de influencia presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, propiamente los demás factores son factores de corrección.

Para estimar los factores de corrección empleados en la determinación de D_w , de acuerdo a la formulación del BIPM, es necesario conocer las características espectrales del haz de radiación. Por este motivo, mediante la simulación de MC de una geometría realista del cabezal con el código MCNP4C [8] se obtuvo primero la fluencia espectral para los fotones emitidos desde el cabezal Picker C/9 y posteriormente se utilizó este espectro en la determinación de los factores de corrección, utilizando una combinación de técnicas analíticas y MC [9]

2.2 Cartas de Control IMR R/S

Estas cartas de control CC estiman las variaciones de corto y largo plazo mediante las variaciones dentro de cada grupo caracterizadas por S_w y las variaciones entre grupos consecutivos evaluadas por S_B [10], respectivamente. Estas CC se aplicaron tanto para las mediciones de cargo o corriente como para las determinaciones de la D_w .

3. RESULTADOS

3.1. Factor de corrección k_p

Los resultados de nuestra simulación de Monte Carlo MC nos permiten conocer que para el campo de radiación ^{60}Co con el tamaño de campo de referencia 10×10 cm², únicamente el 74 % de la fluencia espectral a 100 cm² de la fuente corresponde a radiación primaria, el 26 % restante es radiación dispersa, estos resultados son consistentes con los reportados en [11]. Para la fluencia espectral la incertidumbre calculada en cada sección de energía es del 1 %, excepto para las energías más pequeñas que 50 keV donde la incertidumbre es del 8 %.

Los factores de campo para el kerma medidos experimentalmente en el LSCD-ININ-México son comparados con los simulados por MC en el LSCD, ambos valores concuerdan dentro del 0,5 %, Fig. 2. Por otro lado, los PDD en agua para el campo de referencia de 10×10 cm² son calculados y estos difieren un 1.8 % respecto de los medidos. Estas verificaciones del espectro calculado validan la geometría y los parámetros empleados en la simulación.

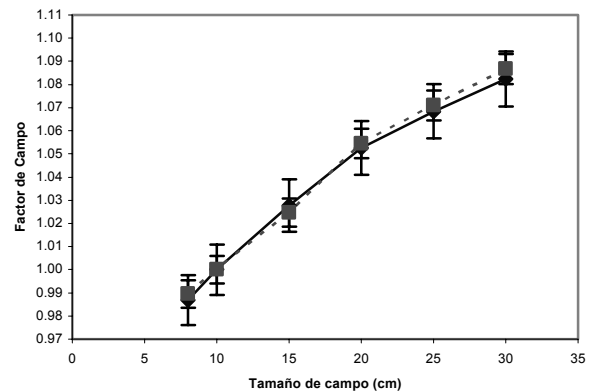


Fig. 2. Comparación de los factores de campo para kerma medidos (línea punteada) y simulados (línea sólida). Los factores de campo se normalizan al campo de referencia de 10×10 .

Los valores de k_p son simulados tomando en cuenta la orientación del eje de la cámara respecto al haz de radiación: paralelo o perpendicular. Adicionalmente, los valores obtenidos para las componentes de k_p son resumidas en la Tabla 1.

En ambos casos $k_p > 1$, lo que indica que D_w se

incrementa cuando la cámara de ionización es introducida en el agua. Los detalles de la estimación de incertidumbres puede ser consultado en la referencia [9]

3.2. Evaluación de la D_W

Una vez calculados los factores de corrección k_p , medidas las corrientes con la cámara, las magnitudes de influencia y con constantes físicas indicadas en la Tabla 2, se aplica el modelo de la Ec. (3) obteniendo rapidez de dosis absorbida en agua $\dot{D}_W = 1,1112 \text{ mGy s}^{-1}$ (2004-02-03).

3.3. Incertidumbre expandida y CC IMR R/S

Las CC estiman las componentes de variación de corto y largo plazo para las cargas (corrientes medidas) que se usan en la determinación de la incertidumbre expandida U para la D_W . Por otro lado, las CC para la D_W de la Fig. 3 permiten verificar y validar la incertidumbre expandida asociada a la D_W . En efecto, la Fig. 3 muestra tres CC, la primera CC en la parte superior presenta las medias de la D_W para cada subgrupo, como se observa existe un límite de control superior y un inferior que nos acotan la variación en la determinación de la D_W variación que debe ser consistente con la U estimada, por otro lado carta de rango movable MR estima las variaciones entre dos subgrupos consecutivos y la carta S las variaciones dentro de los subgrupos de medidas.

El detalle del cálculo de la incertidumbre expandida U se realizó siguiendo las indicaciones de la guía BIPM-ISO [12], y se resumen en la Tabla 2, donde se presentan las componentes de incertidumbre estándar s y u correspondientes a las de tipo A y B, respectivamente; para cada magnitud, factor o constante involucrada. Estas incertidumbres estándar son expresadas en forma porcentual relativa al valor del factor o magnitud considerada.

4. DISCUSIÓN

Es necesario reducir la incertidumbre de los factores: $(1 + \mu' \cdot \bar{y})_{W,C}$, k_{cav} , k_{ps} y k_{pf} presentados en al Tabla 1, disminuyendo la varianza de las simulaciones, con el propósito de poder obtener una $U(k=2) < 1\%$ para la D_W .

Por otro lado, las CC para la D_W muestran que esta magnitud se está midiendo con exactitud del 0.4 %,

lo que confirma que la $U(k=2)$ está siendo sobreestimada.

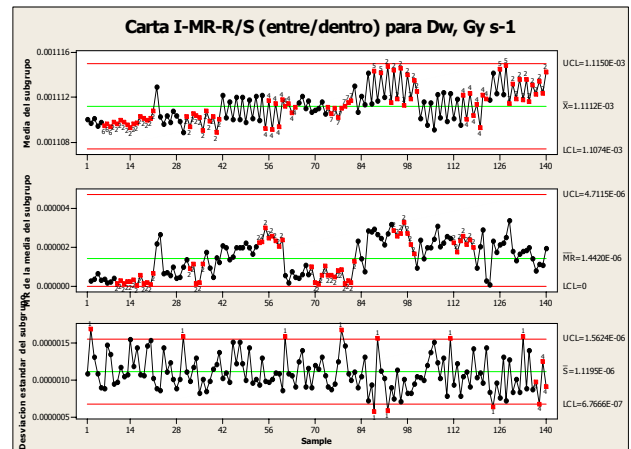


Fig. 3. CC para D_W medidas con cámara BEV CC01-131 para campo de radiación de ^{60}Co . $k = 140$ subgrupos, subgrupo $n = 30$. Período: 22/11/2004 al 09/12/2004.

5. CONCLUSIONES

Para la realización de la unidad de la D_W el LSCD-ININ-México ha elegido un patrón ionométrico en un campo de radiación gamma de ^{60}Co . En este caso aplicando el método del BIPM que usa simulación de MC se determinó que los valores de K_p son, [9]:

- $(k_p)_{\text{paralelo}} = 1,1195$ ($u_c = 0,95\%$)
- $(k_p)_{\text{perpendicular}} = 1,1194$ ($u_c = 0,95\%$)

Estos nos indican que la introducción de la cámara CC01 dentro del maniquí de agua produce una corrección del 11,9 % independientemente de la orientación de la cámara.

Por otro lado, dado que los usuarios requieren tener trazabilidad en la medición D_W para que en sus aplicaciones puedan garantizar al menos una $U(k=2) < 5\%$, los patrones primarios deben realizar la D_W con una $U(k=2) < 1\%$, en nuestro caso tenemos una $U(k=2) = 3.54\%$, por lo que necesitamos reducir las componentes de incertidumbre de los factores k_p , k_{ps} y k_{pf} .

REFERENCIAS

[1] IAEA, TRS-398, Absorbed Dose Determinations in external beam radiotherapy. An International code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. IAEA, WHO, PAHO and ESTRO, IAEA Viena, 2000.

[2] Attix, F. H., Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, J. Wiley, 1986.

[3] ICRU Report 64, Dosimetry of high-energy photon beams based on standards of absorbed dose to water, Journal of ICRU, 2001, **1**.

[4] AAPM Task Group 51, Protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electrons, Med. Phys., **26**, 1999, 1847-1870.

[5] BEV 1992, Primary standard graphite cavity chamber type CC01 ser. 131, Forschungszentrum Seibersdorf, YW022.DOC.

[6] DGN 1998, documento DGN.312.01.98, Patrón de la magnitud Kerma en aire.

[7] Boutillon, M. y Perroche, A. M., Ionometric determination of absorbed dose to water for cobalt-60 gamma rays, Phys. Med. and Biol., **38**, 1993, 439-454.

[8] Briesmeister, J. F., MCNP™ A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4C, Manual LA-13709-M, 2000.

[9] Xavier Vargas Verdesoto, Caracterización de un Patrón de Dosis Absorbida En Agua Mediante Métodos Ionométricos. Tesis de Maestría Física Médica ININ-UAEM, Facultad de Medicina, Septiembre 2003.

[10] MINITAB Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, Pennsylvania. MINITAB™ 2003.

[11] Han, K., Ballon, D., Chui, C. y Mohan, R., Monte Carlo simulation of a cobalt-60 beam, Med. Phys., **14**, 1987, 414-419.

[12] CENAM, Reporte técnico CNM-MED-PT-0002, Guía BIPM / ISO para la expresión de la incertidumbre en las mediciones, Querétaro – México, 1994.

Factor	Caso Paralelo, [9]		Caso Perpendicular, [9]	
	Promedio	100 u_c	Promedio	100 u_c
$\Psi_{w,c}$	1,018 7	0,17	1,014 0	0,17
$(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{w,g}$	1,112 0	0,24	1,111 9	0,24
$(1+\mu'\bar{y})_{w,c}$	1,002 3	0,63	1,002 9	0,65
k_{cav}	1,024 0	0,57	0,979 8	0,57

Tabla 1. Componentes del factor de perturbación k_p y sus incertidumbres combinadas relativa porcentuales u_c , para las diferentes orientaciones de la cámara, [9].

Símbolo	Contribución a la incertidumbre: Factores de Corrección y Constantes Físicas, [5,7,9]	Valor	Incertidumbre estándar Tipo A 100 s, [9]	Incertidumbre estándar Tipo B 100 u, [9]
ρ	Densidad del aire	1,204 70 kg m ⁻³		0,001
$(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{w,g}$	Razón de los promedios de los coeficientes de absorción másicos agua grafito	1,111 9		0,11
$\bar{S}_{g,aire}$	Cociente de los promedios de los Poderes de frenado másico grafito aire	1,003		0,30
\bar{w}/e	Energía media para producir un par de iones	33,97 J C ⁻¹		
$\psi_{w,g}$	Razón de fluencias de fotones agua grafito	1,014 2	0,002 0	
$(1+\mu\cdot\bar{y})_{w,g}$	Corrección debido al equilibrio electrónico transitorio	1,002 9	0,65	
k_{cav}	Corrección debido al tamaño finito de la cavidad	0,979 8	0,68	
k_{rec}	Recombinación	1,001 49	0,119 8	
k_{pol}	Polarización	1,001 99	0,022	
k_{dec}	Decaimiento radioactivo	1,000		0,001 1
k_h	Humedad del aire en la cavidad	0,997 0		0,03
k_p	Corrección por presión atmosférica (la cual se desacopla de la temperatura)	1,434 1	0,093 4	
k_T	Corrección por temperatura	0,989 9	0,079 8	
k_{ps}	Atenuación de Camisa impermeable de la cámara	1,009 4	0,61	
k_{pf}	Deformación de la superficie frontal de maniquí	1,002 2	0,61	
V	Volumen efectivo de colección	1,017 4E-6 m ³		0,300
k_{rn}	No uniformidad radial	1,000		0,12
k_{an}	No uniformidad axial	1,000		0,10
I	Corriente de ionización: variación largo plazo, S_B	24,89 E-12 A	0,279 2	
	Corriente de ionización: variación corto plazo, S_W		0,069 3	
k_{elec}	Electrómetro	1,000		0,000
\bar{D}_W	Rapidez de dosis absorbida en agua (2004-02-03)	1,111 2 mGy s ⁻¹		1,60
u_c	Incertidumbre combinada porcentual			1,60
v_{efec}	Número efectivo de grados de libertad			12,82
k	Factor de cobertura (95.45 % nivel de confianza)			2,21
$U = k u_c$	Incertidumbre expandida			3,54

Tabla 2. Determinación de la incertidumbre expandida para la realización de D_W con el Patrón Primario BEV CC 01 Ser 13 en un campo de ⁶⁰Co de acuerdo con el modelo de la Ec. (3), [7,9].