

# OPTIMIZACIÓN Y VALIDACION PARA EL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE UN DOSÍMETRO PARA RADIOTERAPIA EN AIRE Y EN AGUA, EN COBALTO 60

Alba Zaretsky, Margarita Saraví, Amalia Stefanic, Gustavo Montaña y Matías Vallejos  
Dosimetría de Radiaciones Ionizantes.  
Centro Atómico Ezeiza.  
Comisión Nacional de Energía Atómica.  
Av. del Libertador 8250  
(1419) Buenos Aires, Argentina.

Tel./Fax: (54-11) 6779-8228, [zaretsky@cae.cnea.gov.ar](mailto:zaretsky@cae.cnea.gov.ar)

**RESUMEN:** Este trabajo tiene como objetivo presentar la forma de optimización de los parámetros que intervienen en el procedimiento de calibración de un dosímetro para radioterapia en aire y en agua, en cobalto 60 y la validación de la determinación de la tasa de dosis en agua y kerma en aire, en el Laboratorio de Dosimetría de Radiaciones Ionizantes de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina. Se incluyen en este trabajo los resultados de las validaciones realizadas, la forma en que fueron analizados y la influencia de los parámetros involucrados en la incertidumbre de medición.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proceso de validación en el campo de las calibraciones no está tan pautado como en el caso de los ensayos. Por ello, cada laboratorio de calibración debe elaborar sus propios procedimientos adecuándolos a su actividad y, esencialmente, a cumplir con el concepto de validación, es decir, tal como lo establece el Vocabulario Internacional de Metrología [1], con la "verificación de que los requisitos especificados son adecuados para un uso previsto".

Con este concepto, la validación en el campo de las calibraciones involucra convalidar que "los procedimientos, los patrones de referencia, los equipos, las instalaciones y la capacidad e idoneidad técnica del personal responsable sean adecuados para el propósito establecido" [2].

El Grupo Dosimetría de Radiaciones Ionizantes de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (CNEA), constituye el Centro Regional de Referencia con Patrones Secundarios para Dosimetría (CRRD). Desde febrero de 2004, el Instituto Nacional de Metrología de Argentina (INTI) delegó en CNEA la realización y custodia de los patrones nacionales para metrología de radiaciones ionizantes. El laboratorio delegado para las magnitudes dosimétricas es el CRRD. Este laboratorio tiene, además, la

responsabilidad de diseminar las unidades de medida correspondientes.

El CRRD tiene implementado un sistema de calidad bajo la norma IRAM 301:2005 (equivalente a la norma ISO/IEC 17025:2005) [3] y tiene acreditados parte de sus servicios bajo esa norma desde el año 2004 con el Organismo Argentino de Acreditación (OAA). El sistema de la calidad es aplicable a todas las actividades vinculadas con la calibración de dosímetros para el nivel radioterapia, la calibración de dosímetros para el nivel radioprotección, incluyendo la irradiación calibrada de dosímetros personales y la calibración de dosímetros para altas dosis. Los servicios que tiene acreditados a la fecha son: 1) Calibración de cámaras de ionización en términos de kerma en aire por unidad de escala del electrómetro del cliente, en un haz de cobalto 60; 2) Calibración de cámaras de ionización en términos de dosis absorbida en agua por unidad de escala del electrómetro del cliente, en un haz de cobalto 60 y 3) Calibración de cámaras de ionización en términos de kerma en aire por unidad de escala del electrómetro del cliente, en haces de rayos X de energías medias.

## 2. ACTIVIDADES DE OPTIMIZACIÓN Y VALIDACIÓN

**Método general de trabajo.**

La calibración se realiza por el método de sustitución.

La magnitud dosimétrica kerma en aire está definida en un punto del campo de radiación en aire libre. Por definición, el coeficiente de calibración en términos de kerma en aire,  $N_K$ , es el cociente entre el kerma en aire libre (o tasa de kerma en aire libre) en un punto del haz de radiaciones, determinado con una cámara patrón, y las lecturas obtenidas con la cámara en calibración (aplicando a esas lecturas todos los factores de corrección que corresponda).

De acuerdo con la definición dada anteriormente, el  $N_K$  de una cámara, independientemente de su volumen, permite obtener el valor de kerma en aire libre a partir de mediciones de cargas eléctricas en un punto de un haz de la misma energía.

En el caso de dosis absorbida en agua, el procedimiento general es el mismo. El coeficiente de calibración de una cámara cilíndrica en términos de dosis absorbida en agua,  $N_{D,w}$ , es el cociente entre la dosis absorbida en agua a la profundidad de 5 cm en agua en un fantoma, determinada con una cámara patrón, y las lecturas obtenidas con la cámara en calibración (aplicando a esas lecturas todos los factores de corrección que corresponda) [4]. Los procedimientos de calibración han sido desarrollados por el laboratorio, siguiendo los protocolos correspondientes a la calibración en aire [5] y en agua [6] del Organismo Internacional de Energía Atómica.

El equipamiento utilizado durante la validación fue el siguiente:

Equipo Teradi 800 (irradiador); electrómetro Keithley 35617EBS Programmable o electrómetro Keithley 6517 A (indistintamente); cámara de transferencia NE 2571 o cámara patrón NE 2611 A; cable de conexión, adaptadores; soporte de sujeción de la cámara de ionización; termómetro; barómetro; higrómetro y micrómetro de interiores.

Para realizar las mediciones se instaló la cámara de ionización, conectada al electrómetro, en el banco de calibración, en el punto de referencia y en condiciones de referencia para la determinación de kerma en aire. Las condiciones de referencia en el haz  $\gamma$  de  $^{60}\text{Co}$  son: el centro de la cámara de referencia se posiciona a 0,80 m de la fuente, en el centro de un campo de 10 cm x 10 cm a esa distancia.

### Pasos del proceso

Los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

#### Optimización

- Optimización de las cargas colectadas (mejor repetibilidad);
- Optimización de la cantidad de lecturas;
- Optimización del tiempo de irradiación.

#### Validación

- Robustez:
  - Posición de la cámara;
  - Polaridad y voltaje de polarización;
- Repetibilidad.
- Reproducibilidad intermedia.
- Exactitud.

Para determinar el tiempo de irradiación que provee **el óptimo de cargas colectadas** se efectuaron 3 series de 10 lecturas cada una irradiando 1 min; 2 min y 5 min. El tiempo se fijó con el temporizador del equipo irradiador Teradi 800. El análisis consistió en comparar las series y determinar cuál es la óptima, entendiéndose por esto la que tiene mejor repetibilidad, o sea, la de menor coeficiente de variación.

Una vez determinado este tiempo, se integró durante un tiempo que permitiera coleccionar la carga óptima y se realizaron series de distinto número de lecturas para determinar el número óptimo de ellas. Se hizo una prueba de hipótesis de igualdad de varianzas para  $n = 5, 10, 20, 30, 40$  y 50 lecturas. Obviamente, cuanto mayor es el número de lecturas mejor estimación del "valor verdadero" se tiene. Dentro de las posibilidades que presenta el sistema del laboratorio, 50 lecturas es un número posible, adecuado estadísticamente, pero inconveniente para la práctica rutinaria. Es por esta razón que se trató de establecer su equivalencia estadística con un número más pequeño, tomando varios valores de  $n$  en el intervalo [5,50]. Se obtuvo así el ***n* óptimo**, considerándose como tal al menor valor de  $n$  tal que la varianza de la serie no tuviera diferencias significativas con la de la serie correspondiente a  $n = 50$ . Las determinaciones descriptas se hicieron solo en aire, ya que no es necesario repetir las en agua por no haber dependencia con el medio en el que se realiza el experimento.

Una vez determinado el  $n$  óptimo y utilizando ya este valor, se determinó finalmente el ***tiempo óptimo de irradiación***. Para ello se hicieron series de  $n$  lecturas, (con  $n$  óptimo), para  $t=1$  min,  $t=2$  min,  $t=4$  min,  $t=5$  min y  $t=10$  min de irradiación. Se

seleccionó como tiempo óptimo aquel para el cual la serie de mediciones tuviera el menor coeficiente de variación. Esta nueva evaluación se realizó para asegurar que ninguno de los parámetros (tiempo y número de lecturas) dependía del valor fijado inicialmente para el otro.

Finalizada la etapa de optimización, se pasó a la validación del procedimiento, esto es de la calibración de un dosímetro para radioterapia (cámara de ionización cilíndrica conectada a electrómetro del cliente) en aire, en cobalto 60. Se trabajó en aire, realizando determinaciones en agua sólo para los casos donde esta diferencia podía influir en la determinación del parámetro a evaluar.

La **robustez** se evaluó respecto de la posición de la cámara y respecto a la polaridad y voltaje de polarización.

La robustez en el posicionamiento de la cámara se analizó mediante un análisis de la varianza (ANOVA) para determinar la influencia del corrimiento de la cámara 0,1 mm, 0,2 mm, 0,5 mm y 1 mm hacia la fuente, comparando con el punto de referencia y también de 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, 0,5 mm y 1 mm alejándose de la fuente desde el punto de referencia. Asimismo se evaluaron corrimientos a ambos lados del eje en el plano perpendicular al haz, a derecha, izquierda, arriba y abajo.

Con respecto a la **polaridad y el voltaje de polarización** se hizo lo siguiente: 1) Comparar series de lecturas tomadas con polaridad positiva 100% y con polaridad positiva 50%; 2) Comparar series de lecturas tomadas con polaridad positiva 100% y polaridad negativa 100%, cambiando el signo de los valores a los efectos de la comparación. Posteriormente se realizó un ANOVA para detectar si existen diferencias significativas.

La **repetibilidad** se estudió realizando 4 tandas de lecturas de tamaño n óptimo, utilizando la cámara de referencia y evaluando los desvíos estándar obtenidos. Es requisito que los coeficientes de variación no superen el 0,2%. Esta prueba no es necesario realizarla también en agua.

Para evaluar la **reproducibilidad intermedia**, cada uno de los 2 operadores más experimentados realizó en forma independiente la determinación de tasa de kerma en aire en el punto de referencia y la determinación de dosis absorbida en agua en la profundidad de referencia. Estas determinaciones

las efectuó cada operador tres veces aplicando los procedimientos vigentes para dichas actividades.

En el estudio de la **exactitud** se consideró el coeficiente de calibración  $N_K$  de la cámara de referencia dado por el BIPM. Se recalibró esa misma cámara en el laboratorio contra la cámara Patrón Secundario. Se comparó el valor de  $N_K$  obtenido con el dado por el BIPM. Se requiere que la diferencia no supere el 0,7%. Este valor surge de considerar la incertidumbre del  $N_K$  obtenido en el laboratorio, lo cual permite establecer que ambos valores, el del laboratorio y el del BIPM, son consistentes. Igual tratamiento se realiza con el  $N_{D,w}$

Se consideró posteriormente el aporte de la información proveniente de la validación a la incertidumbre de medición para los procedimientos de calibración en aire y en agua.

### 3. RESULTADOS

Se presentan los resultados, tal lo descrito en el punto 2.

#### Optimización de las cargas colectadas:

Se realizaron tandas de lecturas de 10 mediciones.

Tiempo de irradiación	t=1 min	t=2 min	t=5 min
Coeficiente de variación (CV)	0,02%	0,01%	0,02%
<b>Carga óptima colectada: para t= 2min</b>			

Tabla 1

Con t= 2 min de irradiación, se realizaron series de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 mediciones. Se analiza si hay diferencias significativas entre ellas mediante un análisis de la varianza. La serie de 5 es la de las primeras 5 lecturas. A partir de la sexta lectura se toman 10, 20, 30 y 40 valores.

El análisis se realizó mediante el software NCSS 6.0.

Para un nivel de significación  $\alpha = 0,05$ , no se detectaron diferencias significativas entre los grupos de mediciones (prueba F, p=0,26).

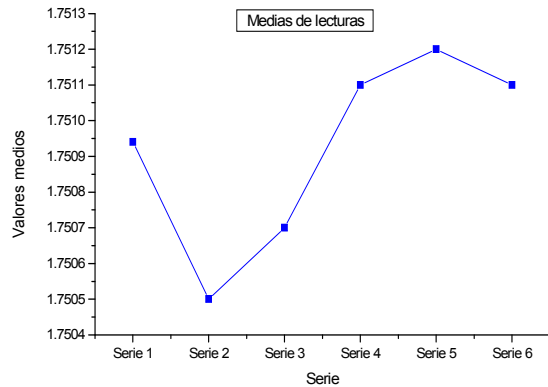


Figura 1

En la figura 1, se muestra el gráfico de los valores medios de lectura obtenidos.

Como no hay diferencias significativas para los distintos valores de n, se seleccionó n=10 para continuar con la optimización. Se descartó n=5 lecturas, para poder detectar eventuales tendencias, lo cual puede lograrse mejor con 10 lecturas. Se probaron otros tiempos de irradiación con tandas de 10 lecturas y se compararon. Los resultados son los siguientes:

Tiempo de irradiación (en minutos)	1 n=10	2 n=10	4 n=10	5 n=10	10 n=10
Coeficiente de variación (CV)	0,04	0,13	0,10	0,08	0,07
<b>El CV más bajo se obtiene para t=1min</b>					

Tabla 2

Combinando este resultado con la recolección de carga a la mitad de escala del electrómetro, se opta por t=1 min, para la cámara de 3 cm<sup>3</sup>.

Por lo tanto se concluye que los valores óptimos de número de lecturas y tiempos de irradiación son: n = 10 lecturas, t=1 min.

**Robustez**

Se analizó mediante un análisis de la varianza la influencia del corrimiento de la cámara 0,1mm, 0,2mm, 0,5 mm y 1mm hacia la fuente. Con un nivel de significación del 5% no se detectaron diferencias significativas en las lecturas correspondientes al punto de referencia, antes y después del corrimiento

y los desplazamientos de 0,1 mm y 0,2 mm. A partir de 0,5 mm comienzan a detectarse diferencias significativas. Se muestra el gráfico de los valores medios.

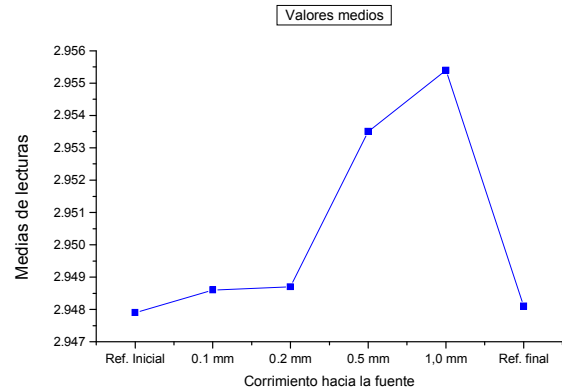


Figura 2

En la evaluación del corrimiento alejándose de la fuente, se detectó mediante un ANOVA, que no había diferencias significativas en las lecturas a partir de 0,2 mm. O sea, no se detectaron diferencias entre la ubicación de la cámara en el punto de referencia y un corrimiento de 0,1 mm. Se muestra el gráfico de los valores medios en la figura 3.

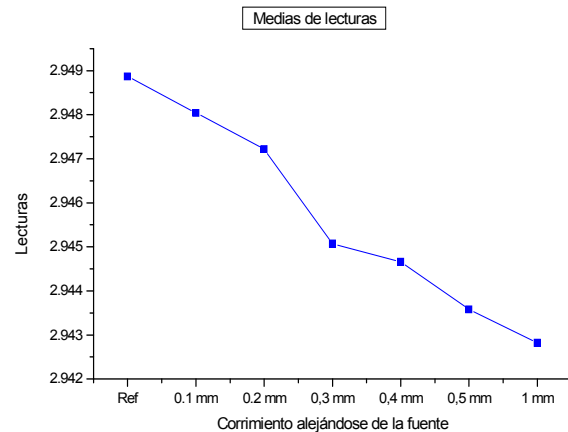


Figura 3

Adicionalmente, se realizaron las siguientes pruebas:

- 1) Posición de la cámara en el centro del campo (Centro\_1).
- 2) Corrimiento 5 mm hacia la derecha, mirando de frente al cabezal.
- 3) Corrimiento nuevamente al centro del campo

(Centro\_2).

4) Corrimiento 5 mm a la izquierda, mirando de frente al cabezal.

5) Corrimiento nuevamente al centro del campo (Centro\_3).

6) Corrimiento 2mm hacia abajo.

7) Corrimiento 2mm hacia arriba.

Se detectaron diferencias significativas tal como se puede ver en la tabla 3. Sin embargo, no se han detectado diferencias significativas entre las 3 posiciones centrales, a pesar de los movimientos de la cámara realizados entre medio de cada reubicación central.

Grupo	Media	Diferente del grupo
2mm arriba	-6,8438	Centro_3 Centro_1 5mm izquierda
5mm derecha	-6,8406	Centro_2
2mm abajo	-6,8342	Centro_1 Centro_2
Centro_3	-6,8326	2mm arriba
Centro_1	-6,8318	2mm arriba 5mm derecha
5mm izquierda	-6,8314	2mm arriba
Centro_2	-6,8298	2mm arriba 5mm derecha

Tabla 3

Se muestra el gráfico de los valores medios:

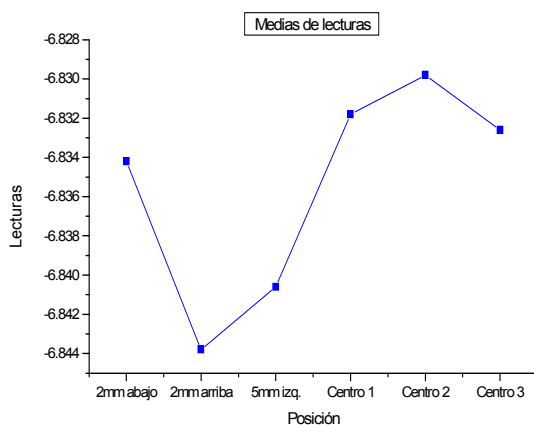


Figura 4

**Polaridad**

El análisis contempla dos comparaciones:

1) La comparación entre series de lecturas tomadas con polaridad positiva 100% y con polaridad positiva 50%.

2) La comparación entre series de lecturas tomadas con polaridad positiva 100% y polaridad negativa 100%. En este último caso se toma el módulo de los valores para poder realizar la comparación.

En ambos casos se realiza un análisis de la varianza. En el primer caso, dado que no se cumple la hipótesis de normalidad, se realiza un test no paramétrico. En el segundo caso, se realiza un análisis paramétrico.

En ambos estudios no se registran diferencias significativas entre los valores medios de lecturas, con un nivel de significación del 5%.

**Repetibilidad**

Se compararon 4 tandas de lecturas con el n óptimo y se realizó un análisis de la varianza entre ellas, no detectándose diferencias significativas con un nivel de significación del 5%. Adicionalmente, se muestran en la tabla 4 los valores medios obtenidos y sus coeficientes de variación, encontrándose que ninguno de los valores supera el límite de variación de 0,2%. Los valores se tomaron realizando las correcciones correspondientes.

Tanda	1	2	3	4
Media	-3,3824	-3,3826	-3,3852	-3,3856
Coefficiente de variación (CV)	0,07%	0,05%	0,09%	0,05%

Tabla 4

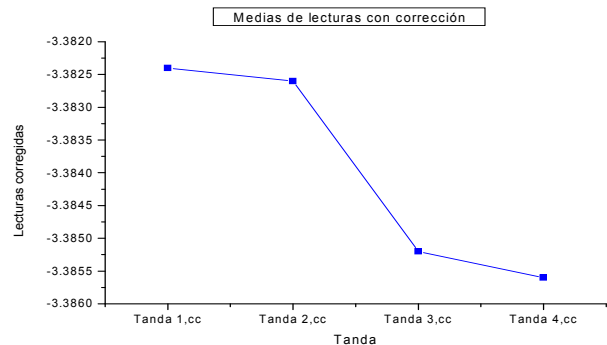


Figura 5

**Reproducibilidad intermedia**

Se evaluaron las diferencias entre los 2 operadores para las determinaciones en aire y en agua. La diferencia porcentual entre las mediciones de los 2 operadores para las determinaciones en aire fue de 0,13% y de 0,24% para las determinaciones en agua.

**Exactitud**

Se realizó el análisis con la cámara NE 2571#2394. Esta cámara se calibró en el BIPM en julio de 2005, obteniéndose los siguientes valores, en aire y en agua, con sus incertidumbres expandidas con  $k=2$ :

$N_k=41,64$ mGy/nC	$U = 0,17\%$
$N_{Dw}=45,72$ mGy/nC	$U = 0,30\%$

**Tabla 5**

Las recalibraciones en el laboratorio se realizan varias veces por año. Se muestran en la tabla 6 los valores obtenidos, para esta cámara, en el laboratorio, en junio de 2006:

$N_k=41,71$ mGy/nC	$U = 0,9\%$
$N_{Dw}=45,83$ mGy/nC	$U = 1,5\%$

**Tabla 6**

Para ambos coeficientes, en aire y en agua, la diferencia entre los valores obtenidos es de 0,2 %, cumpliéndose el requisito de ser menor que 0,7%.

**Incertidumbre**

El procedimiento de cálculo de incertidumbre se realiza según lo establecido en [7].

Las fuentes de incertidumbre para la calibración en aire que se toman en cuenta son las siguientes:

- Incertidumbre del coeficiente de calibración reportado por el BIPM.
- Constancia del coeficiente de calibración.
- Tres fuentes conectadas con el electrómetro: la proveniente de su calibración, la de las pérdidas eléctricas (las cuales pueden existir o no) y la de las lecturas que se hacen durante la calibración.
- Incertidumbre del efecto de recombinación.
- Efectos de la polaridad. Se ha visto que no hay efectos de la polaridad, pero se incorpora el aporte a la incertidumbre de la desviación que no supera el 0,5%.
- Condiciones ambientales: presión y temperatura (se corrige por ambas) y humedad.
- Reproducción de la distancia.

Se consideran despreciables las siguientes fuentes: orientación de la cámara, inhomogeneidad del campo, efecto del tallo y reproducción del tamaño del campo y diferencias en los espectros de energía de los haces de radiación. De la validación surge que la reproducibilidad intermedia, tomada como una fuente con distribución rectangular, considerando como intervalo de variación la diferencia entre los operadores, no tiene un aporte significativo a la incertidumbre final.

Las fuentes para la calibración en agua son las mismas, con la única diferencia de un aporte adicional por el posicionamiento del fantoma.

El detalle de los cálculos efectuados, en la calibración de la cámara NE 2571, la cual se calibra contra la cámara patrón secundario del CRRD son los siguientes:

**Incertidumbre del coeficiente de calibración.**

Los valores surgen del certificado de calibración emitido por el Bureau Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), el cual es el laboratorio primario.

**Constancia del coeficiente de calibración.**

Para la cámara de transferencia NE 2571 solo se tienen 2 valores (años 2002 y 2005), ya que esas fueron las calibraciones que se realizaron en el BIPM. Se realiza una estimación a partir de éstos. Tomando el desvío estándar de la media resulta

$$\frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,014 \text{ mGy} / \text{nC}}{\sqrt{2}} = 0,01 \text{ mGy} / \text{nC}, \text{ por lo}$$

que la incertidumbre estándar porcentual es 0,02%.

**El electrómetro.**

El electrómetro tiene 3 fuentes de incertidumbre:

- El factor de calibración, el cual es aportado por el laboratorio que realiza la calibración.
  - La medición de la carga recolectada. Esta es una componente de tipo A de la incertidumbre y proviene de las lecturas que se realizan.
  - Las pérdidas eléctricas. Se toma la máxima variación aceptada, que es del 0,2%, si hay pérdidas aceptables y se realiza la corrección correspondiente y es de 0,01%, si no las hay.
- En el caso b), el número de mediciones que se realizan están estipuladas en las instrucciones de trabajo correspondientes.

**Recombinación**

Como la tasa de dosis es baja, no se usa factor de recombinación.

De datos reportados en la bibliografía se estableció que la desviación relativa de la recombinación inicial

es de 0,0014 para las cámaras del tipo de la NE 2561. El efecto puede ser menor si se toman las cámaras de tipo Farmer aplicándoles 300V. Para la recombinación general, el efecto depende de la tasa de dosis, pero con una tasa de alrededor de 180 mGy/min, se tendrá una incertidumbre que también está en alrededor de 0,0014. Asumiendo una distribución rectangular para ambas recombinaciones y combinándolas, la incertidumbre del efecto de recombinación es **0,11 %**.

#### **Efecto de la polaridad**

Se asume que no hay efectos de la polaridad en la cámara de referencia, ya que se supone que la desviación es menor que 0,05%. Por lo tanto, con una distribución rectangular, la incertidumbre

considerada es de **0,03 %**  $\left(\frac{0,05\%}{\sqrt{3}}\right)$ .

#### **Presión**

La incertidumbre debida a la determinación de la presión tiene en cuenta 4 fuentes: la resolución del barómetro, la variación de presión dentro del laboratorio, el factor de calibración aportado por el laboratorio que realiza la calibración y la repetibilidad. Estas 2 últimas fuentes se consideran despreciables. La resolución del barómetro es de 0,01 kPa. Asumiendo una distribución rectangular, la incertidumbre asociada es la semiamplitud del

intervalo dividida por la  $\sqrt{3}$ . Esto da  $\frac{0,005kPa}{\sqrt{3}} = 0,0028kPa$ . Entonces, la

incertidumbre porcentual es 0,0028 %.

La variación de presión admitida en el laboratorio es de  $\pm 0,1kPa$ . Asumiendo una distribución rectangular, el aporte a la incertidumbre es  $\frac{0,1kPa}{\sqrt{3}} = 0,057kPa$ . Esto equivale a un 0,06 %.

Por lo tanto, el aporte de la presión es, combinando ambos aportes, de 0,6 %.

#### **Temperatura**

La incertidumbre debida a la determinación de la temperatura tiene en cuenta 4 fuentes: el factor de calibración aportado por el laboratorio que realiza la calibración, la resolución del termómetro, la variación de temperatura admitida en el laboratorio y la repetibilidad. Esta última fuente se considera despreciable. La resolución del termómetro de 0,2 °C. Asumiendo una distribución rectangular, la incertidumbre asociada es la semiamplitud del

intervalo dividida por  $\sqrt{3}$ . Esto da  $\frac{0,1^{\circ}C}{\sqrt{3}} = 0,057^{\circ}C$ . La incertidumbre porcentual

corresponde a 0,02%. Además, el certificado de calibración del termómetro informa, para una temperatura de 20 °C una incertidumbre de 0,1 °C. La incertidumbre relativa es entonces igual a  $\frac{0,1K}{293,15K} = 0,00034$ .

La variación de temperatura admitida es de  $\pm 0,4^{\circ}C$ . Asumiendo una distribución rectangular,

esto da  $\frac{0,4^{\circ}C}{\sqrt{3}} = 0,23^{\circ}C$ . La incertidumbre

relativa es entonces  $\frac{0,23K}{293,15K} = 0,000788$ .

Combinando las 3 incertidumbres, la incertidumbre combinada porcentual es igual a **0,09 %**.

#### **Humedad**

La humedad se mantiene dentro de los límites aceptados en el protocolo del Organismo Internacional de Energía Atómica TRS 398, por lo que no se hace corrección por humedad. Sin embargo, hay una incertidumbre asociada con la desviación que se produce en el rango (20% - 80%). Esta desviación es de alrededor de 0,0004. Asumiendo una distribución rectangular, el valor de

la incertidumbre es  $\frac{0,0004\%}{\sqrt{3}} = 0,0002\%$ , o sea,

corresponde a **0,02%**.

#### **Orientación de la cámara**

Esta fuente se considera despreciable.

#### **Reproducción de la distancia**

Considerando la resolución del micrómetro, que es 0,0001m, y una distribución rectangular, la incertidumbre aportada por el micrómetro es la semiamplitud del intervalo dividido por  $2\sqrt{3}$ , o sea,

$\frac{0,0001m}{2\sqrt{3}} = 0,00003m$ . La incertidumbre

porcentual es entonces de 0,004 %, habiendo relativizado la expresión a 0,8 m. Este valor resulta despreciable. Lo mismo sucede con la incertidumbre de la calibración del micrómetro.

**Efecto del tallo y reproducción del tamaño de campo**

Esta fuente se considera despreciable.

**Inhomogeneidad del campo**

Esta fuente se considera despreciable.

**Diferencias en los espectros de energía de los haces de radiación**

Esta fuente se considera despreciable.

Para las calibraciones acreditadas, el laboratorio tiene declarado en su alcance una incertidumbre en la determinación de la tasa de 0,8% ( $k=2$ ) para la calibración de cámaras de ionización en términos de kerma en aire por unidad de escala del electrómetro del cliente, en un haz de cobalto 60 y de 1,2% ( $k=2$ ) en la determinación de la tasa para la calibración de cámaras de ionización en términos de dosis absorbida en agua por unidad de escala del electrómetro del cliente, en un haz de cobalto 60.

**4. DISCUSIÓN**

Es de destacar que la norma ISO/IEC 17025 es muy explícita respecto a los requisitos que deben cumplirse para la validación de los métodos (punto 5.4, en particular el 5.4.5). Deja muy bien establecido que el procedimiento de validación puede incluir varias técnicas diferentes para determinar el desempeño de un método, entre ellas, la comparación con resultados obtenidos con otros métodos, la calibración utilizando patrones de referencia o materiales de referencia, las comparaciones interlaboratorios, la evaluación sistemática de los factores que influyen en el resultado, la evaluación de la incertidumbre de los resultados basada en el conocimiento científico de los principios teóricos del método y en la experiencia práctica. Como se establece en el documento del OAA [2] "en las actividades de calibración, aquello que debería estar sujeto a una validación permanente es la incertidumbre declarada como *capacidad óptima de medida*".

**5. CONCLUSIONES**

A través de todos los aspectos detallados, el CRRD cumple con los requisitos establecidos y se encuadra en el marco de la mejora continua.

En este sentido, se considera que el trabajo aporta una forma de encarar la validación en el ámbito de las calibraciones, más allá de la necesidad de

contar con tal validación, la cual permite cuantificar varias de las fuentes que intervienen en el cálculo de incertidumbre.

Realizar una optimización previa es importante, ya que, al no estar normalizado el número de mediciones a realizar o los tiempos de irradiación, es necesario establecer estos valores para las condiciones de trabajo del laboratorio. La optimización es indicativa y no necesariamente se han tomado los valores obtenidos tal cual lo determinaba el resultado, pero siempre se tomaron valores que proporcionan una mayor cobertura. El objetivo es asegurarse que no se trabaja en condiciones inadecuadas, pero llegando a un compromiso entre las posibilidades de tiempo en la realización del trabajo y la exactitud requerida para los resultados. Es por esto que hay casos como el de la determinación del  $n$  óptimo, donde se ha visto que un número de mediciones más pequeño que el usado aún podría ser utilizado, en los que se ha preferido aumentar este número, siendo que no afectaba mayormente los tiempos del servicio.

**REFERENCIAS**

- [1] Vocabulario Internacional de Metrología- Conceptos fundamentales y generales y términos asociados (VIM). JCGM 200: 2008, pp. 38.
- [2] Validación en el campo de las calibraciones. Documento del Organismo Argentino de Acreditación DC-LC-05 versión 3, 24 de octubre de 2007.
- [3] Norma IRAM 301:2005 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración" (equivalente a la norma ISO/IEC 17025:2005).
- [4] Optimización y validación del procedimiento de calibración de un dosímetro para radioterapia en aire y en agua, en cobalto 60. Documento del CRRD IT-14UR-57 revisión 2, 16 de noviembre de 2009.
- [5] OIEA: Informe Técnico N° 277 "Determinación de la dosis absorbida en haces de fotones y electrones", Código de Práctica Internacional, Viena, 1990.
- [6] IAEA: Technical Report Series N° 398 "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy", Viena, 2000.
- [7] Norma IRAM 35051: 2004 (basada en el documento EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration). "Procedimiento para la evaluación de la incertidumbre de la medición en la calibración".