

Pruebas de aceptación para electrómetros usados en radioterapia

Acceptance tests for electrometers used in radiotherapy

Miguel Moreno-Torres¹, Ana María Tornero-Lopez², Samuel Ruiz-Arrebola³, Damián Guirado¹, Manuel Vilches⁴

¹ Departamento de Radiofísica. Hospital San Cecilio. Doctor Oloriz S/N 18012 Granada.

² Departamento de Radiofísica. Centro Hospitalario Doctor Negrín. Barranco de la Ballena, s.n. Las Palmas de Gran Canaria-35010.

³ Departamento de Oncología Radioterápica. Clínica Santa María. Providencia, Santiago, Chile.

⁴ Servicio de Radiofísica. Instituto de Medicina Oncológica y Molecular de Asturias. Avda. Richard Grandio s.n. Oviedo-33193.

Fecha de Recepción: 17/07/2014 - Fecha de Aceptación: 03/12/2014

Trabajo seleccionado en el III Congreso Conjunto SEFM-SEPR. Cáceres 2013.

Se presenta un conjunto de pruebas diseñadas para determinar el cumplimiento de los requerimientos que establece la norma IEC 60731:19972 y el informe técnico TRS 3981 para electrómetros “reference class” utilizando el material normalmente disponible en un servicio de radiofísica hospitalaria. Las características sometidas a prueba son: estabilidad en el encendido, deriva y desplazamiento del cero, corriente de fuga, linealidad y repetibilidad. El método se aplica a 4 electrómetros: PTW UNIDOS, Sun Nuclear PC-Electrometer, Scanditronix-Wellhofer DOSE1 y Standard Imaging MAX4000. Se comprobó que los electrómetros cumplen los requerimientos, aunque se detectaron diferencias de rendimiento entre ellos. El método utilizado demostró ser suficientemente preciso y eficaz para obtener resultados fiables en estas pruebas y consideramos que se podría utilizar para establecer un procedimiento interno de aceptación de equipos.

Palabras clave: electrómetros, pruebas de aceptación.

We present a set of tests designed to check the compliance of the requirements established in the standard IEC 60731:19972 and TRS 3981 technical report for “reference class” electrometers using the material normally available in a medical physics department. The characteristics under exam are: stability in the start-up, zero shift, zero drift, leakage current, linearity and repeatability. The method is applied to 4 electrometers: PTW UNIDOS, Sun Nuclear PC-Electrometer, Scanditronix-Wellhofer DOSE1 and Standard Imaging MAX4000. We checked that the electrometers comply with the requirements, although we detected some differences in the performance between them. The method proved itself precise enough and efficient to provide with reliable results for these tests and we consider it could be used to establish an internal procedure for the acceptance of this kind of equipment.

Key words: electrometers, acceptance tests.

Introducción

El informe técnico TRS 398¹ y la norma IEC 60731:1997,² establecen los requisitos mínimos de funcionamiento para los electrómetros utilizados en radioterapia y el modo en que se realizan las pruebas para determinarlos. Teniendo en cuenta que estas pruebas están concebidas para su realización en un laboratorio de ensayo acreditado, y que para un servicio de radiofísica hospitalaria es importante poder efectuarlas internamente para sus instrumentos,³ consideramos importante establecer un programa de calidad para equipos ionométricos mediante pruebas

realizables con el material disponible en el hospital. La norma IEC establece un conjunto de pruebas considerablemente amplio, por lo que en este trabajo hemos elegido y realizado aquellas que reflejan el rendimiento general del aparato y que pueden hacerse con un montaje sencillo.

Material y métodos

Listado de instrumental utilizado:

- 4 electrómetros “reference class” (clase de referencia):²

* Correspondencia

Email: damian.guirado.llorente@gmail.com

- PTW UNIDOS (UNIDOS).
- Sun Nuclear Corporation PC Electrometer (SNC-PCe) –Consta de dos canales de medida–.
- Scanditronix-Wellhofer Dose 1 (DOSE1).
- Standard Imaging Max4000 (MAX4000).
- Fuente de estabilidad de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ PTW 48002.
- Cámara de ionización cilíndrica PTW Farmer 30010 PC portátil.
- Software para manejo de los electrómetros a través del PC, suministrado por el correspondiente fabricante.

Estas pruebas se realizarían idealmente empleando una fuente de carga calibrada como entrada del electrómetro. Como entre el material habitual en un servicio de radiofísica hospitalaria no se encuentra este equipo, utilizaremos en su lugar la carga liberada en una cámara de ionización bajo unas condiciones de irradiación fijas (exposición a una fuente de estabilidad durante un tiempo determinado), que simula perfectamente una fuente de corriente a estos efectos.

De las pruebas establecidas por la norma IEC 60731:1997² nos centraremos en las que reflejan el rendimiento general del aparato y que pueden emprenderse con un montaje sencillo, como se requiere en unas pruebas de aceptación. El procedimiento que seguimos es, esencialmente, el descrito en la norma con las modificaciones mínimas para poder sustituir la fuente de corriente por una cámara de ionización junto con una fuente de estabilidad, a efectos de inyectar una carga conocida en el electrómetro. La inyección de carga corresponderá a la exposición de la cámara conectada al electrómetro un determinado tiempo a la fuente de estabilidad, considerando que la carga producida será proporcional a este tiempo.

Existen diferencias en el manejo de cada equipo que no consideramos que afecten a los resultados de las pruebas. Las medidas se realizan en una habitación climatizada donde se chequea que las condiciones ambientales del montaje experimental se mantienen invariables durante cada prueba. A continuación describimos las pruebas elegidas como propuesta de test de aceptación.

Pruebas de la estabilidad tras el encendido

Con esta prueba se pretende estudiar el comportamiento del electrómetro durante el período de calentamiento. Desde el momento en que se enciende el electrómetro, o bien desde el momento en que se aplica el voltaje o se cambia su valor, se espera que se produzca un efecto transitorio que puede perturbar la medida de carga. Esto hace que sea preciso esperar un tiempo de estabilización para que la medida sea fiable. Si la corriente de entrada es constante, esperamos que la medida tienda progresivamente, de forma típicamente exponencial, al valor correspondiente al equilibrio.

Se indican a continuación los tiempos de espera (para encendido y cambios de polaridad y voltaje) recomendados por los fabricantes:

- UNIDOS: 15 min.
- SNC-PCe: 1 min.
- DOSE1: 15 min.
- MAX4000: 15 min.

Método: se aplica el voltaje tan pronto como sea posible tras la inicialización automática, que depende de cada electrómetro, y se comienza a medir justo después. No se realiza el ajuste del cero (excepto para el electrómetro MAX4000 en el que no es evitable). Se toman las medidas, monitorizando los electrómetros a través de un PC, a intervalos de tiempo regulares de 30 s durante un tiempo prolongado, superior a varias veces el valor de tiempo de estabilización esperado. Antes de realizar cada medida nos aseguramos de que el equipo haya estado apagado al menos dos horas para asegurar que las posibles cargas parásitas producidas durante el uso hayan desaparecido. La prueba se hace con distintos montajes experimentales, que son:

- Electrómetro sin cámara ni fuente.
- Electrómetro con cámara pero sin fuente.
- Electrómetro con cámara y fuente.
- Cambio de polaridad en electrómetro con cámara y fuente.
- Cambio de voltaje en electrómetro con cámara y fuente.

Se analiza aquí también la forma de la función carga recogida-tiempo, la amplitud del efecto transitorio y el modo en que se extingue y se cuantifica el efecto del ruido, evaluándolo en la zona de estabilidad.

Linealidad y repetibilidad

La norma IEC 60731:1997² establece la medida de la repetibilidad como la desviación típica, expresada como un porcentaje respecto a la media, de diez medidas sucesivas en las que se suministra al equipo la misma cantidad de carga en la escala más sensible. Para la linealidad define un criterio a través del cálculo de diferencias entre pares de medidas que no usaremos aquí. Consiste en, en lugar de estudiar directamente la linealidad, establecer la medida de la no linealidad a través de los valores:

$$d_i = 100 \times \left(\frac{Q_i}{t_i} \cdot \frac{t_{0.5}}{Q_{0.5}} - 1 \right) \quad (1)$$

de los cuales se elige el de valor mayor y donde Q_i y $Q_{0.5}$ son las cargas medidas en los tiempos t_i y $t_{0.5}$

respectivamente (la etiqueta 0.5 se refiere que el valor de carga $Q_{0.5}$ debe ser la mitad o al menos un valor significativamente distinto a Q_i). Cada d_i mide el porcentaje de desviación de la linealidad para un par de escalas.

En nuestro caso, evaluaremos la repetibilidad a través de la desviación típica y consideramos que deberá ser menor del 0.5%, como en la norma.

Pero para la linealidad (no-linealidad estrictamente) calcularemos, en lugar de los coeficientes citados, el residuo máximo de la recta de regresión respecto al conjunto de valores medidos para evaluar de forma más global los datos. El criterio de aceptación para la linealidad será que ninguno de los puntos obtenidos se desvíe más de un 0.5% del valor de la recta de regresión.

La cámara se conecta a cada electrómetro, se esperan 15 minutos y se ajusta el cero antes de empezar las medidas. El cero no se reajusta en ningún caso durante la toma de medidas. Para la repetibilidad se toman 10 medidas de 60 s y para la linealidad se toman medidas de 30, 60, 120, 180, 300 y 600 s.

Pruebas del cero y fuga

El *proceso de ajuste del cero* consiste en medir la corriente que el electrómetro detecta sin carga alguna, que se debe a los voltajes estáticos internos del dispositivo y, en caso de estar usando una cámara de ionización, debido a la lectura del fondo de radiación y de la fuga de la propia cámara. La medida de esta corriente se utiliza para compensar este efecto.

Llamaremos “zero shift” (desplazamiento del cero) al desplazamiento que se aplica en la escala de unidades eléctricas en el aparato al efectuar el cero; “zero drift” (deriva del cero), a la desviación de la medida sin carga del valor cero un tiempo después del ajuste del cero;² y corriente de fuga a la carga por unidad de tiempo que el dispositivo sigue midiendo después de finalizada la irradiación. Estas medidas se realizan después del tiempo de calentamiento establecido por el fabricante.

El valor de desviación del cero corresponde a la corrección realizada, es decir, a la diferencia entre la medida previa y posterior al cero. No obstante, consideramos muy importante también la efectividad neta del ajuste del cero que correspondería a la medida en vacío inmediatamente posterior al ajuste. La corriente de fuga está estrechamente relacionada con el cero y, a efectos prácticos, el resultado de esta prueba será similar a la deriva del cero, pero puede ser diferente debido a la descarga de condensadores y cargas parásitas generadas durante la irradiación. Para evitar confusión, debemos notar que también se llama corriente de fuga a la medida del conjunto ionométrico en ausencia de radiación que se realiza como control

previo a la utilización del equipo, y es en realidad una comprobación de que el cero se ha ajustado correctamente y una medida de la corriente residual que queda aún después de la corrección de cero. Esta prueba no se realiza aquí por estar incluida en las medidas de deriva y desviación.

Por motivos de adecuación a los dispositivos y de interés y significancia práctica de la prueba, se han introducido algunos cambios respecto a las instrucciones de la norma IEC:

- La desviación del cero se medirá como la diferencia de carga recogida en un tiempo, antes de hacer el cero e inmediatamente después utilizando el mismo modo de medida. No se considera la carga recogida durante el cero porque en algunos de los electrómetros no se muestra.
- El valor de las corrientes de deriva y fuga se calcula según la norma internacional utilizando dos cargas medidas, Q_1 y Q_2 , y el tiempo transcurrido entre ellas T como:

$$D_m = \frac{Q_1 - Q_2}{T} \quad (2)$$

- No obstante, aquí se calculará mediante regresión lineal de todas las medidas para considerar conjuntamente la serie completa de datos adquiridos.
- La corriente de fuga se mide con la cámara conectada (sin radiación), en lugar de desconectarse como indica la norma internacional. La razón es que, en la práctica clínica habitual, la cámara permanece conectada al dispositivo una vez cesa la irradiación. Sin embargo, en las pruebas de desviación y deriva, el ajuste de cero se ejecuta sin cámara ya que consideramos que interesa el comportamiento del electrómetro aislado.
- A pesar de que la norma IEC sugiere expresar los valores de estas cantidades en forma de porcentaje de la corriente mínima de entrada efectiva,² en este trabajo hemos considerado más indicativo del rendimiento real de los electrómetros el valor de carga o corriente absoluta.

Datos de los fabricantes y requisitos de la norma IEC

Los cuatro electrómetros elegidos para este estudio se clasifican dentro de la categoría “reference class” establecida por la norma IEC 60731:1997² y, por tanto, han de cumplir los requisitos que esta dicta al respecto. Exponemos en la tabla 1, junto con los requisitos de la norma IEC, los valores que proporcionan cada uno de los respectivos manuales⁴⁻⁷ para las características que se ponen a prueba.

Tabla 1. Valores aportados por el fabricante y requisito de la norma IEC para las pruebas. Las cantidades en blanco no son especificadas en los manuales. (*) La IEC define estos valores en referencia a valores mínimos/máximos indicados o efectivos.

	Unidos	SNC PGe	DOSE1	MAX4000	IEC 60731
t. calentamiento	15 min	1 min	15 min	15 min	15 min
No linealidad	< 0.5%	< 0.1%	< 0.1%	< 0.06%	< 0.5%
Repetibilidad	—	< 0.25%	< 0.2%	< 0.1%	< 0.5%
Desv. cero	—	—	—	—	< 1.0%*
Deriva cero	< 0.001 pA	despreciable	—	< 0.001 pA	< 1.0%*
Fuga	< 0.001 pA	< 0.001 pA	< 0.01 pA	< 0.001 pA	< 0.5%*

Resultados y discusión

Pruebas de la estabilidad tras el encendido

Los resultados, cuando medimos sin fuente, se expresan mediante el valor de carga medido directamente y, cuando se mide conectando cámara y fuente, se expresan como diferencias porcentuales respecto al valor de estabilidad. La representación de la evolución del transitorio frente al tiempo, sin fuente radiactiva con cámara conectada y desconectada y con la fuente presente para encendido, cambio de polaridad y cambio a voltaje reducido, se muestra en la fig. 1 para cada electrómetro por separado; y la representación conjunta, para encendido con y sin fuente radiactiva, en la fig. 2. Especialmente esta última permite ver que existen diferencias cualitativas importantes que hacen difícil utilizar un solo criterio sencillo para evaluar y comparar el comportamiento de los electrómetros.

Debido a la forma particular que tiene cada transitorio y a la presencia de ruido, no es conveniente realizar ajustes a formas funcionales sencillas. En las medidas sin radiación consideramos que el transitorio

acaba cuando la carga recogida disminuye por debajo del 10% del máximo; éste será llamado intervalo del transitorio, correlacionado con el tiempo de calentamiento, y el resto de los puntos formarán el intervalo estable. Definimos la amplitud máxima del transitorio como el valor máximo contenido en el intervalo del transitorio, y la amplitud media como el valor medio de dichos puntos. El nivel de ruido a lo largo de la curva y en especial donde el transitorio ha terminado también nos interesa; consideramos que la amplitud del ruido es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo en la segunda mitad de los valores del intervalo estable, que será también el intervalo utilizado para estimar el valor medio en estabilidad. En el caso de las medidas con radiación, debido a la pequeña amplitud del efecto en relación ruido, nos limitamos a encontrar el orden de magnitud de las desviaciones más grandes respecto al valor final y el tiempo aproximado en el que se alcanza una estabilidad compatible con el ruido. A pesar de estas definiciones, se han aplicado técnicas de ajuste y suavizado específicas para cada equipo para intentar homogeneizar las distintas formas observadas. Los parámetros utilizados en el análisis de las curvas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Valores estimados de los parámetros del transitorio y del ruido para las medidas realizadas. Los valores que no han podido estimarse aparecen en blanco.

		Unidos	SNC PGe		DOSE1	MAX4000
			Canal 1	Canal 2		
Sin cámara ni fuente	Amp. max. transit. (pC)	2.13	0.82	0.59	1.28	< 0.1
	Amp. med. transit. (pC)	1.14	0.28	0.16	1.28	< 0.1
	Long. transitorio (s)	240	480	1350	< 30	—
	Amp. ruido (pC)	0.03	0.09	0.085	0.30	0.015
Fuente y cámara	Amp. trans. (aprox.)	0.65%	0.48%	—	0.44%	< 0.10%
	Amp. ruido	< 0.05%	0.16%	0.38%	0.1%	0.06%

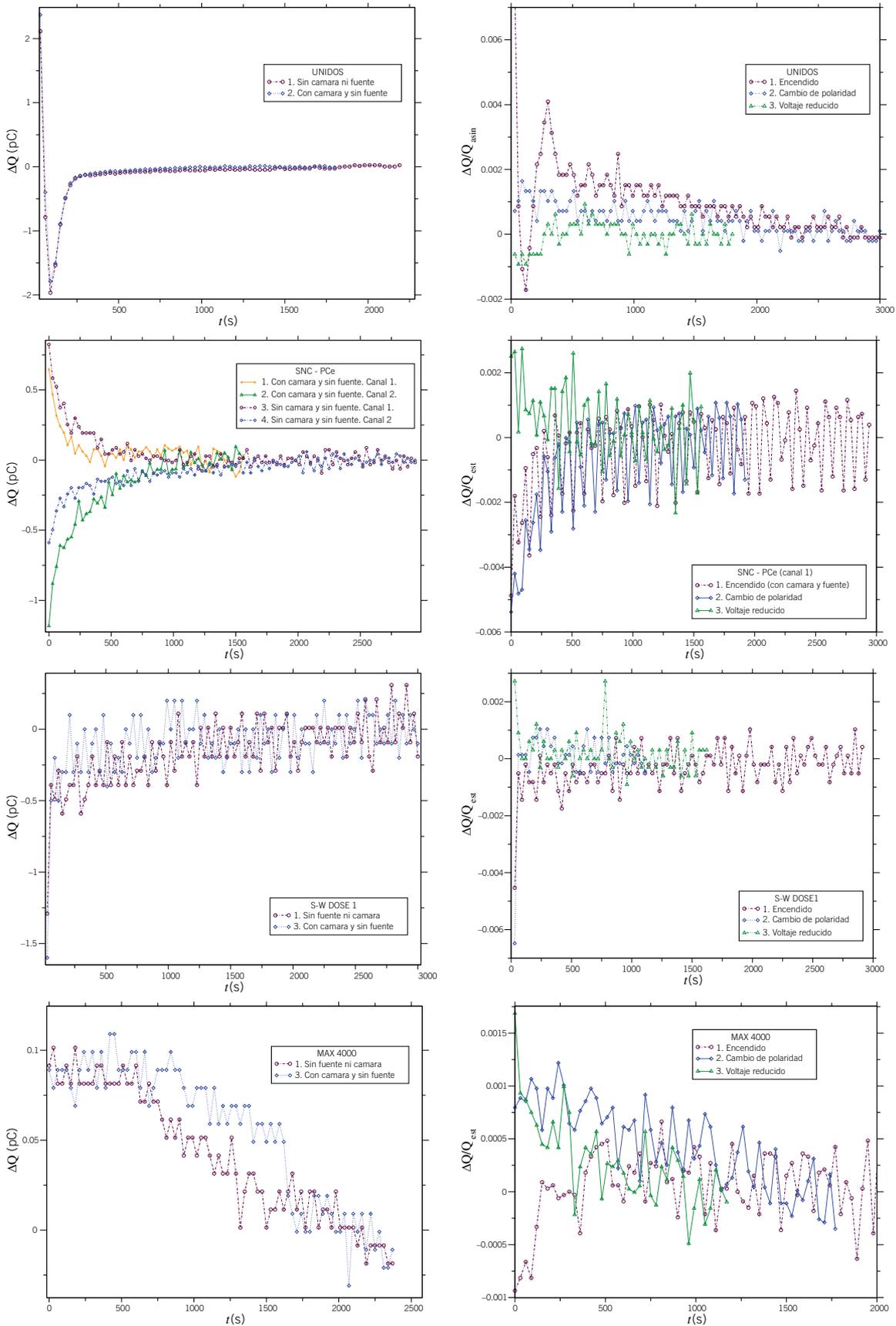


Fig. 1. Transitorios en distintas condiciones: sin radiación (izquierda) y con la fuente radiactiva (derecha).

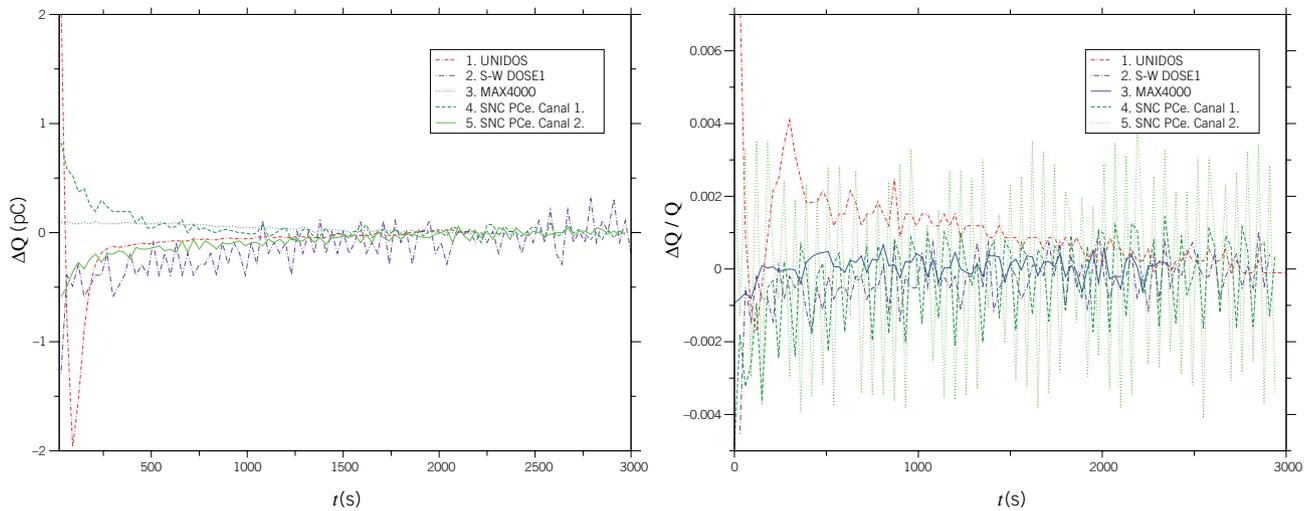


Fig. 2. Transitorios en el encendido: sin radiación (izquierda) y con la fuente radiactiva (derecha). En el primer caso se representa la carga absoluta recogida, en el segundo la diferencia respecto al valor medio relativa a ese mismo valor.

Tabla 3. Medidas de la desviación del cero para los electrómetros UNIDOS, DOSE1 y SNC-PCe.

Test	Unidos				DOSE1			
	pre 0	I_0 (75 s)	post 0	I	pre 0	I_0 (60 s)	post 0	I
1	-2.0	—	-0.4	-1.6	-124	-123	-1	-123
2	-1.6	—	-0.3	-1.3	-112	-111	1	-113
3	-1.0	—	0.1	-1.1	-106	-105	2	-108
4	0.4	—	0.0	0.4	-100	-103	0	-100
5	0.6	—	-0.1	0.7	-97	-103	2	-99
Test	SNC PCe							
	Canal 1				Canal 2			
	pre 0	I_0 (60 s)	post 0	I	pre 0	I_0 (60 s)	post 0	I
1	37.5	57	21.5	16.0	74.5	80	3.9	70.6
2	80.0	82	1.0	79.0	74.8	76	0.8	74.0
3	88.5	89	1.1	87.4	80.8	82	0.9	79.9
4	89.5	91	1.0	88.5	82.8	83	0.1	82.7
5	96.5	97	0.3	96.2	87.5	87	0.8	86.7
Resumen	Unidos	SNC PCe		DOSE1				
		Canal 1	Canal 2					
I_{pre-0} [media] (pA)	-0.7 ± 1.1	78 ± 23	80 ± 5	-110 ± 11				
I_{post-0} [media] (pA)	-0.1 ± 0.2	5 ± 16	1 ± 4	-1 ± 8				
ΔI [media] (pA)	-0.6 ± 1.0	73 ± 32	78 ± 6	-110 ± 10				
ΔI [max] (pA)	1.6	96.2	86.7	123				

Tabla 4. Medidas de la deriva del cero para los cuatro electrómetros. El valor I_{drift} corresponde al coeficiente obtenido por regresión lineal y Δ_{drift} es su incertidumbre.

t(s)	Medidas de 100 s sin carga (pC)				
	UNIDOS (cero 75 s)	SNC PCe (cero 60 s)		DOSE 1 (cero 60 s)	MAX400 (cero 60 s)
		Canal 1	Canal 2		
Cero	(—)	0.093 pA	0.089 pA	-0.11 pA	(—)
0	-0.03	-0.07	-0.14	-0.2	-0.01
100	-0.02	-0.10	-0.22	0	-0.04
200	-0.01	-0.12	-0.45	0.2	-0.07
300	-0.01	-0.15	-0.62	0.3	-0.08
600	0	-0.30	-0.98	0.4	-0.09
900	0	-0.39	-1.39	0.8	-0.07
1200	0	-0.70	-2.01	0.9	-0.10
1800	0.03	-0.85	-2.40	1.4	-0.13
3000	0.08			1.6	-0.19
I_{deriva} (fA)	0.20 ± 0.017	-2.8 ± 0.2	-8.0 ± 0.5	3.6 ± 0.4	-0.30 ± 0.04
I_{drift} (pA)	$(3.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$	$(-4.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$	$(-1.33 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$	$(6.0 \pm 0.7) \cdot 10^{-4}$	$(-4.9 \pm 0.7) \cdot 10^{-5}$

El distinto comportamiento del transitorio a lo largo del tiempo para cada una de las pruebas hace que sea difícil establecer un único criterio sencillo para evaluarlo en cada caso particular. En líneas generales, los transitorios de cambio de polaridad y voltaje se comportan de modo similar al del encendido pero tienen menor intensidad y duración. El electrómetro

DOSE1 responde con un transitorio muy rápido y de poca intensidad, pero permanece después un ruido importante durante el resto de la prueba; hay que notar además que la escala de la lectura está en décimas de pC y no en centésimas de pC como en los demás, de ahí la discretización más gruesa en la gráfica. Los dos canales del electrómetro SNC-PCe

Tabla 5. Medidas de la corriente de fuga para los cuatro electrómetros. El valor I_{fuga} corresponde al coeficiente obtenido por regresión lineal y Δ_{fuga} es su incertidumbre asociada ($k = 1$). Se muestra el valor de carga total y la diferencia del valor de carga a tiempo t con el valor en el instante en que finaliza la irradiación.

t(s)	Valor de carga tras el tiempo t (pC)									
	UNIDOS (cero 75 s)		SNC PCe (cero 60 s)				DOSE1 (cero 75 s)		MAX400 (cero 60 s)	
	Q	Q	Canal 1		Canal 2		Q	Q	Q	Q
0	-99.66	0.0	-107.1	0.0	-104.8	0.0	-119.8	0.0	-115.85	0.0
60	-99.68	-0.02	-107.1	0.0	-105.2	-0.4	-119.9	-0.1	-115.93	-0.08
120	-99.7	-0.04	-107.0	0.1	-105.0	-0.2	-119.7	0.1	-115.9	-0.05
180	-99.72	-0.06	-107.0	0.1	-105.0	-0.2	-119.9	-0.1	-115.92	-0.07
240	-99.74	-0.08			-105.0	-0.2	-119.9	-0.1	-115.89	-0.04
360	-99.78	-0.12	-106.9	0.2	-105.0	-0.2	-119.9	-0.1	-115.88	-0.03
600	-99.83	-0.17	-106.6	0.2	-105.0	-0.2	-120.1	-0.3	-115.78	0.07
I_{fuga} (fA)	0.29 ± 0.01		-0.4 ± 0.1		-0.5 ± 0.3		0.5 ± 0.2		-0.17 ± 0.08	

Tabla 6. Medidas para el cálculo de la repetibilidad de los electrómetros. Se esperan 15 minutos y se hace el ajuste de cero antes de las medidas. Las medidas se realizan en un período de aproximadamente 40 minutos. No se corrige por presión y temperatura al no ser relevante para el valor de s .

nº medida	Medidas de 60 s, fuente FC01 (pC)				
	UNIDOS	SNC PCe		DOSE 1	MAX400
		Canal 1	Canal 2		
1	-651.7	-650.5	-652.0	-651.1	-649.88
2	-651.5	-650.8	-652.5	-651.4	-649.81
3	-651.4	-652.0	-652.0	-649.8	-649.90
4	-651.0	-651.0	-652.4	-649.1	-650.12
5	-650.4	-650.2	-651.9	-649.7	-650.42
6	-650.0	-651.7	-651.9	-649.5	-650.41
7	-650.0	-651.5	-652.6	-649.0	-650.19
8	-650.4	-651.0	-652.7	-649.6	-650.84
9	-650.8	-651.0	-652.5	-650.1	-650.55
10	-651.2	-652.3	-651.7	-652.1	-650.09
\bar{x}	-650.8	-651.2	-652.2	-650.1	-650.22
$(s/\bar{x}) \cdot 100$	0.11	0.10	0.05	0.16	0.05

responden con un patrón de aspecto exponencial o doble exponencial, pero su estabilización es lenta. El electrómetro UNIDOS presenta transitorios intensos pero de muy corta duración y caída muy brusca hasta valores estables para los cuales el ruido es el menor de los cuatro aparatos. El electrómetro MAX4000 prácticamente no muestra transitorio y también presenta una relación de ruido muy buena, cercana a la del electrómetro UNIDOS. No es posible apreciar una asíntota en la gráfica para el MAX4000, pero las

variaciones son tan pequeñas que puede considerarse que son todas debidas al ruido y la estabilidad existe desde la primera medida.

Pruebas del cero y fuga

Las medidas de desviación del cero, que se muestran en la tabla 3, se han tomado desde el momento del encendido a lo largo de un intervalo de aproximadamente 1 hora y media, en el que no ha habido varia-

Tabla 7. Medidas de distinta duración para comprobar la linealidad de los electrómetros. Se esperan 15 min y se hace el ajuste de cero antes de las medidas. El valor "Coef. lin." corresponde al coeficiente obtenido por regresión lineal y Δ_{lin} es su incertidumbre asociada ($k = 1$).

t_{medida} (s)	Medidas con la fuente FC01 (pC)				
	UNIDOS	SNC PCe		DOSE 1	MAX400
		Canal 1	Canal 2		
30	324.8	-325.0	-326.1	-325.8	-325.24
60	649.1	-648.6	-651.7	-651.1	-650.12
120	1299	-1299	-1303	-1303	-1300.9
180	1948	-1949	-1955	-1950	-1951.6
300	3246	-3248	-3259	-3250	-3249.7
600	6493	-6500	-6518	-6501	-6509.1
Coef. lin. (pC/s)	10.8213	-10.8341	-10.8636	-10.8324	-10.8479
Δ_{lin} (pC/s)	$7.11 \cdot 10^4$	$1.82 \cdot 10^3$	$6.88 \cdot 10^4$	$2.55 \cdot 10^3$	$4.20 \cdot 10^3$
R^2	0.9999999	0.9999999	0.9999999	0.9999998	0.9999994
Desv. max.	0.038%	0.322%	0.119%	0.148%	0.308%

ciones relevantes de presión y temperatura. Para cada valor se proporciona:

- Corriente media en una medida durante 100 s previa al ajuste de cero ($I_{\text{pre-0}}$ (pA)).
- Corriente durante el ajuste del cero en los casos en los que el aparato lo muestra (I_0 (pA)).
- Corriente media en una medida de 100 s inmediatamente posterior al cero ($I_{\text{pre-0}}$ (pA)).
- “Zero shift” o diferencia entre las dos medidas anteriores (ΔI (pA)).

La comparación se realiza solamente entre UNIDOS, DOSE1 y SNC-PCe, considerando los dos canales de este último. Para el equipo MAX4000 no ha sido posible realizar la prueba de desviación del cero porque el aparato calcula y aplica la corrección de cero forzosamente después del calentamiento y antes de que sea posible hacer ninguna medida.

Las medidas correspondientes a la prueba de deriva del cero y de corriente de fuga se muestran en las tablas 4 y 5 respectivamente. El ajuste de cero se hace justo después del encendido en ambos casos. En el momento en que el proceso de ajuste acaba se comienza a medir, con medidas de 100 s partiendo del tiempo t para la deriva del cero, y, para la corriente de fuga, se mide primero con la cámara insertada en la fuente y a los 10 ± 1 segundos se retira la cámara de la fuente y se registran los valores de carga proporcionados tras un tiempo t .

El valor determinado de corriente de fuga y deriva del cero, en pA, se obtiene mediante una regresión lineal. La correlación de esta regresión no es buena, y no es esperable que lo sea, porque influyen factores de naturaleza estocástica y pueden oscilar y cambiar durante la medida. No obstante, obtener la pendiente media que corresponde a la recta de regresión resultante permite ponderar los valores de deriva y fuga usando varias medidas.

Debido a algunas discrepancias observadas con otras medidas para el electrómetro SNC-PCe, las pruebas de corriente de fuga y deriva del cero han sido realizadas varias veces. En el conjunto de series de medidas se observa un comportamiento estable (el valor medido se conserva) para todos los electrómetros excepto para el SNC PCe, que ha dado medidas de corriente de fuga de hasta más de 5 pC en 600 s en las repeticiones del mismo test, aunque la mayoría de las medidas de fuga resultan menores de 1 pC.

Las medidas de corrientes de fuga son similares para los cuatro equipos, la desviación del cero del UNIDOS es mucho menor que las del DOSE1 y el SNC-PCe y, para la deriva del cero, se obtiene un mejor rendimiento de los aparatos UNIDOS y MAX4000, con

diferencias de al menos un orden de magnitud en la corriente de deriva.

Linealidad y repetibilidad

Las pruebas de repetibilidad y linealidad, cuyos resultados se muestran en las tablas 6 y 7, no muestran diferencias significativas para ninguno de los aparatos. Sólo la desviación de la linealidad del UNIDOS resulta notablemente más baja que la de los demás. Para encontrar diferencias distinguibles sería necesario un estudio que considere una mayor densidad de medidas, y de existir éstas, su influencia en la medida en ningún caso sería relevante para el tipo de uso y rango de las medidas que se realizan en un hospital.

En la tabla 6 los autores no ven necesario explicar qué es \bar{x} y que era s ; en el valor medio se han quitado los decimales que superan la resolución de la lectura; en la última fila se han puesto en % los valores que pedía la norma con un nº de decimales más que suficiente para este fin.

Conclusiones

Hemos comprobado que los requisitos de funcionamiento para electrómetros establecidos por la norma IEC 60731:1997² pueden ser verificados con el material del que habitualmente se dispone en el hospital haciendo modificaciones mínimas en los procedimientos indicados. Esto permite establecer una metodología interna de pruebas de aceptación para un servicio de radiofísica hospitalaria.

La comparación de los resultados obtenidos para los electrómetros en las distintas pruebas nos ha llevado a destacar las siguientes observaciones:

- Los cuatro electrómetros cumplen las condiciones para ser “reference class”. Además, teniendo en cuenta las exigencias habituales en la práctica clínica, las pequeñas diferencias de rendimiento entre ellos no serán relevantes en la medida.
- El comportamiento de la característica carga recogida-tiempo durante los transitorios de encendido, cambio de polaridad y de voltaje de polarización es particular de cada electrómetro. Esto ocurre hasta el punto de ser difícil establecer un criterio sencillo para evaluarlo de manera aplicable a todos los casos. No obstante, tras ajustar convenientemente la curva de respuesta de cada electrómetro se observan también diferencias cuantitativas importantes. En líneas generales, los transitorios de cambio de polaridad y voltaje se comportan de modo similar al del encendido pero tienen menor intensidad y duración.
- En todo caso, todos ellos pueden considerarse en condiciones de medir y estables dentro de las

incertidumbres requeridas en clínica en tiempos de espera mucho menores a los 15 minutos que suelen tomarse como referencia.

- El comportamiento en linealidad y repetibilidad resulta muy similar para todos los electrómetros.
- La medida de corrientes de fuga, desviación del cero y deriva del cero sí lleva a destacar un mejor rendimiento de los aparatos UNIDOS y MAX4000 frente a DOSE1 y SNC-PCe, con diferencias de al menos un orden de magnitud.

Bibliografía

1. IAEA TRS-398. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water. Viena: IAEA, 2000.
2. Norma Europea BS EN 60731:1997, IEC 60731:1997. Medical electrical equipment. Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy 1997.
3. De la Vega JM, Vilches M, Guirado D, Lallena AM. Control estadístico de equipos ionométricos. Rev Fis Med 2010;11:211-6.
4. PTW-Freiburg. Firmware No. 2.20 [D196.131.0/4]. Instruction Manual PTW-UNIDOS 1996.
5. Scanditronix-Wellhofer. P-05-003-510-001 v.01. Dose1 System Manual.
6. Standard Imaging. DOC #80206-16. MAX4000 User Manual 2005.
7. SUN NUCLEAR CORP. Doc. 1014012, Rev. E. PC Electrometer User's Guide 2011.

imagine



...el doble de láminas al doble de velocidad



Con Agility™, esto es realidad.

El MLC más avanzado para la radioterapia actual, Elekta Agility esculpe con precisión la radiación gracias a 160 láminas de gran resolución en un campo de 40 cm × 40 cm. Con capacidad de gestionar el abanico de terapias más amplio, Agility también dispone de un movimiento de lámina ultrarrápido, con una fuga extraordinariamente baja para maximizar el potencial de técnicas avanzadas tales como SRS (sistema de radiocirugía estereotáctica), SRT (sistema de radioterapia estereotáctica) y VMAT (arcoterapia modulada volumétrica).

La licencia de Agility no se comercializa en todos los mercados. Para obtener más información, póngase en contacto con el representante local de Elekta.

4513 371 0993 03:12



Experience the Elekta Difference
Más información en: elekta.com/imagine



ELEKTA