

**DETERMINACIÓN DE PARAMETROS  
CARACTERISTICOS DEL HAZ DE RAYOS X EN  
RADIODIAGNOSTICO. IMPLEMENTACIÓN  
CALIDAD RQR3**

**DETERMINATION OF CHARACTERISTIC  
PARAMETERS OF THE X-RAY BEAM IN  
RADIODIAGNOSTIC. IMPLEMENTATION QUALITY  
RQR3**

**Camilo E. Calderon**

Grupo de Investigaciones y Aplicaciones Radiactivas, Dirección de Asuntos Nucleares,  
Servicio Geológico Colombiano. Bogotá - Colombia.

(Recibido 07/2018: Aceptado: 12/2018)

**Resumen**

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos al desarrollar la metodología propuesta en la norma IEC 61267 para la caracterización de las calidades de radiación del haz de rayos x para radiodiagnóstico. Las características fueron analizadas por medio de la medición de los parámetros: filtración inherente, primera capa hemireductora ( $1^\circ\text{HVL}$ ) y coeficiente de homogeneidad, estas mediciones se realizaron solo para la calidad de radiación RQR3. Los materiales utilizados en el trabajo fueron: el tubo de rayos x Balteau NDT modelo XSDBip-LS1 instalado en Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica (LSCD), cámara de ionización de placas paralelas con un volumen de  $75\text{cm}^3$  modelo 39060, filtros de aluminio de diferentes espesores con una pureza del 99.9% y una cámara monitora PTW tipo 34014. Los resultados obtenidos de filtración inherente nos permitieron comprobar que el tubo puede ser utilizado para la implementación de las demás calidades de radiodiagnóstico, además se determinó que la medición de los restantes parámetros encontrados para

RQR3 están dentro de los límites propuestos en la norma. Estos resultados son un aporte fundamental al posterior establecimiento de patrones de referencia a nivel de radiodiagnóstico, mamografía y tomografía computarizada que en la actualidad no existen en el país.

**Palabras clave:** Calidad de radiación, radiodiagnóstico, filtración inherente.

### Abstract

This paper presents the results obtained by developing the methodology proposed in the IEC 61267 standard for the characterization of the radiation qualities of the x-ray beam for radiodiagnostic. The characteristics were analyzed by means of the measurement of the parameters: inherent filtration, first hemireductor layer ( $1^\circ\text{HVL}$ ) and homogeneity coefficient, these measurements were made only for the RQR3 radiation quality. The materials used in the work were: the Balteau NDT x-ray tube model XSDBip-LS1 installed in Secondary Calibration Dosimetry Laboratory (LSCD), ionization chamber of parallel plates with a volume of  $75\text{cm}^3$  model 39060, aluminum filters of different thicknesses with a purity of 99.9% and a PTW monitor chamber type 34014. The results obtained from inherent filtration allowed us to verify that the tube can be used for the implementation of the other radiodiagnostic qualities, in addition it was determined that the measurement of the remaining parameters found for RQR3 they are within the limits proposed in the standard. These results are a fundamental contribution to the subsequent establishment of reference patterns at the level of radiodiagnostic, mammography and computed tomography that currently do not exist in the country.

**Keywords:** Radiation quality, radiodiagnostic, inherent filtration.

## Introducción

En la actualidad la gran mayoría de laboratorios de metrología de las radiaciones ionizantes en el mundo trabajan en establecer una coherencia metrología entre los haces de radiación de los tubos de rayos x utilizados para calibración a través de la adopción de radiaciones de referencia establecida por normas internacionales, tal como la *International Electrotechnical Commission* - IEC para el área de radiodiagnóstico [1], la *International Organization Standardization* - ISO para protección radiológica [2]. Esto hace que un equipo pueda ser calibrado en diferentes laboratorios.

La creciente utilización de los métodos de radiodiagnóstico en Colombia, exige un adecuado control metrológico de los sistemas dosimétricos utilizado en esta práctica, por tal razón es de gran importancia el establecimiento de patrones de referencia que puedan brindar una trazabilidad en las medidas dosimétricas en radiodiagnóstico.

Las radiaciones de referencia recomendadas por el IEC se caracterizan por un código de letras y números que definen por ejemplo el material utilizado para la filtración del haz primario de radiación, la tensión de utilización del tubo de rayos x, algunas de las radiaciones de referencia son conocidas como calidades primarias y en gran medida son libres de radiación dispersa (RQR, RQA, RQC, RQT, RQR-M). Para simulación de pacientes existen las radiaciones de referencia con una influencia de la radiación dispersa (RQN, RQB, RQN-M y RQB-M). [3]

Las radiaciones de referencia definidas como RQR representan un haz de radiación después de sufrir atenuación por la adición de filtros de aluminio de espesores calculados.

Implementar una radiación significa reproducir los parámetros obtenidos en los laboratorios primarios respetando los límites de tolerancia.

Para cada radiación de referencia existen algunos requisitos que deben ser aplicados para que sea considerada implementada, los límites de tolerancia para la  $1^{\circ}$ HVL son de  $\pm 3\%$  y para los coeficientes de homogeneidad son de  $\pm 0.03$  adimensional. El material del ánodo debe ser tungsteno [4].

## 1. Capa hemireductora (HVL) y coeficiente de homogeneidad

La primera capa hemireductora  $1^{\circ}\text{HVL}$  es definida como el espesor de un material específico que atenúa la intensidad del haz de radiación a la mitad del valor inicial y la  $2^{\circ}\text{HVL}$  atenúa el haz a un cuarto de intensidad [5]. La razón entre  $1^{\circ}\text{HVL}$  y  $2^{\circ}\text{HVL}$  se conoce como el coeficiente de homogeneidad. Este coeficiente expresa la característica de composición de energías del haz en espectrometría, pues cuanto más se acerca a 1 (uno) su valor, significa que más homogéneo en términos de energía se presenta este haz [6].

Por lo tanto, para caracterizar una distribución espectral por medio de la tensión del equipo de rayos x, se debe calcular la  $1^{\circ}\text{HVL}$  y la  $2^{\circ}\text{HVL}$ , a fin de evitar cualquier ambigüedad entre haces distintos de radiación, pues dos tubos con la misma tensión y  $1^{\circ}\text{HVL}$  pueden presentar distribuciones de espectros de energía completamente diferentes, debido a diferencias existentes en el desgaste entre ellos en términos de la angulación efectiva del ánodo, filtración inherente y demás.

## 2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del establecimiento de la calidad RQR3 se utilizaron los equipos existentes en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica de la Dirección Técnica de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano:

### 2.1. Equipo de Rayos x

Fue utilizado el equipo marca Balteau NDT modelo XSDBip-LS1, con un tubo modelo TSD 320 serie 84089.

#### 2.1.1. Sistema de Referencia

El sistema de referencia utilizado, está compuesto por una cámara de ionización de placas paralelas con un volumen de  $75\text{ cm}^3$ , marca PTW, modelo 39060, acoplada a un electrómetro marca PTW, modelo Unidos E. Esta cámara de ionización fue calibrada en el Laboratorio del Organismo Internacional de la Energía Atómica. La figura 1 muestra la cámara de ionización.



FIGURA 1. Cámara de ionización plano paralela utilizada para la implementación de la calidad RQR3.

### 2.1.2. Cámara monitora

Para verificar la variación del haz de radiación, fue utilizada una cámara de ionización monitora marca PTW tipo 34014, esta fue conectada a un electrómetro marca PTW Unidos Wedline, como se muestra en la figura 2.

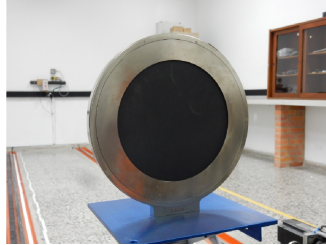


FIGURA 2. Cámara monitora tipo 34014 utilizada para monitorear el campo a la salida del tubo.

### 2.1.3. Filtros de Aluminio

Para caracterizar las calidades de radiación de referencia, en específico la capa hemireductora fueron utilizados filtros de aluminio de alta pureza como los mostrados en la figura 3.

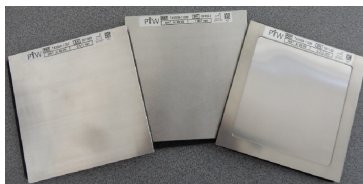


FIGURA 3. Filtro de aluminio de alta pureza de 99.9%.

## 2.2. Metodología

Para el establecimiento de la calidad de radiación en radiodiagnóstico RQR3 se siguieron las recomendaciones de la norma IEC 61267[1].

### 2.2.1. Filtración inherente

La filtración inherente del tubo de rayos X se obtiene determinando la primera capa hemirreductora ( $1^\circ\text{HVL}$ ) del haz de fotones. El método seguido para la determinación de la filtración inherente es el descrito por la norma ISO 4037-1 [2].

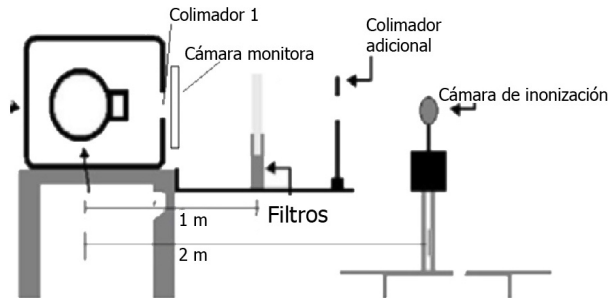


FIGURA 4. Arreglo experimental para el cálculo de la filtración adicional.

En la figura 4 se muestra el arreglo experimental para la determinación de la filtración inherente, donde la cámara de ionización se ubicó a 2 metros del foco del tubo de rayos x, se utilizaron dos colimadores para limitar las dimensiones del haz de radiación sobre el detector, con el fin de ser irradiado uniformemente. El segundo colimador fue colocado a una distancia mayor a 1 m del foco del tubo, a la salida del tubo se colocó la cámara monitora y antes del segundo colimador se colocaron laminas atenuadoras de aluminio a 1 m, la corriente del filamento del tubo se colocó a 5 mA, se utilizó tipo de foco grueso en el tubo. Se registraron 10 valores de carga con una exposición de 40 segundos sin ningún tipo de filtración, después se detuvo la irradiación y fueron adicionadas láminas de aluminio de diferente espesor. Para cada adición de aluminio fueron realizadas 10 mediciones de valores de carga.

### 2.2.2. Determinación de la curva de atenuación

Para cada calidad de radiación, es necesario obtener una curva de atenuación, utilizando laminas atenuadoras de aluminio, de diferentes espesores, con un mínimo de pureza del 99.9% y su espesor debe ser conocido con una incertidumbre máxima de  $\pm 0.01\text{mm}$  las dimensiones deben ser suficientes para interceptar la totalidad del haz de fotones. Estas láminas deben ser colocadas equidistantes del foco del tubo de rayos x y el detector. La determinación de la curva de atenuación es representada en la figura 5 y de esta curva podemos determinar los parámetros  $1^\circ\text{HVL}$ , el cociente  $y(1^\circ\text{HVL})/y(0)$  y el coeficiente de homogeneidad.

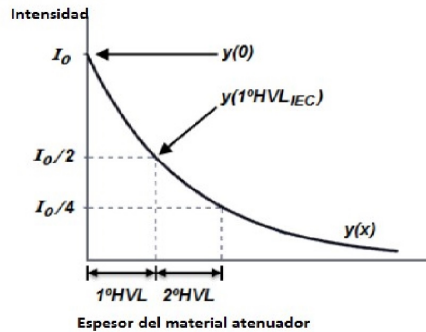


FIGURA 5. Representación gráfica de los parámetros de caracterización de calidades de radiación.

Antes de tomar los datos para realizar la curva de atenuación se realizaron pruebas de fugas al conjunto cámara de ionización electrómetro y también se realizaron pruebas de retrodispersión de los soportes de filtros. Después de corroborar que no se apreciaron corrientes de fuga y el aporte de retrodispersión de los soportes no era significativo se empezó con la toma de datos para hallar la filtración adicional.

### 2.2.3. Filtración adicional

Para la determinación de la filtración adicional se siguió el procedimiento descrito en la (TRS) No. 457 [7]. La cámara se colocó a 2 metros del foco del tubo, la filtración auxiliar se colocó a 1 m seguida de un segundo colimador de 58 mm de diámetro.

Se irradió primero sin ningún filtro y se tomaron valores de presión, temperatura y humedad, para monitorear las condiciones ambientales y verificar que estén dentro de los rangos de operación de la cámara, no se realiza corrección por presión y temperatura que usualmente se realizan en las mediciones de magnitudes como el kerma en aire pues se tomarán valores normalizados de intensidad. También se tomó el dato de carga que arrojaba el electrómetro, luego se detuvo la irradiación y se fueron añadiendo filtros auxiliares, tomando la misma cantidad de datos que para el montaje sin filtros.

Luego para hallar la filtración adicional se elaboró una plantilla rectangular, transparente, cuya altura y anchura, están dadas por un factor de cuatro y por la primera HVL de la calidad de radiación RQR3 multiplicada por  $(1 + 1 / h)$ , respectivamente, donde  $h$  es el coeficiente de homogeneidad de la calidad de radiación estándar.

Se realizó una línea horizontal auxiliar en la plantilla, dividiéndola en dos partes de igual tamaño y otra línea vertical a una distancia del borde izquierdo de la plantilla correspondiente a la 1°HVL.

Se ubicó esta plantilla en la curva de atenuación de tal manera que los bordes de la plantilla sean paralelos a los ejes del diagrama y que la parte superior izquierda y el punto de intersección de las dos líneas auxiliares coincidan con puntos de la curva de atenuación ver figura 9. La diferencia entre la posición del borde izquierdo de la plantilla y la ordenada da la cantidad de filtración adicional requerida para establecer la calidad de radiación RQR3.

#### 2.2.4. Caracterización de calidad RQR3

La caracterización se centrará en la calidad de radiación de diagnóstico:

RQR3 (*Radiation Qualities in Radiation Beams emerging from the X-ray Source Assembly*) utilizada en diagnóstico convencional para haces de radiación emergentes de tubos de rayos x.

Las calidades de radiación patrón RQR son descritas por un conjunto de parámetros como lo son potencial del tubo, 1°HVL y



el coeficiente de homogeneidad, en específico para la calidad RQR3 estos valores son:

Calidades de radiación	Potencial del tubo (kV)	1°HVL (mm de Al)	Coefficiente de homogeneidad
RQR3	50	1.78	0.76

TABLA 1. *Parámetros para la caracterización de la calidad RQR3 según la norma (IEC61267).*

Para caracterizar la calidad RQR3, se siguió la metodología siguiente:

- Se ajustó el potencial del tubo a 50 kV y una corriente de 5 mA en el filamento y un tiempo de integración de 40 segundos.
- La cámara se colocó a una distancia de 2 metros del foco del tubo, se colocó la filtración adicional que se determinó en el apartado 2.2.3, a la salida del primer colimador, se colocó filtración auxiliar a 1m seguida de un segundo colimador de 58 mm de diámetro cuyo propósito es limitar el diámetro del haz de fotones, para que el volumen sensible de la cámara quedara totalmente irradiado como se muestra en la figura 6.

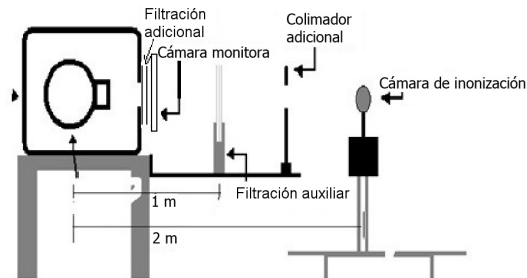


FIGURA 6. *Montaje para la implementación de la calidad RQR3.*

- Se determinó la curva de atenuación según el procedimiento descrito en 2.2.3 y se obtuvo la 1°HVL.
- Se verificó que la relación  $y(1^\circ\text{HVLIEC}) / y(0)$  para la calidad de RQR3 estuviese dentro del intervalo  $[0,485; 0,515]$ . Si esta relación es inferior al valor mínimo, la filtración adicional se debe aumentar, y viceversa, siendo necesario obtener una nueva curva de atenuación.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Determinación filtración inherente

##### 3.1.1. Curva de atenuación para la primera capa hemirreductora

Los datos obtenidos después de realizar la metodología expuesta en 2.2.1 fueron graficados en la figura 6, donde en el eje vertical se muestran los valores normalizados de la carga y se toman como proporcionales a la intensidad de la radiación sobre el detector, en el eje horizontal se tomaron los valores de espesor de las láminas de aluminio.

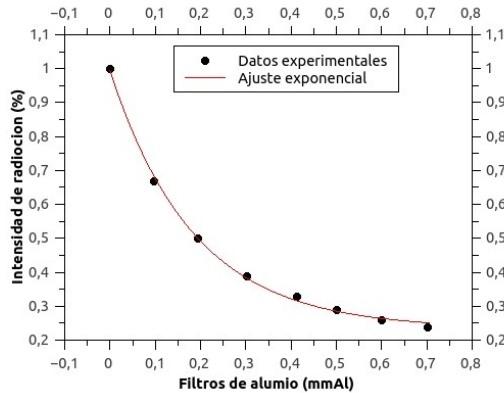


FIGURA 7. Curva de atenuación y ajuste exponencial para el cálculo de la primera capa hemirreductora.

Después de obtener esta curva se realizó un ajuste por decaimiento exponencial por el algoritmo Levenberg-Marquardt (línea continua en la figura 7) por medio del software libre Qtiplot cuyo coeficiente de correlación fue de  $R^2=0,99$ , mediante este ajuste se encontró la ecuación de la curva y se obtuvo el mejor valor aproximado para la primera capa hemireductora.

$$y = A_1 e^{-\frac{x}{t_1}} + y_0 \rightarrow x = -t_1 \ln \left( \frac{y - y_0}{A_1} \right) \quad (1)$$

Donde  $x$  es  $1^\circ\text{HVL}$ ,  $y$  valor de intensidad normalizada,  $t_1$ ,  $A_1$  parámetros el ajuste. Al despejar este valor se encuentra que:

$$1^\circ\text{HVL} = (0.194 \pm 0.012)\text{mmAl} \quad (2)$$

### 3.1.2. Cálculo filtración inherente

Después de obtener el valor de la 1°HVL, para el cálculo de la filtración inherente del tubo de rayos x se toma como referente la tabla de la norma ISO 4037 [2] que relaciona valores de 1°HVL con valores de filtración inherente, dado que el valor de la 1°HVL calculado no se encuentra directamente en esta tabla se realizó una gráfica de valores de filtración inherente en función de 1°HVL como se muestra en la figura 8, con el fin de interpolar para hallar el valor relacionado con nuestro valor calculado de 1°HVL.

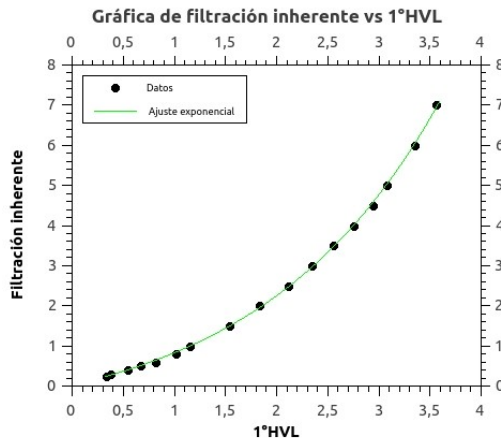


FIGURA 8. Gráfica de los valores de la tabla de la norma ISO 4037 para filtración inherente.

Con lo cual se obtuvo que la filtración inherente del equipo balteu del laboratorio secundario es del valor de:

$$FI = (0.45 \pm 0.011)\text{mm Al} \tag{3}$$

### 3.2. Filtración adicional

Para ver el comportamiento de los datos se graficó Intensidad normalizada en escala logarítmica versus espesores de aluminio en escala lineal como muestra la figura 9, es de aclarar que solo se reescala los ejes de la curva de atenuación del gráfico intensidad normalizada vs espesores de aluminio, mas no se realizada ningún

ajuste lineal. Luego para hallar la filtración adicional se trazó un rectángulo siguiendo las especificaciones de TRS 457 [7].

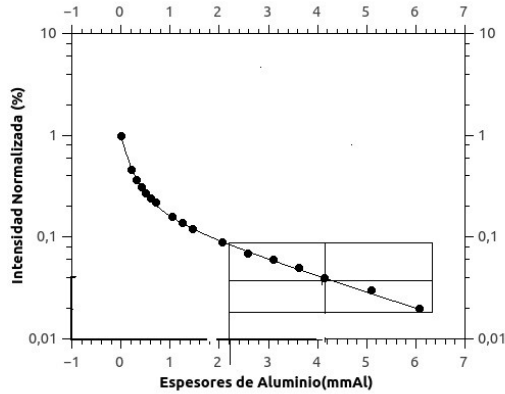


FIGURA 9. Gráfica de atenuación con rectángulo según especificaciones TRS 457.

De la gráfica se puede deducir que la filtración adicional a agregar es de 2,2 mmAl según la extrapolación del rectángulo.

### 3.3. Establecimiento calidad RQR3

Los datos tomados según la metodología descrita en 2.2.4 fueron graficados en la figura 10.

De la curva de atenuación figura 10 fueron obtenidos los resultados de la tabla 2.

Parametro	Valor
Voltaje Nominal (kV)	50
Filtración Adicionada (mm Al))	2,2
1°HVL de IEC (mmAl)	1,78
1°HVL Experimental (mmAl)	1,73
Coficiente de Homogeneidad Experimental	0,70

TABLA 2. Parámetros de implementación RQR3.

El valor de la 1°HVL obtenido presenta una diferencia de 1,41 % en relación a lo recomendado y el valor de homogeneidad presentó una

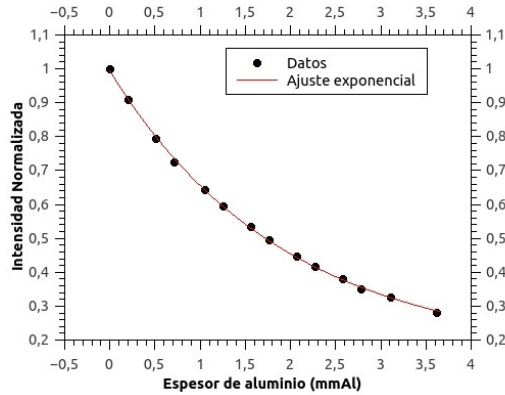


FIGURA 10. Curva de atenuación para RQR3 con filtración adicional de 2,2 mmAl.

diferencia de 0,03(3,70%) en comparación con el valor dado por la IEC tabla 1, por tanto, todos los parámetros se encuentran dentro de los límites exigidos por la norma IEC.

## Conclusiones

En este proyecto de implementación se ha aplicado una metodología para implementar las calidades recomendadas por la IEC 61267. El valor obtenido para la filtración inherente del equipo, nos permitió concluir que el tubo puede ser utilizado para el propósito de implementación de calidades en radiodiagnóstico. Fue implementada la calidad RQR3 con filtros de alta pureza encontrando valores de 1°HVL, coeficiente homogeneidad, dentro de los límites de la norma, lo cual nos permite concluir que quedó correctamente establecida.

## Referencias

- [1] “Medical diagnostic x-ray equipment – radiation conditions for use in the determination of characteristics – International Standard iec 61267,” (2005).

- 
- [2] “X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – part 1: Radiation characteristics and production methods,” (1996).
- [3] P. M. De Oliveira, *Análise de parâmetros característicos de feixes de raios-x diagnóstico para calibração de dosímetros.*, Tesis de maestría, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil (2008).
- [4] P. I. Baptista and J. de Medeiros Limede, *Caracterização das Qualidades de Radiação X de Diagnóstico, segundo a Norma Internacional IEC 61267*, Tesis de maestría, Universidad Nova de Lisboa, Portugal (2010).
- [5] M. A. S. Lacerda, *Análise Crítica da Medida da Camada Semi-redutora em Radiologia Diagnóstica*, Tesis de maestría, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil (2002).
- [6] S. J. Goetsch, J. Kamande, and F. H. Attix, *Med. Phys.* **12**, 249 (1985).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Dosimetry in diagnostic radiology: An international code of practice,” (2007).