

Cálculo de Espectros De Rayos-x de un Tomógrafo

Calculation of X-Ray Spectres of a Tomograph

Basilia Quispe Huillcara¹; José Domingo Peña Vidal¹; Georgina Concepción Waldo Benítez¹; Manuel Iván León Madrid¹; Pablo Víctor Cerón Ramírez¹; Miguel Ángel Vallejo Hernández¹; Modesto Antonio Sosa Aquino¹ & Héctor René Vega Carrillo²

QUISPE, H. B.; PEÑA, V. J. D.; WALDO, B. G. C.; LEÓN, M. M. I.; CERÓN, R. P. V.; VALLEJOS, H. M. A.; SOSA, A. M. A. & VEGA, C. H. R. Cálculo de espectros de rayos-X de un tomógrafo. *J. health med. sci.*, 4(2):109-114, 2018.

RESUMEN: La Tomografía Computarizada es un método de diagnóstico por imágenes, basada en la atenuación de los rayos X. El conocimiento del espectro de energía producido por un tubo de rayos X es importante, ya que afecta la dosis recibida por el paciente y el rendimiento de la imagen. Por esta razón, en este trabajo mediante métodos Monte Carlo se estimaron los espectros de los rayos X, producidos durante la interacción de electrones monoenergéticos con blancos de Tungsteno, Molibdeno y Rodio, con la finalidad de determinar sus características energéticas y la dosis ambiental a 50 cm del punto focal. Los cálculos se realizaron con el código MCNP5 (X-5 Monte Carlo Team, 20013) con el propósito de reproducir el espectro de rayos X de un tomógrafo Siemens Somatom Emotion 6 del Hospital General Regional de León México, que trabaja a 130 kVp y un intervalo de 20 a 90 mA. Los espectros calculados presentan la contribución continua y discreta que es característica del tipo de blanco.

PALABRAS CLAVE: espectros de rayos-X, Monte Carlo, tomógrafo.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la interacción de los fotones con la materia es importante en varios campos de la Física tales como Física de Altas Energías, Física Nuclear, Física de Radiaciones, pero especialmente en la Física Médica. En este último caso y en particular en Radiodiagnóstico es fundamental conocer la cantidad de energía depositada en el medio (tejido humano) (Azorín, 2009).

La imagenología es actualmente un área importante de la Medicina debido a la diseminación de las nuevas tecnologías, de entre las cuales se destaca la Tomografía Computarizada (TC). En los últimos años se verificó un aumento acentuado en el número de estos exámenes médicos (Simões, 2013). Aproximadamente en una radiografía de tórax el paciente recibe una dosis de 0,02 mSv, que es equivalente a 2,4 días de radiación de fondo natural, mientras que en una exploración por TC se recibe una dosis de 10 mSv, lo que equivale a la dosis que se recibe en 3,3 años por la radiación de fondo o a la dosis que se recibe en 500 radiografías de tórax (Baeza *et al.*, 2003). El co-

nocimiento del espectro de energía producido por un tubo de rayos X es importante, ya que afecta la dosis recibida por el paciente y el rendimiento de la imagen. De modo que, la preparación de los físicos en el área de simulación y métodos experimentales en lo referente a partículas y radiación constituye un punto de partida para el mejoramiento de la calidad de estos servicios médicos (Correira, 2011).

Si consideramos un haz de fotones interaccionando, con la materia el número de procesos es elevado lo cual hace imposible predecir los resultados de tales interacciones. Esto conduce a la necesidad de realizar simulaciones numéricas del proceso de interacción. La forma más precisa de realizar estas simulaciones es utilizar los métodos Monte Carlo que permiten resolver problemas matemáticos mediante la simulación de variables aleatorias. Los métodos Monte Carlo se utilizan ampliamente para calcular el transporte de radiación en la materia, también se utilizan para determinar el Kerma (K), dosis absorbida (D), la dosis equivalente personal (Hp), la dosis efectiva

¹División de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Guanajuato, Campus León, Guanajuato, México.

²Unidad Académica de Estudios Nucleares de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México.

(E) y la dosis equivalente ambiental $H^*(10)$, depositadas por fuentes internas y externas de radiación (Vega-Carrillo, 2017).

El método Monte Carlo se considera un método experimental más que un método numérico ya que se realiza un modelo sobre el cuál se transportan las partículas tal y como ocurre en la naturaleza. El transporte se hace utilizando funciones de distribución que describen los diferentes procesos involucrados en el transporte de partículas. Estas funciones de distribución son muestreadas al azar utilizando números aleatorios. Después de simular el transporte de un número grande de partículas, en el Monte Carlo se obtienen valores promedio de los procesos (Vega-Carrillo).

Hayati *et al.*, (2016) realizaron el modelamiento con el código Monte Carlo MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended) del espectro de rayos X de un TC Somatom Spirit (Siemens) con ánodo de tungsteno con 80, 100 y 140 kVp entre cátodo y ánodo.

Uno de los códigos ampliamente utilizados para obtener los espectros de rayos X es el Monte Carlo N-Particle Transport (MCNP). El objetivo de este trabajo fue estimar los espectros de rayos X con este código para electrones monoenergéticos de 130 keV que impactan con blancos de Tungsteno, Molibdeno y Rodio, con el fin de determinar sus características energéticas a 50 cm.

MATERIAL Y METODO

En el presente estudio se consideró el tomógrafo Siemens Somatom Emotion 6, donde se usó 130 kVp entre los electrodos del tubo y un intervalo de 20 a 90 mAs, para exámenes de TC de tórax. Este tomógrafo pertenece al área de imagenología del Hospital General Regional de León México (Fig. 1).

Se construyó el modelo del tubo de rayos X del tomógrafo con el código MCNP5 mediante un archivo de entrada definiendo las celdas, superficies y los diferentes materiales que las conforman. Los tipos de partículas con la que llevó acabo la simulación en MCNP5 fueron MODE E P (electrones y fotones). El tubo de rayos X se modeló mediante un cilindro que contiene la fuente de electrones (en el cátodo), el blanco y el soporte de éste (ánodo).



Fig. 1. Tomógrafo Somatom Emoción 6 de Siemens.

Para definir el término fuente de electrones se utilizó un disco que emite unidireccionalmente los electrones.

Tarjetas para definir la fuente monodireccional de electrones que se emiten en dirección +Y en el código MCNP5.

```
sdef pos = 0 0 0 axs = 0 1 0 rad = d1 par = 3 erg = 0,13  
vec = 0 1 0 dir = 1  
si1 0 0,07  
sp1 -21 0
```

Para definir el término fuente se usó la tarjeta SDEF que incluye las coordenadas (POS), el eje de la dirección de emisión de los electrones (AXS), el tipo de partícula (PAR), que en este caso es 3 (electrones), la energía de los electrones (ERG) de 130 keV, la dirección de emisión de los electrones (VEC) y la emisión unidireccional (DIR) (X-5 Monte Carlo, 2003). Debido a que la fuente es un disco de 0,07 cm de radio se incluyeron otras dos tarjetas SI1 y SP2 para indicar rango y ponderación del muestreo radial (Shultis & Faw, 2008). La distancia entre la fuente de electrones y el blanco fue de 10 cm.

El ánodo del tubo fue considerado a estar constituido de W, Mo y Rh. Su geometría fue un plano de espesor de 2 mm que se ubicó sobre una pieza de Cu para disipar el calor generado en la producción de rayos X, y un ángulo ánodo de 17°, fueron simulados con el código MCNP5. En lugar de considerar el filtro inherente y adicional en este estudio se colocó un filtro de 3 mm Al a la salida del haz como se muestra en la Fig. 2, donde se aprecia las diferentes celdas del 1 al 5 que representan los elementos ya descritos.

Para medir el espectro de rayos X fue simulado un detector de 3 cm de radio a 50 cm del punto focal

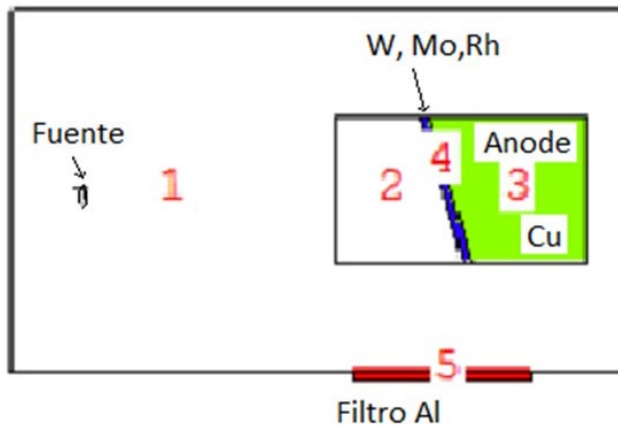


Fig. 2. Geometría del tubo de rayos X usando el código MCNP5 simulado, que muestra las celdas del 1 al 5 con los diferentes materiales; con filtro de 3 mm Al de espesor y ángulo del ánodo de 17° de W, Mo y Rh.

lleno de aire. El recinto o barrera del problema fue un cono truncado que envuelve el tubo de rayos X llena de aire atmosférico y el detector (Fig. 3), la cual muestra una representación 3D generada por el VisedX_24E editor visual de MCNP.

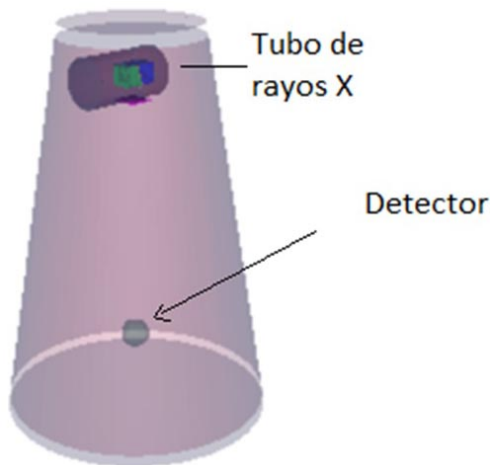


Fig. 3. Representación de la geometría de la simulación para calcular el espectro de rayos X.

Se calculó el espectro de rayos X con el tally F5 del código MCNP5. Este tally cuenta la fluencia de fotones en un detector puntual para cada energía, contando el número de fotones que cruzan el detector en términos de fotones / cm² (X-5 Monte Carlo Team). Se realizó la medición en el detector de 3 cm de radio a una distancia de 50 cm del punto focal, considerando la geometría descrita en la Figura 3.

Tarjeta para definir la salida con tally F5 del espectro de rayos X.

```
f5:p 0 10 -50 3 $ Detector puntual
e5 1e-3 200i 0.14
```

Así mismo, para determinar la dosis ambiental equivalente H*(d), cantidad usada en protección radiológica para radiación externa, se usó el valor recomendado de d = 10 mm para radiación penetrante como los rayos X, se calculó a 50 cm del punto focal con un detector de 3 cm de radio usando el tally F5. Los coeficientes de conversión para dosis equivalente ambiental H*(10) de fluencia de fotones se usaron según el ICRP 74 (ICRP, 1996), como se muestra a continuación.

Tarjetas para calcular la dosis equivalente ambiental H*(10) a 50 cm del punto focal.

```
C Dosis ambiental equivalente H*(10) [pSv-s-1/Q] a 50 cm
f105:p 0 10 -50 3.0 $ H*(10) a 50 cm de la fuente
```

```
DE105 log 0.010 0.015 0.020 0.030 0.040 0.050 0.060
0.080. 0.100 0.150 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.800
1.000 1.500 2.000 3.000 4.000 5.000 6.000 8.000 10.00
```

```
DF105 log 0.061 0.830 1.050 0.810 0.640 0.550 0.510
0.530. 0.610 0.890 1.200 1.800 2.380 2.930 3.440 4.380
5.200 6.900 8.600 11.10 13.40 15.50 17.60 21.60 25.60
```

Las tarjetas de función de dosis y energía son consideradas del código MCNP5, siendo "DE", el cual define la red de energía para fluencia a factores de dosis, y "DF", que es la fluencia a factores de conversión de dosis, para lo cual se consideró la interpolación logarítmica (X-5 Monte Carlo Team).

El software SpekCalc fue usado para calcular el espectro de rayos X (teórico). El espectro fue obtenido para blanco de tungsteno, con un voltaje 130 kVp en el tubo, ángulo blanco de 17°, filtros de 3 mm Al y 50 cm de aire como muestra la Fig. 4.

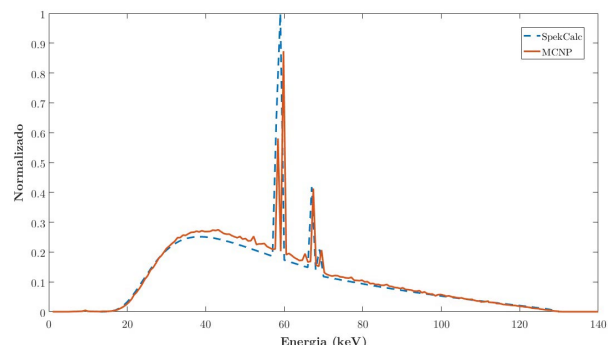


Fig. 4. Espectro teórico y simulado para 130 keV.

RESULTADOS

En la Fig. 5 se muestran los resultados del espectro de rayos-X, con blancos de W, Mo y Rh, calculados con MCNP5 para energía de electrones de 130 keV, los cuales presentaron un error relativo R menor al 0,2 % para 3×10^8 historias. Se observa que en todos los casos se presenta el espectro continuo o Bremsstrahlung así como los espectros discretos de los rayos X característicos $K\alpha$ y $K\beta$.

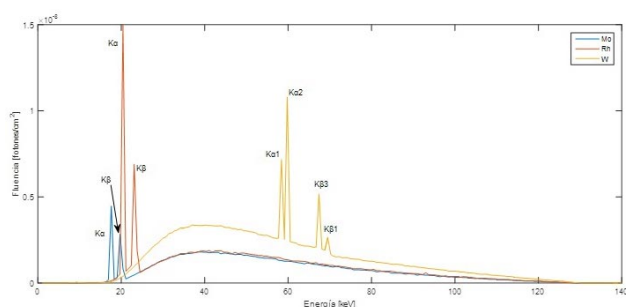


Fig. 5. Espectro de los rayos X producidos durante la interacción entre electrones de 130 keV con blancos de W, Rh y Mo.

En la Tabla I, se muestran los valores de los diferentes picos de la radiación característica para los tres blancos considerados, los cuales se compararon con valores teóricos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, 2018).

El espectro obtenido por MCNP5 para el blanco de tungsteno se comparó con el correspondiente espectro teórico obtenido por el software SpekCalc. En la Fig. 4 se muestra la comparación entre el espectro teórico y el simulado a 130 keV. Se observó que el espectro simulado utilizando MCNP5 se ajusta al espectro de SpekCalc aunque existan pequeñas diferencias visibles, estas diferencias produjeron un valor de RMS de 0,044.

El cálculo de $H^*(10)$ obtenidos a través de la simulación MCNP5 para un detector puntual a 50 cm del punto focal, para los diferentes blancos Mo, Rh y W como se muestra en la Tabla II. Para $H^*(10)'$, se consideró las corrientes de 20 a 90 mA que emplea el Hospital General de León en un examen de TC de tórax. El error relativo que se obtuvo al calcular $H^*(10)$ fue menor a 0,05, el cual según las directrices para la interpretación del error relativo R, es confiable para un detector puntual en MCNP5 (X-5 Monte Carlo).

Tabla I. Las energías de las transiciones que produce la radiación característica del espectro Rayos X.

Blanco	Transición	NIST (keV)	MCNP5 (keV)	% Desvío
W	KL ₂ ($K\alpha_2$)	57,982	58,398	0,72
	KL ₃ ($K\alpha_1$)	59,319	59,781	0,78
	KM2 ($K\beta_3$)	66,952	67,388	0,65
	KM3 ($K\beta_1$)	67,245	69,463	3,30
Rh	$K\alpha$	20,145	20,363	1,08
	$K\beta$	22,712	23,129	1,83
Mo	$K\alpha$	17,427	17,597	0,98
	$K\beta$	19,598	19,672	0,38

Tabla II. Dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ obtenido por MCNP5 y $H^*(10)'$ para los límites de corriente en un examen de TC de tórax.

Material del blanco	$H^*(10)$ pSv/e	R	$H^*(10)'$ mSv/s
Mo	8,8613E-080	0,0016	0,111 - 0,498
Rh	1,0979E-07	0,0015	0,137 - 0,617
W	1,6225E-07	0,0022	0,203 - 0,912

DISCUSION

Los resultados obtenidos mediante métodos Monte Carlo con el código MCNP5, de los espectros de los rayos X generados durante la interacción de electrones monoenergéticos de 130 keV, utilizado por el tomógrafo Siemens Somatom Emotion 6 del Hospital General Regional de León, México, para el blanco de Tungsteno que fueron validados con SpekCalc. Las pequeñas diferencias produjeron un valor de RMS de 0,044.

Estos resultados son consistentes con los estudios previos; Hayati *et al.*, utilizó un equipo de TC para una diferencia de potencial de 80, 100 y 140 kVp y a una distancia de 100 cm, en el cual se colocó un detector de 36,5 cm de radio para estimar el espectro de rayos X. Los espectros también fueron comparados con el software SpekCalc para ser validados. Los resultados mostraron pequeñas discrepancias en la intensidad de los picos de radiación característica entre los dos métodos. Por su parte, Mohammadi *et al.*, (2016) simuló un equipo de TC con diferencia de potencial entre ánodo y cátodo de 120 y 80 kVp y 10⁹ historias; el espectro obtenido fue comparado con el Software Ipem78 (Procesador de espectros del Instituto de Física e Ingeniería en Medicina Report 78) donde ellos consideraron las características del tubo de rayos X utilizados en la simulación. Observaron que ambos espectros eran semejantes, por lo que indicaron que la fuente de rayos X fue diseñada correctamente. Cabe señalar que, en los tres trabajos realizados, el espectro de rayos X presentaba la parte continua o Bremsstrahlung y la radiación característica.

En este trabajo también se encontró los espectros para blancos de Molibdeno y Rodio, para equipos de rayos X donde el blanco del tubo de rayos X sea Molibdeno o Rodio como podemos mencionar para el Mamógrafo. Estos espectros no fueron validados por el software SpekCalc debido que éste permite solamente obtener espectros para blancos de Tungsteno.

Los rayos X característicos de los tres blancos estimados resultaron ser similares a los valores teóricos del NIST con desvíos < 5%.

Al comparar la producción de rayos X del modelo en MCNP5 con el software SpekCalc, no se encontraron diferencias significativas, por lo que se consideró pertinente estimar H*(10) con los diferentes blancos con error relativo menor al 5 %, el cual es confiable para el detector puntual utilizado en la medición (X-5 Monte Carlo Team).

QUISPE, H. B.; PEÑA, V. J. D.; WALDO, B. G. C.; LEÓN, M. M. I.; CERÓN, R. P. V.; VALLEJOS, H. M. A.; SOSA, A. M. A. & VEGA, C. H. R. Calculation of x-ray spectres of a tomograph. *J. health med. sci.*, 4(2):109-114, 2018.

ABSTRACT: Computed Tomography is a diagnosis method based on X-ray attenuation. The knowledge of the energy spectrum produced by an X-ray tube is important because it affects the dose received by the patient and the performance of image. For this reason in this work by means of Monte Carlo methods were estimated the spectra of the X-rays produced during the interaction of monoenergetic electrons with the targets of Tungsten, Rhodium and Molybdenum, in order to determine their energy characteristics and the environmental dose at 50 cm from the focal point. The calculations were done using a MCNP5 code with the purpose of reproducing the X-ray spectrum of a Siemens Somatom Emotion 6 tomograph used at León's General Hospital in Mexico, which operates at 130 kVp and a mA from 20 to 90. The calculated spectra present the continuous and discrete contributions that are characteristics of the target type.

KEYWORDS: X-ray spectrum, Monte Carlo, tomograph.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azorín, C. *Simulaciones de la interacción de fotones en la materia usando el Método Monte Carlo*. Tesis del Centro de Investigación en Ciencia Avanzada y Tecnología Aplicada-IPN, 2009.
- Baeza, M.; Calzado, A.; Morán, P.; Morán, L. M. & Rodríguez, R. Estimación de las dosis de tomografía computarizada en cinco centros para indicaciones frecuentes en cinco áreas anatómicas. *Rev. Fis. Med.*, 4:7-17, 2003.
- Correia, S. I. K. *Estudo por Monte Carlo de espectros de raios X de radiodiagnóstico para aplicações na Física Médica*. Tesis para a obtenção do título de Mestre em Física. Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus Bahia, Brasil, 2011.
- Hayati, H.; Mesbahi, A. & Nazarpour, M. Monte Carlo modeling of a conventional X-ray computed tomography scanner for gel dosimetry purposes. *Radiol. Phys. Technol.*, 9(1):37-43, 2016.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *Annals of the ICRP* 26 (3-4), 1996. Disponible en: <http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2074>.
- Mohammadi, F.; Riyahi, A. N.; Geraily, G & Paydar, R. Thorax organ dose estimation in computed tomography based on patient CT data using Monte Carlo simulation. *Int. J. Radiat. Res.*, 14(4):313-21, 2016.
- National Institute of Standards and Technology (NIST). X-ray transition energies database. 2018. Disponible en: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayTrans/Html/search.html>.
- Simões, S. J. I. *Simulações Monte Carlo da redução da dose no cristalino e na tireoide em exames de Tomografia Computarizada utilizando proteções de bismuto*. Tesis para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Biomédica. Universidad Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2013.

Vega-Carrillo, H. *Introducción al Método Monte Carlo y al código MCNP*. México: Universidad Autónoma de Zacatecas, 2017.
X-5 Monte Carlo Team. A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5., 2003. Disponible en: <https://www.nucleonica.com/wiki/images/8/89/mcnpvoli.pdf>.

Dirección para correspondencia:
Basilía Quispe Huilcara
División de Ciencias e Ingenierías
Universidad de Guanajuato
Campus León
Guanajuato
MÉXICO

E-mail: basiliagadi@gmail.com

Recibido : 23-11-2017
Aceptado: 09-01-2018