

OBTENCIÓN DEL ESPECTRO PRIMARIO DE RAYOS X CON PENELOPE Y MCNP5.

F. POZUELO, A.QUEROL, S.GALLARDO, J.RÓDENAS, G.VERDÚ

Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universitat Politècnica de València

Camí de Vera, s/n 46022 València – Spain

Tlf:96 3879631 Fax:96 3877639

faupona@etsii.upv.es; anquevi@upvnet.upv.es; sergalbe@iqn.upv.es; jrodenas@iqn.upv.es;
gverdu@iqn.upv.es

SINOPSIS:

En el Control de Calidad de los tubos de rayos X es muy importante conocer el espectro primario de rayos X, ya que permite conocer mejor, y por tanto, reducir la dosis impartida a los pacientes. Sin embargo, obtener el espectro primario para los controles rutinarios es muy complicado, por lo que en lugar de obtener el espectro se miden los parámetros de calidad del espectro. En este trabajo, se utilizan los programas PENELOPE y MCNP5, basados en el método Monte Carlo, para obtener el espectro de rayos X teniendo en cuenta las características del tubo de rayos X. Con el fin de conseguir un mayor ajuste del espectro simulado al teórico, se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros disponibles en ambos programas. Obtener el espectro simulado podría suponer una mejora en el control de calidad de los tubos de rayos X al incorporarlo como un método complementario a las técnicas utilizadas. Los espectros simulados se han comparado con sus respectivos teóricos, extraídos del catálogo IPEM-78, mediante el cálculo del error cuadrático mínimo y los parámetros de calidad del espectro. Del análisis de sensibilidad realizado con el programa PENELOPE se obtiene que una de las variables más importantes para conseguir un buen ajuste entre el espectro simulado y el teórico es el parámetro FORCE. Para estimar el efecto de los parámetros de simulación de PENELOPE en los espectros simulados se han obtenido las curvas de dosis en profundidad en una cuba de agua.

1- INTRODUCCIÓN

El control de calidad (QC) de los equipos de rayos X utilizados en los servicios médicos de radiodiagnóstico es muy importante para reducir, tanto como sea posible, la dosis impartida a los pacientes. El principal objetivo del QC es asegurar la óptima operación de dichos equipos, lo cual implícitamente significa estimar el espectro de energía.

En una unidad de radiodiagnóstico se requiere un espesor mínimo de filtrado inherente para reducir la dosis impartida a los pacientes [1] y la medida del filtrado total es una recomendación de la ISO [2]. Existen diversos métodos indirectos para determinar los parámetros de calidad [3, 4, 5], sin embargo, todos contienen incertidumbres dada la dificultad que supone conocer el espectro de rayos X con precisión. Los principales parámetros de calidad que se pueden obtener a partir del espectro son la primera y segunda capa de hemirreducción (HVL), el factor de homogeneidad y la energía media.

Los programas Monte Carlo, PENELOPE [6] y MCNP5 [7], permiten simular las características geométricas complejas de los tubos de rayos X y, por tanto, obtener el espectro de rayos X para ciertas condiciones de trabajo pudiendo calcular a partir del espectro simulado los parámetros de calidad.

En trabajos anteriores [8, 9] los autores han desarrollado un modelo de simulación utilizando el programa MCNP5 para simular el espectro de rayos X mediante un detector puntual (registro F5). Este registro representa una técnica de reducción de varianza porque utiliza un algoritmo de cálculo semideterminístico [7]. En el caso del programa PENELOPE, la

producción de rayos X está influenciada por la elección de ciertos parámetros de simulación, algunos de ellos relacionados con técnicas de reducción de varianza.

El objetivo principal de este trabajo es establecer el efecto de los parámetros de simulación en el espectro de rayos X y determinar su repercusión en la dosis impartida a los pacientes. Para ello, se ha realizado un modelo de un tubo de rayos X comercial utilizando el programa PENELOPE considerando diferentes condiciones de trabajo. Para todos los casos los resultados obtenidos con PENELOPE se han comparado con los de MCNP5 y con los espectros teóricos obtenidos del catálogo de espectros IPEM 78 [10]. Para tener una comparación cuantitativa entre los espectros se ha calculado el error cuadrático medio (RMS) y los parámetros de calidad para cada caso. Finalmente, para estimar el efecto de variar los parámetros de simulación de PENELOPE en los espectros simulados, se han obtenido las curvas de dosis en profundidad en una cuba de agua.

2- METODOLOGÍA

En este apartado se incluye una breve descripción del funcionamiento del programa PENELOPE y el modelo que se ha utilizado para realizar la simulación de rayos X con PENELOPE.

2.1- SIMULACIÓN DE RAYOS X CON PENELOPE

PENELOPE (PENetration and Energy Loss Of Positrons and Electrons) permite simular la interacción de diferentes partículas (electrones, fotones y positrones) con la materia.

PENELOPE permite reproducir el Bremsstrahlung y las líneas características (líneas K y L) que resultan de la interacción de los electrones con la materia [6] ya que entre los mecanismos de interacción se incluyen las colisiones elásticas e inelásticas de los electrones y positrones, la emisión Bremsstrahlung y la aniquilación de positrones. El uso de este programa en este ámbito está muy extendido.

Los rayos X se producen a través de la ionización producida por la interacción de los electrones con un blanco y la emisión Bremsstrahlung, lo cual ocurre con muy poca probabilidad. Además, se necesita simular una gran cantidad de electrones para que un fotón emerja y alguno de los fotones emergentes alcance el detector. Todas estas razones justifican el hecho de que la simulación directa de un espectro de rayos X sea muy ineficiente.

Con el fin de mejorar la simulación del transporte de electrones, PENELOPE permite seleccionar los valores de umbral apropiados y otros parámetros de simulación, así como, las técnicas de reducción de varianza más apropiadas.

Los parámetros de simulación que permiten controlar el algoritmo son:

- C1 determina el recorrido libre medio entre dos colisiones elásticas.
- C2 representa el valor máximo de la energía media perdida en un paso.
- W_{cc} es la energía de corte para las colisiones inelásticas "duras", (eV).
- W_{cr} es la energía de corte para la emisión Bremsstrahlung de las colisiones "blandas", (eV).

La técnica de reducción de varianza conocida como el método de los pesos o forzado de interacciones, consiste en aumentar artificialmente la probabilidad de interacción, en este caso ionización y emisión Bremsstrahlung, al mismo que tiempo que se asigna un peso estadístico apropiado a los fotones secundarios generados. Para aplicar esta técnica, el usuario debe especificar los factores FORCE (IBODY, KPAR, ICOL, WLOW, WHIGH) [6], donde:

- IBODY es el número de celdas geométricas consideradas en el modelo,
- KPAR indica el tipo de las partículas simuladas (electrones , fotones, positrones),
- ICOL determina el tipo de colisión,

- WLOW y WHIGH representan los límites del peso de las partículas donde se va a aplicar dicho método de reducción de varianza.

2.2- MODELO PARA LA PRODUCCIÓN DE RAYOS X

El procedimiento para simular la producción de los rayos X consiste en el seguimiento de un gran número de electrones que inciden sobre el blanco del ánodo de tungsteno hasta que son absorbidos o dispersados por él y obteniendo el Bremsstrahlung y los fotones característicos producidos. El tubo de rayos X modelado incluye un ánodo de tungsteno con un ángulo de 12° y un filtro de 4 mm de aluminio. En la Figura 1 se muestra la geometría del sistema modelado con el programa SABRINA [11].

La fuente de electrones se ha definido como una fuente puntual que emite electrones monoenergéticos dentro un ángulo sólido en el vacío. Los electrones impactan en un área circular de 1 mm de diámetro.

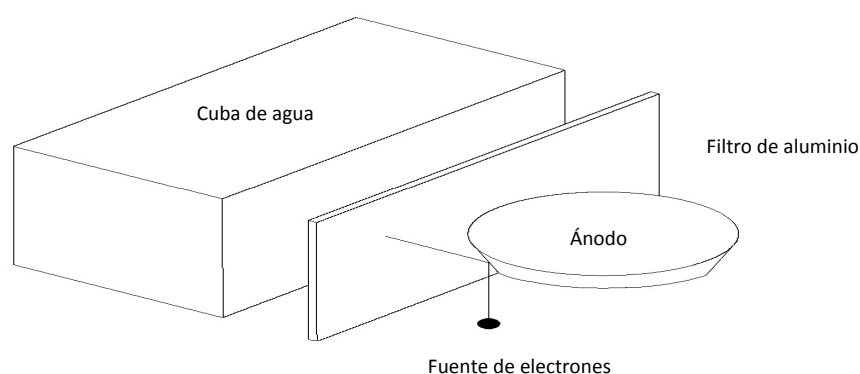


Figura 1: Geometría del modelo.

3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como caso base se ha escogido el espectro de 100 kVp con los valores de los parámetros de simulación de PENELOPE: $C1 = 0,2$; $C2 = 0,2$; $W_{CC} = 1000$ eV; $W_{CR} = 1000$ eV; $FORCE = -50$. La elección de estos valores se ha realizado en base a los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad realizado en el presente trabajo. En la Figura 2 se puede ver la comparación entre los espectros simulados, utilizando PENELOPE y MCNP5 y sus respectivas barras de error 3σ , y el espectro teórico obtenido del IPEM78.

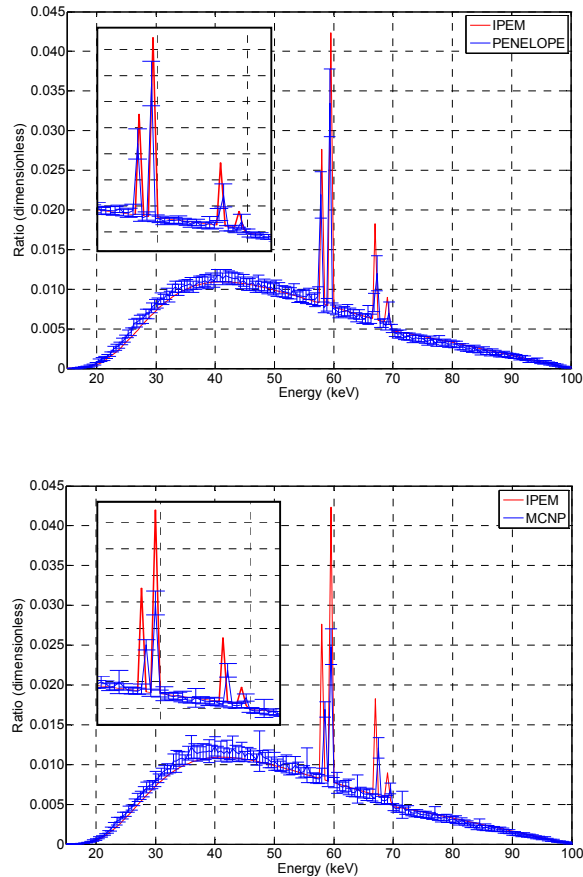


Figura 2: Espectro de 100 kVp teórico y simulado.

Como se puede observar, ambos espectros simulados se ajustan satisfactoriamente a la forma de la distribución teórica (IPEM78) en todo el intervalo de energía. Los espectros simulados reproducen de manera adecuada las líneas características de los rayos X ($K_{\alpha 1} = 59,318$ keV, $K_{\alpha 2} = 57,981$ keV, $K_{\beta 1} = 67,245$ keV, $K_{\beta 2} = 69,102$ keV y $K_{\beta 3} = 66,952$ keV) y el Bremsstrahlung continuo. Aunque ambas simulaciones predicen una menor altura de las líneas características en comparación con el espectro teórico del IPEM78, se observa que el programa PENELOPE mejora ligeramente la altura de dichas líneas con respecto al programa MCNP5. Entre 30 y 50 keV, ambos programas producen una ligera sobreestimación del Bremsstrahlung continuo, siendo menor en el caso del espectro simulado con PENELOPE.

Para el mismo número de historias simuladas, MCNP presenta mayor error relativo que PENELOPE con los parámetros anteriores.

Las líneas características L no están presentes en los espectros debido al filtro de aluminio que se ha añadido en el modelo.

El parámetro FORCE es uno de los más importantes en la simulación de rayos X utilizando PENELOPE. Para estudiar su efecto sobre el espectro simulado se ha realizado un análisis de sensibilidad variando dicho parámetro. La Figura 3 muestra el espectro obtenido para un parámetro FORCE=-10. Comparando dicha Figura 3 con la Figura 2a (FORCE =-50) se puede ver como el error mejora conforme aumenta el parámetro FORCE. Sin embargo, aumentar el parámetro FORCE implica una disminución de la velocidad de simulación ($5,36 \cdot 10^2$, $1,51 \cdot 10^3$ showers/s para FORCE igual a -50 y -10, respectivamente).

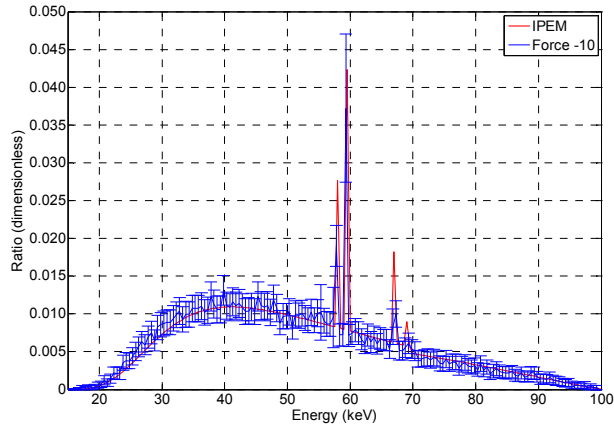


Figura 3: Espectro de 100 kVp teórico y simulado; FORCE = 10.

También se ha estudiado el efecto de variar los parámetros W_{CC} y W_{CR} . En este caso los resultados obtenidos muestran que su efecto es despreciable en el Bremsstrahlung continuo cuando el parámetro FORCE está activado puesto que las barras de error 3σ se solapan. Sin embargo, dichos parámetros sí que repercuten en el tiempo de simulación ya que con valores altos se consigue menor tiempo de computación.

La desviación del espectro simulado con respecto al teórico se ha obtenido mediante el cálculo del error cuadrático medio, RMS, que aparece en la Tabla I para los diferentes valores del parámetro FORCE estudiados. Como se puede ver, al aumentar el parámetro FORCE disminuye el RMS lo que supone un mejor espectro simulado.

Los parámetros de calidad también se han obtenido para los espectros simulados y teóricos. La primera capa de hemirreducción (HVL) de un tubo de rayos X se define como el espesor de material absorbente, aluminio en este caso, necesario para reducir un 50% de su valor inicial el kerma en aire. La segunda capa es el espesor adicional de atenuador necesario para reducir el kerma en aire de la mitad a un cuarto de su valor inicial. El factor de homogeneidad se define como el cociente entre la primera y la segunda capa de hemirreducción. Los resultados se muestran en la Tabla I.

TABLA I
Error cuadrático medio (RMS) y parámetros de calidad del espectro.

Espectro	RMS (%)	Parámetros de calidad			
		1ª HVL (cm Al)	2ª HVL (cm Al)	Coef Homog.	Energía Media
IPEM		0.407	0.997	0.408	52.34
MCNP	4.42	0.389 (4.42)	0.964 (3.31)	0.404 (1.03)	50.94 (2.67)
PENELOPE FORCE -50	4.02	0.386 (5.34)	0.966 (3.11)	0.400 (2.14)	51.18 (2.22)
PENELOPE FORCE -30	4.41	0.386 (5.34)	0.964 (3.31)	0.400 (1.94)	51.17 (2.23)
PENELOPE FORCE -10	4.61	0.381 (6.62)	0.955 (4.21)	0.399 (2.30)	51.02 (2.52)

(Error relativo respecto del IPEM 78 entre paréntesis).

Las diferencias entre el espectro simulado y el obtenido del IPEM78 dan lugar a una diferencia relativa en la primera y segunda capa de hemirreducción inferior del 7%, siendo los valores inferiores conforme aumenta el valor del parámetro FORCE.

Con el fin de estimar el efecto de estas diferencias se han obtenido las curvas de dosis en profundidad en una cuba de agua de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. El transporte de fotones en aire y agua se ha calculado siguiendo los fotones y electrones individualmente a través de toda la geometría del modelo. Entre 1 y 100 kVp se ha realizado un estudio detallado de la física de fotones que incluye el efecto fotoeléctrico con emisión de fluorescencia y la dispersión coherente e incoherente.

Ambos programas, MCNP5 y PENELOPE, calculan la dosis por partícula emitida por la fuente. En MCNP5, el registro F4 (fluencia) se ha medido en la cuba de agua y convertido a dosis utilizando los factores de conversión obtenidos del National Institute of Standards and Technology (NIST) [12].

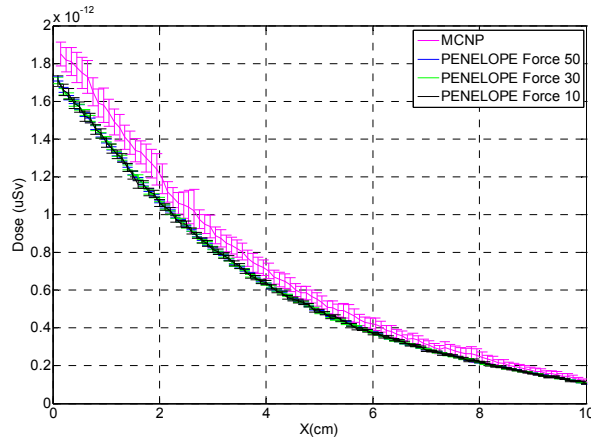


Figura 4: Curvas de dosis en profundidad obtenidas para los espectros simulados con MCNP5 y PENELOPE.

Las curvas de dosis en profundidad se muestran en la Figura 4 junto con sus respectivas barras de error 3σ . Se observa que la dosis y los errores son mayores para el espectro de MCNP5 que para los de PENELOPE, principalmente en la superficie de la cuba de agua. Esto puede deberse al método que utiliza PENELOPE para estimar los coeficientes másicos de absorción de energía [6]. Por otro lado, no hay importantes diferencias entre las curvas de dosis obtenidas con PENELOPE variando los valores del parámetro FORCE. A la vista de estos resultados se puede decir que para cálculos que conciernen a dosis se puede escoger un valor pequeño para dicho parámetro ya que se consigue un menor tiempo de computación.

Por lo tanto, se puede concluir que un valor apropiado de FORCE es un valor intermedio (FORCE = -30) ya que se obtiene un valor aceptable de RMS ($< 4,5 \%$), los errores relativos de los parámetros de calidad son inferiores al 5% y el tiempo de computación es relativamente menor. Además, se ha comprobado que con este valor de FORCE las curvas de dosis en profundidad y sus correspondientes barras de error 3σ son similares a las obtenidas con los otros valores de FORCE estudiados.

4- CONCLUSIONES

Los programas Monte Carlo, PENELOPE y MCNP5, se utilizan para obtener los espectros primarios de un tubo de rayos X. Los espectros simulados se comparan con los respectivos teóricos obtenidos del IPeM 78 obteniendo buenos resultados de simulación. Se ha realizado un análisis de sensibilidad para conocer la influencia de los parámetros de simulación más importantes del programa PENELOPE en los espectros simulados. En especial, el parámetro FORCE que es una técnica de reducción de varianza que supone un incremento del tiempo de computación. El valor de dicho parámetro debe ser optimizado para obtener un buen ajuste entre el espectro simulado y el teórico con un tiempo de computación aceptable. Con respecto al cálculo de los parámetros de calidad del espectro se tiene que a mayor valor

de FORCE menor es el error relativo pero esto supone un mayor tiempo de computación. Respecto a las curvas de dosis en profundidad se puede disminuir el valor de FORCE obteniendo resultados similares con un menor tiempo de computación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo, ha sido parcialmente financiado por la Generalitat Valenciana dentro del proyecto de investigación GVPRE/2008/136, y la Universitat Politècnica de València dentro del proyecto PAID-06-07-3300.

Así como por la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación y Ciencia, referencia AP2009-2600.

REFERENCIAS

1. Protection of the Patient in Diagnostic Radiology ICRP Publication 34, Oxford: Pergamon, 1982.
2. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy: part 1. Radiation characteristics and production methods, ISO 4037-1, International Organisation for Standardization, Geneva, 1996.
3. G. M. Ardran, H. E. Crooks, "The measurement of inherent filtration in diagnostic X-ray tubes and the effect of target angle on x-ray quality. Br. J. Radiol. vol. 45, pp. 599-602, 1972.
4. J. F. Sutcliffe, "A simple method for measuring the quality of a diagnostic X-ray beam", Phys. Med. Biol., vol. 28, pp. 1459-1462, 1983.
5. H. D. Nagel, "Limitations in the determination of total filtration of X-ray tube assemblies", Phys. Med. Biol. vol. 33, pp. 271-289, 1988.
6. F. Salvat, J. M. Fernández-Varea, J. Sempau, "PENELLOPE, a code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport", (Issy-les-Moulineaux: OECD/NEA Data Bank), 2011.
7. X-5 Monte Carlo Team, "MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5" LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, April, 2003.
8. A. Querol, S. Gallardo, J. Ródenas, G. Verdú, "Application of the Tikhonov Unfolding Method for Reconstruction of primary X-ray spectra from X-ray equipments", Progress in Nuclear Science and Technology, vol.2, pp. 219-225, 2011.
9. S. Gallardo, A. Querol, J. Ródenas, G. Verdú, " Uncertainty analysis in the simulation of X-ray spectra in the diagnostic range using the MCNP5 code", 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'2011), Boston, Massachusetts, USA.
10. IPEM Report 78, Catalogue of Diagnostic X-Ray Spectra & Other Data, Institute of Physics and Engineering in Medicine.
11. Kenneth A. Van Riper, "SABRINA User's Guide. Windows Version", White Rock Science, 1997.
12. X-Ray Attenuation and Absorption for Materials of Dosimetric Interest. National Institute of Standards and Technology, NIST.