

# Simulación Monte Carlo de la Interacción de Rayos X con el Gas de una Cámara de Ionización

A. Grau Carles

G. García Gómez-Tejedor



Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M-14226-1995  
ISSN: 1135-9420  
NIPO: 402-01-008-3

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S44

MONTE CARLO METHOD; X RADIATION; COMPUTERIZED SIMULATION; IONIZATION  
CHAMBERS; GASES

**Simulación Monte Carlo de la Interacción de Rayos X con el Gas de una Cámara de Ionización**

Grau Carles, A.; García Gómez-Tejedor, G.

33 pp. 6 figs. 6 refs.

**Resumen**

El propósito último de una cámara de ionización es medir la cantidad de energía o dosis depositada por la radiación en el gas. Esta medida depende de la naturaleza del gas, de su densidad y temperatura, de la geometría de la cámara y del tipo e intensidad de la radiación. Hemos desarrollado un modelo Monte Carlo en el que es posible determinar la dosis absorbida por una cámara de ionización para rayos X procedentes de un tubo de rayos X. La verificación del modelo se ha llevado a cabo simulando la atenuación de las radiaciones de referencia al atravesar los espesores de hemirreducción establecidos en la norma ISO 4037, cuando se emplea una distribución de energías tipo Weibull para los fotones incidentes.

**Simulation of the Interaction of X-rays with a Gas in an Ionization Chamber  
by the Monte Carlo Method**

Grau Carles, A.; García Gómez-Tejedor, G.

33 pp. 6 figs. 6 refs.

**Abstract**

The final objective of any ionization chamber is the measurement of the energy amount or radiation dose absorbed by the gas into the chamber. The final value depends on the composition of the gas, its density and temperature, the ionization chamber geometry, and type and intensity of the radiation. We describe a Monte Carlo simulation method, which allows one to compute the dose absorbed by the gas for a X-ray beam. Verification of model has been carried out by simulating the attenuation of standard X-ray radiation through the half value layers established in the ISO 4037 report, while assuming a Weibull type energy distribution for the incident photons.



# Simulación Monte Carlo de la Interacción de Rayos X con el Gas de una Cámara de Ionización

A. Grau Carles<sup>a</sup>, G. García Gómez-Tejedor<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Laboratorio de Fusión por Confinamiento Magnético, Ciemat

<sup>b</sup>Materiales para Fusión, Ciemat

## 1. Introducción

El método de Monte Carlo es un procedimiento ampliamente utilizado en Física de Radiaciones en aquellos casos en los que, bien la cantidad de colisiones implicadas es muy grande, o bien la geometría del problema es difícil de evaluar. Normalmente se recurre a la simulación mediante distribuciones de probabilidad cuando no es posible obtener una expresión analítica, o aproximada, que permita describir el proceso.

Lo primero que debe tenerse en cuenta es que la simulación reduce el número de entes cuánticos implicados hasta un número estadísticamente significativo. Así, por ejemplo, aunque el número total de fotones emergentes de un tubo de rayos X es muy elevado, entre 1000 y 5000 fotones parecen ser suficientes para la simulación.

Aunque en el presente informe únicamente consideramos cámaras de ionización en forma de prisma de base cuadrada. Las modificaciones pertinentes para incluir cualquier otra geometría no parecen excesivamente complicadas. De esta forma, la simulación Monte Carlo puede ser una ayuda inestimable a la hora de diseñar una cámara de ionización con mayores rendimientos de detección. La simulación Monte Carlo resulta también de gran utilidad para comparar cámaras de ionización de idéntica geometría, pero diferente presión o composición del gas.

La verificación del modelo la realizaremos simulando la atenuación de las radiaciones de referencia al atravesar los espesores de hemirreducción establecidos en las normas ISO (International Organization for Standardization). Simultáneamente verificaremos que la distribución de Weibull se ajusta correctamente a la distribución de energías en fotones emergentes de un tubo de rayos X que cumple dichas normas.

## 2. Cámaras de ionización

Un instrumento empleado con frecuencia para medir radiaciones ionizantes es la denominada cámara de ionización. Ésta considera el principio básico de que toda partícula cargada, al interactuar con el medio (sólido, líquido o gas), es capaz de ionizar los átomos que encuentra a lo largo de su trayectoria.

En general, las cámaras de ionización están formadas por un gas, por ejemplo aire, confinado entre dos placas con distinto potencial eléctrico [1]. Una vez formados los pares de cargas<sup>1</sup> de distinto signo por efecto de la radiación, el campo eléctrico se encarga de separarlos, y las cargas siguen trayectorias opuestas. Este movimiento de cargas se traduce en la creación de una corriente eléctrica capaz de detectarse con la instrumentación adecuada. Así se consigue llevar a la práctica el principio básico de todo detector. A saber, convertir una magnitud física difícil de evaluar en una corriente eléctrica fácilmente medible.

Supongamos que un electrón de 1 MeV penetra en la cámara de ionización, y que toda su energía se invierte en ionizar el medio.<sup>2</sup> Si la diferencia de potencial entre las placas de la cámara es de 1000 V, la carga generada será  $q = 1 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{-3} = 1.6 \times 10^{-16}$  C. Este número da una idea de la magnitud de la carga implicada en el proceso de detección de partículas ionizantes.

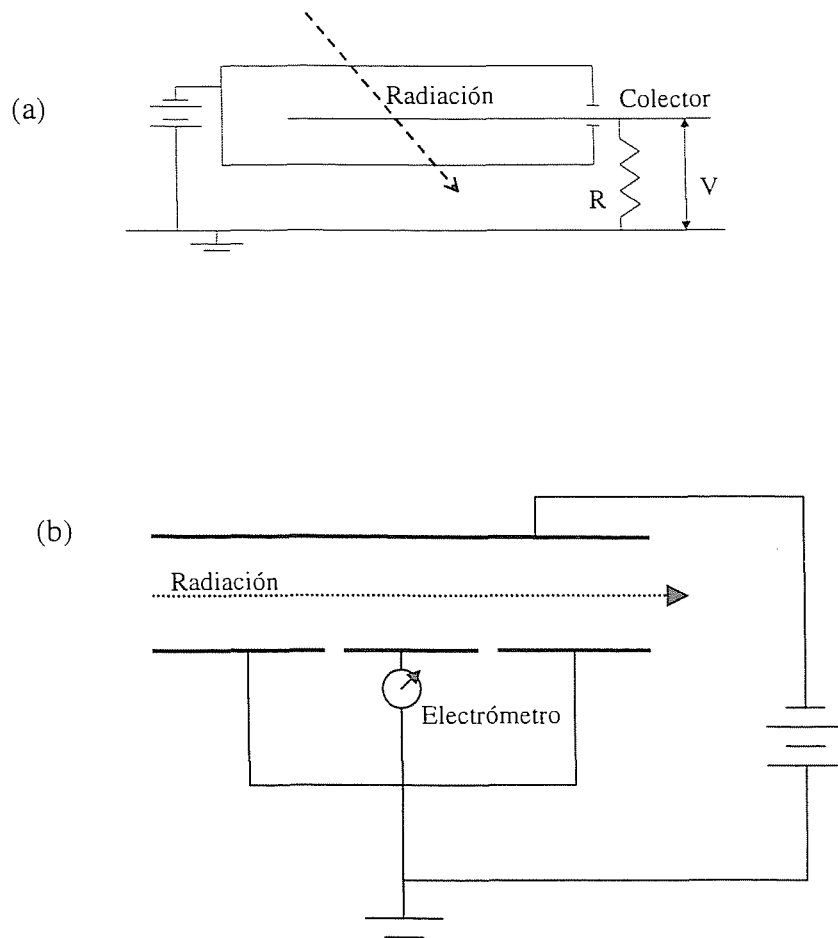
La figura 1 muestra las partes esenciales de una cámara de ionización. Obsérvese como en la configuración (a) el electrodo central (colector) está diseñado para tener una capacidad mucho más baja que el electrodo conectado a tierra. La parte (b) muestra una configuración plano-paralela de los electrodos, que sería la adecuada para la medida absoluta de la carga generada por unidad de longitud.

---

<sup>1</sup> Los pares de cargas de distinto signo pueden ser un par ion positivo-electrón, al ionizar un átomo, o un par ion positivo-ion negativo. Los iones negativos se generan como consecuencia de la captura por otros átomos del electrón ionizado. En general, es poco frecuente que los electrones generados en las ionizaciones primarias consigan llegar a los electrodos. A los electrodos llegan iones positivos o negativos consecuencia de ionizaciones secundarias.

<sup>2</sup> Sabemos que esto no es rigurosamente cierto. Evidentemente, otros procesos físicos como la excitación atómica, la emisión de radiación de frenado o la emisión de radiación Cerenkov compiten con las pérdidas por ionización.





**Fig. 1.** (a) Esquema de una cámara de ionización de dos electrodos. (b) Cámara plano-paralela para la medida de valores absolutos.

Un primer aspecto en toda cámara de ionización es comprender la evolución de los pares de iones una vez generados por la radiación. En el vacío las cargas se mueven aceleradamente como respuesta a un campo eléctrico. Sin embargo, en el seno de un gas, los iones se encuentran en equilibrio térmico con el gas, y la energía adquirida como consecuencia del campo eléctrico se disipa al colisionar con las moléculas del gas. De esta forma, la velocidad de las cargas termina siendo constante y proporcional a  $E/p$  ( $E$  en  $V\text{ cm}^{-1}$  y  $p$  en mmHg).<sup>3</sup> Esta velocidad suele expresarse para iones positivos de la forma

<sup>3</sup>Directamente proporcional al campo eléctrico  $E$  e inversamente proporcional a la presión del gas  $p$ . Un fenómeno físico de similares características puede observarse al ver caer por efecto de la gravedad una gota

$$w = K_0 \frac{760E}{p}, \quad (1)$$

Lo importante en la expresión anterior es hacer ver que, aunque  $w$  varía según el tipo de gas, su valor suele ser del orden del centímetro por microsegundo. Esta velocidad es de gran interés, puesto que indica que una cámara de ionización de varios centímetros de lado será capaz de distinguir como sucesos diferentes partículas ionizantes separadas temporalmente por tiempos del orden del microsegundo.<sup>4</sup>

El principio de funcionamiento de una cámara de ionización se basa en la medida de la energía depositada por la radiación al interactuar con el gas de llenado. La mayor parte de esta energía se produce por colisión con los electrones atómicos del gas. Otro concepto esencial a la hora de comprender la física implicada en este proceso es la pérdida media de energía  $W$  de la partícula ionizante como consecuencia de la formación de un par de iones. Por ejemplo, un electrón de 1 MeV invierte, en media, del orden de 34 eV en crear un par de iones de distinto signo. Lo interesante de esto es que esos 34 eV no parecen depender de la energía cinética del electrón. De esta forma, en una cámara de ionización, es fácil cuantificar la energía depositada en el gas a partir de los pares (flujo de carga) generados. El valor de  $W$  correspondiente al gas empleado nos dará la relación de proporcionalidad.

### 3. Rayos X. Secciones eficaces fotoeléctrica y Compton

La ionización primaria producida por rayos X de energías medias (100-200 keV) en gases a presión atmosférica es relativamente baja. Por lo que, en primera instancia, podría pensarse que una cámara de ionización no es apropiada para la detección de rayos X. Afortunadamente, la radiación electromagnética energética, como es el caso de los rayos X,

---

de líquido (digamos agua) dentro de un recipiente transparente lleno de otro líquido de menor densidad (digamos aceite). Evidentemente la gota caerá más despacio cuanto mayor sea la densidad del líquido del recipiente. Medir la velocidad de caída de gotas es un método rudimentario, pero efectivo, para comprobar densidades de líquidos sin necesidad de utilizar una balanza.

<sup>4</sup> Una capacidad de respuesta de una millonésima de segundo puede parecer muy elevada. Sin embargo, no es difícil encontrar muestras radiactivas que emiten más de un millón de partículas por segundo. En ese caso la cámara de ionización tendría dificultades para distinguir unas de otras.

interacciona con la materia generando, en segunda instancia, partículas cargadas con un elevado poder de ionización. Estas interacciones son eminentemente tres: efecto fotoeléctrico, Compton o creación de pares electrón-positrón [2].

La creación de pares electrón-positrón precisa de una energía umbral. Recordemos que en el proceso se transforma la energía en masa. Puesto que la masa en reposo del electrón y del positrón suman 1022 keV, es necesaria dicha energía umbral para la creación de pares. Una energía tan elevada cae más bien dentro de lo que es la radiación gamma dura que dentro de los rayos X.

Descartada la creación de pares electrón-positrón, y dentro del margen energético de los rayos X, es decir, entre 1 keV y 1 MeV, las dos únicas formas de interacción radiación-materia capaces de generar partículas ionizantes son: el efecto fotoeléctrico y el Compton.

Los efectos fotoeléctrico y el Compton son competitivos. Cada uno de ellos posee una probabilidad de interacción que depende del tipo y densidad del material y de la energía de la radiación incidente. Tanto el efecto fotoeléctrico como el Compton entran dentro del ámbito de la mecánica cuántica y consideran colisiones entre dos entes cuánticos, como pueden ser el fotón (rayo X) y los electrones del átomo. En el efecto fotoeléctrico, el fotón (rayo X) colisiona con un electrón de una capa interna del átomo y le cede toda su energía en forma de energía cinética. En el efecto Compton, por el contrario, el fotón interacciona con un electrón externo cediéndole parte de su energía en forma de energía cinética. El resto de energía se transforma en otro fotón de menor energía que la del incidente.

En este tipo de colisiones, como en cualquier otra, tenemos un proyectil y una diana. En el caso del efecto fotoeléctrico o Compton, al igual que en cualquier otro tipo de colisiones en mecánica cuántica, se desea saber la probabilidad de colisión en función del tamaño de la diana. Para introducir el concepto de tamaño de la diana en la colisión, se ha desarrollado el término de sección eficaz de interacción, que se define como la probabilidad de que, por unidad de partícula incidente y por unidad de partículas del blanco, tenga lugar la colisión:

$$\sigma = \frac{N}{In} \quad (2)$$

en donde  $I$  es el número de fotones incidentes,  $N$  es el número de colisiones y  $n$  es el número de átomos por unidad de área.

#### 4. La simulación

Nos centramos ahora en el problema que nos ocupa: la simulación de una cámara de ionización. Consideramos una cámara en forma de prisma de base cuadrada y de dimensiones ideales  $10 \times 10 \times 30 \text{ cm}^3$ . Supondremos, además, para simplificar lo más posible el problema, que no existe interacción de la radiación con las paredes de la cámara.

En la cámara se ha practicado un orificio circular de 1 cm de diámetro. La fuente de rayos X se considera puntual y a una distancia de 20 cm del orificio. Supondremos que las energías de los fotones procedentes del tubo de rayos X siguen la distribución de Weibull [3], con valores característicos para la energía media y la resolución según valores de referencia.<sup>5</sup>

Daremos como opción la posibilidad de anteponer un filtro de Cu o Al de espesor variable en el orificio. Esto permitirá modificar la distribución de Weibull inicial, desplazando la distribución hacia energías más altas.

##### 4.1. Energía del fotón

Seguiremos la pista a un número suficientemente elevado de fotones para obtener, mediante un análisis de probabilidad, magnitudes físicas de interés como la energía depositada en la cámara o la probabilidad de que el fotón de rayos X escape.

Comenzaremos generando un fotón en el orificio de la cámara, con una posición y dirección escogidas al azar, según el cono de radiación procedente de la fuente, y una energía según la distribución de Weibull. La función que da la energía correspondiente a cada fotón se calcula de la forma siguiente:

---

<sup>5</sup> Dichos valores de referencia pueden encontrarse en los manuales ISO (International Organization for Standardization) X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy (part 1).

```

%Generador aleatorio de energía en los fotones
%de una lámpara de rayos X según la distribución de Weibull
function enerfot = espectro(a,b)
i = 0;
r = rand;
z = r;
y = rand;
while (y < z)
    z = rand;
    if (z < y)
        y = rand;
    else
        i = i + 1;
        r = rand;
        z = r;
        y = rand;
    end;
end;
randexp = r + i;
enerfot = a - sqrt(b * randexp);

```

Los parámetros  $a$  y  $b$  tienen que ver con la energía media y la anchura de la distribución. Los valores de referencia de las energías medias y desviaciones estándar de la distribuciones correspondientes a distintos voltajes del tubo de rayos X se muestran en la Tabla 1. Los valores de energía media y resolución para voltajes intermedios se han obtenido interpolando linealmente. Las subrutinas correspondientes en MatLAB [6] son las siguientes:

```

%Energía media
function en = enermedia(v)
x = [10 15 20 25 30 40 60 80 100 120 150 200 250 300];
y = [8 12 16 20 24 33 48 65 83 100 118 164 208 250];
[coef1,std1] = polyfit(x,y,1);
en = coef1(1) * v + coef1(2);

% Anchura del espectro a media altura
function anch = anchura(v,y)
x = [10 15 20 25 30 40 60 80 100 120 150 200 250 300];
y2 = [28 33 34 33 32 30 36 32 28 27 37 30 28 27];
z = y2 .* y / 100;
[coef2,std2] = polyfit(x,z,1);
anch = coef2(1) * v + coef2(2);

```

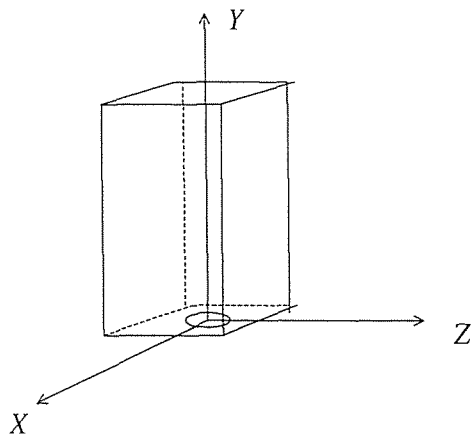
Suponiendo una disposición de la cámara de ionización según la figura 2. La posición inicial del fotón  $(x_0, y_0, z_0)$  en el orificio se calcula según las ecuaciones:

$$x_0 = r(n-0.5) \quad (3a)$$

$$y_0 = 0 \quad (3b)$$

$$z_0 = r'(n'-0.5) \quad (3c)$$

donde  $n$  y  $n'$  son números aleatorios entre 0 y 1.



**Fig. 2.** Disposición de los ejes de coordenadas en la cámara de ionización

**Tabla 1.** Valores característicos de energía media y resolución de los espectros de rayos X según las normas de calidad ISO para tubos de rayos X

Potencial del Tubo (kV)	Energía Media (keV)	Resolución (%)
10	8	28
15	12	33
20	16	34
25	20	33
30	24	32
40	33	30
60	48	36
80	65	32
100	83	28
120	100	27
150	118	37
200	164	30
250	208	28
300	250	27

#### 4.2. Punto de origen y dirección del fotón

La dirección tomada por el fotón sigue la línea recta que une la fuente puntual de rayos X y el punto  $(x_0, y_0, z_0)$  en el seno del orificio. Las expresiones correspondientes a los cosenos directores  $u_1, u_2, u_3$  según la dirección de salida del fotón son:

$$u_1 = \text{sen}\theta \cos\phi \quad (4a)$$

$$u_2 = \text{sen}\theta \text{sen}\phi \quad (4b)$$

$$u_3 = \cos\theta \quad (4c)$$

Una vez se encuentra el fotón en vuelo dentro de la cámara de ionización pueden suceder dos cosas: que el fotón escape de la cámara de ionización sin interactuar o que interactúe, bien por efecto fotoeléctrico, bien por efecto Compton, con los átomos del gas. La forma más sencilla de abordar el problema es calcular la sección eficaz total para el gas de la cámara; y, a partir de esta, obtener el recorrido del fotón antes de interactuar.

#### 4.3. Sección eficaz de interacción

El gas empleado en la simulación de la cámara será aire (78.09% N, 21.91% O). Teniendo en cuenta que el nitrógeno y oxígeno del aire son moléculas diatómicas, la sección eficaz total para el aire es [4,5]

$$\sigma_t = c(0.7809\sigma_N + 0.2191\sigma_O) \quad (5)$$

siendo

$$c = 6.023\rho / 14.443 \quad (6a)$$

$$\sigma_N = \sigma_{fN} + \sigma_{cN} \quad (6b)$$

$$\sigma_O = \sigma_{fO} + \sigma_{cO} \quad (6c)$$

El valor 6.023 representa un número que tiene que ver con el número Avogadro, 14.443 es el peso molecular del aire y  $\rho$  es su densidad en  $\text{gcm}^{-3}$ . La densidad del aire puede deducirse a partir de la presión  $p$  y la temperatura  $t$  valiéndose de la expresión

$$\rho = 0.001293 \frac{p}{760(1 + 0.00367t)} \quad (7)$$

Por lo que se refiere a las secciones eficaces fotoeléctrica y Compton para el nitrógeno y oxígeno, pueden ajustarse según la ref. [4] a las expresiones

$$\sigma_{fO} = \exp\left(1.7130 - 2.57229 \ln E - 0.205893(\ln E)^2 + 0.019924(\ln E)^3\right) \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cO} = & \exp\left(3.77239 - 0.148539 \ln E - 0.307124(\ln E)^2 + 0.0167303(\ln E)^3\right) \\ & + \exp\left(-1.73679 - 2.17686 \ln E - 0.449050(\ln E)^2 + 0.0264733(\ln E)^3\right) \end{aligned} \quad (8b)$$

$$\sigma_{fN} = \exp\left(1.2765 - 2.65400 \ln E - 0.200445(\ln E)^2 + 0.0200765(\ln E)^3\right) \quad (8c)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cN} = & \exp\left(3.47760 - 0.215762 \ln E - 0.288874(\ln E)^2 + 0.0151312(\ln E)^3\right) \\ & + \exp\left(-1.23693 + 1.74510 \ln E - 0.354660(\ln E)^2 + 0.0198705(\ln E)^3\right) \end{aligned} \quad (8d)$$

#### 4.4. Recorrido del fotón en aire

La distancia recorrida por el fotón según la simulación Monte Carlo es la siguiente:

$$r = -\ln(n)/\sigma_i \quad (9)$$



siendo  $n$  un número aleatorio entre 0 y 1. Por tanto, La posición en la que supuestamente el fotón interactuará por efecto Compton o fotoeléctrico es

$$x = x_0 + ru_1 \quad (10a)$$

$$y = y_0 + ru_2 \quad (10b)$$

$$z = z_0 + ru_3 \quad (10c)$$

#### 4.5. Decisión sobre el tipo de interacción

La decisión sobre si la interacción es de tipo fotoeléctrico o Compton tiene que ver con la condición  $\sigma_f > n$  (fotoeléctrico) o  $\sigma_f \leq n$  (Compton), siendo  $n$  un número aleatorio entre 0 y 1. En el caso de que se produzca efecto Compton, la posibilidad de una nueva interacción del fotón dispersado no puede ser descartada como en el caso fotoeléctrico. El fotón dispersado puede, a su vez, interactuar de nuevo por efecto fotoeléctrico o Compton con el gas dentro de la cámara.

La dirección del fotón Compton dispersado tiene por cosenos directores:

$$u_1 = (BCv_3v_2 - BDv_1)/(vAv_1) \quad (11a)$$

$$u_2 = (BCv_3v_1 - BDv_2)/(vAv_1) \quad (11b)$$

$$u_3 = -BCv + Av_3 \quad (11c)$$

siendo  $v_1, v_2$  y  $v_3$  los cosenos directores del fotón incidente y  $v, A, B, C, D$  las magnitudes siguientes:

$$v = \sqrt{1 - v_3^2} \quad (12a)$$

$$A = 1 + \frac{1}{E_r} - \frac{1}{E_d} \quad (12b)$$

$$B = \sqrt{1 - A^2} \quad (12c)$$

$$C = \cos[\pi(2n-1)] \quad (12d)$$

$$D = \text{sign}(\pi(2n-1))\sqrt{1-C^2} \quad (12e)$$

En cuanto a la energía del fotón dispersado  $E_d$ , esta resulta ser

$$E_d = \frac{E_r}{(1+Un+(2E_r-U)n^3)} \quad (13)$$

siendo

$$U = \frac{E_r}{1+0.5626E_r} \quad (14a)$$

$$E_r = \frac{E}{511} \quad (14b)$$

y  $n$  un número aleatorio entre 0 y 1.

#### 4.6. Capas de hemirreducción

Para comprobar que una determinada lámpara de rayos X verifica las normas de calidad ISO, suelen emplearse filtros denominados espesores o capas de hemirreducción. Estos filtros son de un determinado espesor de material (Al o Cu), y su finalidad es que la energía depositada en la cámara se reduzca a la mitad. Los espesores de las primeras y segundas capas de hemirreducción establecidos por la norma ISO 4037 para las radiaciones estándar de rayos X son los que se muestran en la Tabla 2

**Tabla 2.** Capas de hemirreducción correspondientes a las normas ISO

Potencial del Tubo (kV)	Energía Media (keV)	Resolución (%)	1ª Capa Hemirreducción	2ª Capa Hemirreducción
10	8	28	0.047 (Al)	0.052(Al)
15	12	33	0.14 (Al)	0.16 (Al)
20	16	34	0.32 (Al)	0.37 (Al)
25	20	33	0.66 (Al)	0.73 (Al)
30	24	32	1.15 (Al)	1.30 (Al)
40	33	30	0.084 (Cu)	0.091 (Cu)
60	48	36	0.24 (Cu)	0.26 (Cu)
80	65	32	0.58 (Cu)	0.62 (Cu)
100	83	28	1.11 (Cu)	1.17 (Cu)
120	100	27	1.71(Cu)	1.77 (Cu)
150	118	37	2.36(Cu)	2.47 (Cu)
200	164	30	3.99(Cu)	4.05 (Cu)
250	208	28	5.19(Cu)	5.23 (Cu)
300	250	27	6.12(Cu)	6.15 (Cu)

Al igual que hicimos con la totalidad de la cámara, simular la acción de los filtros sobre los fotones de rayos X requiere conocer las secciones eficaces correspondientes a estos materiales. Por lo que se refiere al Cu

$$\sigma_t = c(\sigma_{fCu} + \sigma_{cCu}) \quad (15)$$

siendo

$$c = 8.94 \times 0.6023 / 63.546 = 0.084739 \quad (16a)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{fCu} &= \exp(14.2439 - 2.588677 \ln E - 0.0667398(\ln E)^2) \\ &+ \exp(14.5808 - 1.18375 \ln E - 0.41385(\ln E)^2 + 0.0312088(\ln E)^3)\end{aligned}\quad (16b)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cCu} &= \exp(6.17739 + 0.273123 \ln E - 0.37236(\ln E)^2 + 0.0201638(\ln E)^3) \\ &+ \exp(-0.57021 + 1.75042 \ln E - 0.284555(\ln E)^2 + 0.011693(\ln E)^3)\end{aligned}\quad (16c)$$

Por lo que se refiere al Al

$$\sigma_t = c(\sigma_{fAl} + \sigma_{cAl}) \quad (17)$$

siendo

$$c = 2.69 \times 0.6023 / 26.9815 = 0.06005 \quad (18a)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{fAl} &= \exp(10.8711 - 2.7786 \ln E - 0.17585(\ln E)^2) \\ &+ \exp(13.1738 - 1.18375 \ln E - 0.41385(\ln E)^2 + 0.0312088(\ln E)^3)\end{aligned}\quad (18b)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{cCu} &= \exp(4.51995 + 0.14055 \ln E - 0.35244(\ln E)^2 + 0.0193692(\ln E)^3) \\ &+ \exp(-0.439322 + 1.30867 \ln E - 0.211648(\ln E)^2 + 0.007542(\ln E)^3)\end{aligned}\quad (18c)$$

## 5. Fiabilidad de la simulación

Para comprobar si la simulación cumple verdaderamente las normas de calidad ISO relativas a tubos de rayos X, supondremos un haz de rayos X compuesto únicamente por 5.000 fotones. Calcularemos la energía depositada en la cámara de 3 formas diferentes: sin

filtro  $E_0$ , con el primer espesor de hemirreducción  $E_1$  y con el segundo  $E_2$ . La razón entre la energías calculadas  $E_0/E_1$  y  $E_0/E_2$  debe ser respectivamente 2 y 4. Estos cocientes deben verificarse además independientemente del tamaño o forma de la cámara.

Para hacer el número de interacciones suficientemente grande aumentaremos el tamaño de la cámara considerablemente. Esto permitirá comprobar la veracidad de los cocientes de energías depositadas  $E_0/E_1$  y  $E_0/E_2$ . La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos para una cámara ideal de  $50 \times 50 \times 300 \text{ cm}^3$ .

**Tabla 3.** Cocientes entre las energías depositadas en la cámara para un e primer espesor de hemirreducción (columna2) y para el segundo (columna3)

Potencial (kV)	$E_0/E_1$	$E_0/E_2$
10	1.93	4.01
15	1.91	3.96
20	1.95	3.96
25	2.11	4.98
30	2.38	6.10
40	1.87	3.68
60	1.86	3.40
80	1.93	3.73
100	1.97	3.92
120	2.01	4.04
150	1.99	3.98
200	2.03	4.03
250	2.07	4.04
300	1.95	3.94

Tal como se muestra en la tabla 3, las energías medias deducidas de nuestra distribución energética coinciden con las de la norma ISO, dentro del margen de tolerancia de  $\pm 3\%$  establecido por ésta ( $\pm 5\%$  para energías inferiores a 30 keV). La concordancia entre las atenuaciones dadas por la simulación y los valores teóricos de la 1ª y 2ª capa de hemirreducción, asegura que la resolución energética de las distribuciones simuladas coinciden con las establecidas por la norma ISO dentro del margen de tolerancia de  $\pm 10\%$  ( $\pm 15\%$  para energías inferiores a 30 KeV). Sin embargo, este buen comportamiento no se verifica para la radiación generada por el potencial de 30 kV, que presenta una

desviación de casi el 20% en la primera capa de hemirreducción. El origen de esta discrepancia no está claro por el momento. Podría ser debida a alguna alteración en la distribución energética real que no se haya tenido en cuenta en la simulación, como la presencia de picos característicos del material del ánodo del tubo. En cualquier caso, parece un efecto interesante a estudiar y será el objetivo de próximas investigaciones.

## 6. El programa en MatLAB

A continuación listamos el programa de simulación. También proporcionamos un ejemplo a modo de 'test run'.

```
% =====
% Simulación de la interacción de fotones procedentes de un tubo de rayos X en
% una cámara de ionización
% =====
% Condiciones iniciales
prompt=('Num fotones :','Potencial (kV) :','Presión (Torr):','Temperatura (C):', ...
        'Filtro (No/Al/Cu):','Espesor (cm)','factor escala:');
def={'1000','60','720','22','Cu','0.1','1'};
title='Datos de Entrada';
lineNo=1;
answer=inputdlg(prompt,title,lineNo,def);
numFoton = str2num(char(answer(1)));
t = str2num(char(answer(4)));
p = str2num(char(answer(3)));
v = str2num(char(answer(2)));
mater = char(answer(5));
espesor = str2num(char(answer(6)));
f = str2num(char(answer(7)));
clf;
set(gcf,'Position',[0 35 900 500]);
camAncho = 5 * f;
camAncho2 = 2 * camAncho;
camAlto = 5 * f;
camAlto2 = 2 * camAlto;
camLargo = 30 * f;
camOrif = 0.5;
camOrif2 = 2 * camOrif;
distCam = 200;
% Dibuja la cámara
Camara(1,:,1) = [-camAncho camAncho camAncho -camAncho -camAncho];
Camara(2,:,1) = [0 0 camLargo camLargo 0];
Orificio(1,:,1) = [-camOrif camOrif];
Orificio(2,:,1) = [0 0];
subplot(1,3,3);plot(Camara(1,:,1),Camara(2,:,1),'k','LineWidth',3);
hold on;
%plot(Orificio(1,:,1),Orificio(2,:,1),'w','LineWidth',4);
axis([-camAncho2-1 camAncho2+1 -1 camLargo+1]);
grid on;
numFotInt = 0;
```

```

numFotFot = 0;
numFotFot2 = 0;
numFotComp = 0;
numFotComp2 = 0;
mediaE = enerMedia(v);
anchE = anchura(v,mediaE);
a = v;
b = (a - mediaE) * (a-mediaE);
sumae = 0;
sumEnEscp = 0;
sumEnFot = 0;
sumEfilt = 0;
sumEnFilt = 0;
ipas = 0;
ni = 0;
% Simula fotones
for i = 1:numFoton
    % Da un valor para la energia del fotón
    e = espectro(a,b);
    if (e <= .1)
        e = .1;
    end;
    sumEnFot = sumEnFot + e;
    evec(i) = e;
    % Antepone un filtro
    espe0 = 0;
    aFiltro = 0;
    if (mater == 'Cu')
        densidad = 8.94;
        landaespe = 1 / sigmacu(e,densidad);
        recorr = -landaespe * log(rand);
        if (recorr < espesor)
            aFiltro = 1;
        end;
    elseif (mater == 'Al')
        densidad = 2.69;
        landaespe = 1 / sigmaal(e,densidad);
        recorr = -landaespe * log(rand);
        if (recorr < espesor)
            aFiltro = 1;
        end;
    end;
    if (aFiltro == 0)
        % Forma el espectro filtrado
        ni = ni + 1;
        efilt(ni) = e;
        sumEfilt = sumEfilt + 1;
        sumEnFilt = sumEnFilt + e;
        % Sortea punto emision del foton en el orificio
        alea1 = camOrif2 * (rand - 0.5);
        x0 = alea1;
        y0 = 0;
        alea2 = camOrif2 * (rand - 0.5);
        z0 = alea2;
        % Angulo de emision del foton
        rd = sqrt(x0 * x0 + distCam * distCam + z0 * z0);
        theta = acos(z0/rd);
        phi = acos(x0/rd/sin(theta));
        cosdir1 = sin(theta) * cos(phi);
        cosdir2 = sin(theta) * sin(phi);
        cosdir3 = cos(theta);
        % Recorrido del foton
        landa = 1 / sigma(e,t,p);
        r = -landa * log(rand);
        x = x0 + r * cosdir1;
        y = y0 + r * cosdir2;
        z = z0 + r * cosdir3;
        Recorrido(1,:,1) = [x0 x];
        Recorrido(2,:,1) = [y0 y];
        hold on;
        el = e;
    end;
end;

```

```

ncasofot = 0;
while (abs(x) < camAncho & y < camLargo & y > 0 & abs(z) < camAlto & e > .1 ...
& ncasofot == 0)
plot(Recorrido(1,:,1),Recorrido(2,:,1),'r');
numFotInt = numFotInt + 1;
% Es fotoelectronica o Compton?
probafot = sigmafot(e,t,p);
if (probafot > rand)
% Caso fotoelectronico
if (e1 == e)
numFotFot = numFotFot + 1;
else
numFotFot2 = numFotFot2 + 1;
end;
ipas = ipas + 1;
eelece(ipas) = e;
sumae = sumae + e;
ncasofot = 1;
else
% Caso Compton
if (e1 == e)
numFotComp = numFotComp + 1;
else
numFotComp2 = numFotComp2 + 1;
end;
energiared = e / 511;
umayor = energiared / (1 + 0.5626 * energiared);
alea = rand;
energiadisp = energiared / (1 + umayor * alea + (2 * energiared ...
- umayor) * alea * alea * alea);
amayor = 1 + 1 / energiared - 1 / energiadisp;
bmayor = sqrt(1 - amayor * amayor);
angulo = pi * (2 * alea - 1);
cmayor = cos(angulo);
dmayor = sign(angulo) * sqrt(1 - cmayor * cmayor);
condcosdir = 1 - abs(cosdir3);
if (condcosdir > 0.01)
cosdirprim = sqrt(1 - cosdir3 * cosdir3);
cosdirb = (bmayor * cmayor * cosdir3 * cosdir1 - bmayor * dmayor *
...
cosdir2) / (cosdirprim + amayor * cosdir1);
cosdira = (bmayor * cmayor * cosdir3 * cosdir2 - bmayor * dmayor *
...
cosdir1) / (cosdirprim + amayor * cosdir1);
cosdirc = - bmayor * cmayor * cosdirprim + amayor * cosdir3;
else
cosdirb = bmayor * cmayor;
cosdira = bmayor * dmayor;
cosdirc = amayor * cosdir3;
end;
x0 = x;
y0 = y;
z0 = z;
cosdir1 = cosdira;
cosdir2 = cosdirb;
cosdir3 = cosdirc;
energiaelec = (energiared - energiadisp) * 511;
ipas = ipas + 1;
eelece(ipas) = energiaelec;
sumae = sumae + energiaelec;
e = energiadisp * 511;
landa = 1 / sigma (e,t,p);
r = -landa * log(rand);
x = x0 + r * cosdir1;
y = y0 + r * cosdir2;
z = z0 + r * cosdir3;
Recorrido(1,:,1) = [x0 x];
Recorrido(2,:,1) = [y0 y];
ncasofot = 0;
end;

```



```

end;
if (abs(x) > camAncho | y > camLargo | y < 0 | abs(z) > camAlto)
    sumEnEscp = sumEnEscp + e;
end;
if (e <= .1)
    numFotFot2 = numFotFot2 + 1;
    sumae = sumae + e;
    ipas = ipas + 1;
    eelece(ipas) = e;
end;
end;
end;
% Escribe resultados
ff = 5 * (f - 1);
text(-80*f+ff,30*f,'Simulación MC de una Cámara de Ionización','fontWeight','bold');
str1 = num2str(numFoton);
str2 = num2str(numFotFot);
str8 = num2str(numFotComp);
str30 = num2str(numFotFot2);
str40 = num2str(numFotComp2);
str20 = num2str(sumae);
str60 = num2str(sumEnEscp);
str80 = num2str(sumEfilt);
enFotMed = sumEnFot / numFoton;
enFotMedFilt = sumEnFilt / sumEfilt;
str70 = num2str(enFotMed);
str90 = num2str(enFotMedFilt);
str100 = num2str(sumEnFot);
str110 = num2str(sumEnFilt);
str3 = strcat('Fotones simulados = ',str1);
text(-75*f+ff,25*f,str3);
str101 = strcat('Energia total foton = ',str100);
text(-75*f+ff,23*f,str101);
str91 = strcat('Energia med. foton filtr. = ',str90);
text(-75*f+ff,17*f,str91);
str111 = strcat('Energia total foton filtr. = ',str110);
text(-75*f+ff,15*f,str111);
str4 = strcat('Interac. fot. primarias = ',str2);
text(-75*f+ff,13*f,str4);
str5 = strcat('Interac. Compt. primarias = ',str8);
text(-75*f+ff,11*f,str5);
str31 = strcat('Interac. fot. secundar. = ',str30);
text(-75*f+ff,9*f,str31);
str41 = strcat('Interac. Compt. secundar. = ',str40);
text(-75*f+ff,7*f,str41);
str61 = strcat('Energia escapa = ',str60,'keV');
text(-75*f+ff,3*f,str61);
str71 = strcat('Energia med. foton = ',str70);
text(-75*f+ff,21*f,str71);
str10 = num2str(v);
str11 = strcat('Tensión lampara rayos X = ',str10,' kV');
text(-75*f+ff,27*f,str11);
str21 = strcat('Energia depositada = ',str20,' keV');
text(-75*f+ff,5*f,str21);
str81 = strcat('Fotones filtrados = ',str80);
text(-75*f+ff,19*f,str81);
hold on;
[mhis,yhis] = hist(evec,20);
subplot(5,5,3); bar(yhis,mhis,'.');
xlabel('Energia (keV)');
ylabel('Fotones inic. ');
hold on;
[mhisi,yhisi] = hist(eelece,20);
subplot(5,5,23); bar(yhisi,mhisi,'. ');
xlabel('Energia (keV)');
ylabel('Elec. disper. ');
[mhisii,yhisii] = hist(efilt,20);
subplot(5,5,13); bar(yhisii,mhisii,'. ');
xlabel('Energia (keV)');
ylabel('Fotones filt. ');
efilt = 0;

```

```

eelece = 0;
evec = 0;

```

El programa requiere de las siguientes funciones:

```

% Anchura del espectro a media altura
function anch = anchura(v,y)
x = [10 15 20 25 30 40 60 80 100 120 150 200 250 300];
y2 = [28 33 34 33 32 30 36 32 28 27 37 30 28 27];
z = y2 .* y / 100;
[coef2,std2] = polyfit(x,z,1);
anch = coef2(1) * v + coef2(2);

```

```

% Densidad del aire
function d = densidad(t,p)
d = 0.0012930 * (p/760) / (1 + 0.00367 * t);

```

```

%Energía media
function en = enermedia(v)
x = [10 15 20 25 30 40 60 80 100 120 150 200 250 300];
y = [8 12 16 20 24 33 48 65 83 100 118 164 208 250];
[coef1,std1] = polyfit(x,y,1);
en = coef1(1) * v + coef1(2);

```

```

% Espectro de fotones en una lampara de rayos X
function enerfot = espectro(a,b)
i = 0;
r = rand;
z = r;
y = rand;
while (y < z)
    z = rand;
    if (z < y)
        y = rand;
    else
        i = i + 1;
        r = rand;
        z = r;
        y = rand;
    end;
end;
randexp = r + i;
enerfot = a - sqrt(b * randexp);

```

```

function portada()
% This is the machine-generated representation of a Handle Graphics object
% and its children. Note that handle values may change when these objects
% are re-created. This may cause problems with any callbacks written to
% depend on the value of the handle at the time the object was saved.
%
% To reopen this object, just type the name of the M-file at the MATLAB
% prompt. The M-file and its associated MAT-file must be on your path.
load portada
a = figure('Color',[0.8 0.8 0.8], ...
    'Colormap',mat0, ...
    'PointerShapeCData',mat1, ...
    'Position',[120 50 500 470], ...
    'Tag','Fig1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','bold', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'Position',[87 90 80 15], ...
    'String','Material :', ...

```

```

    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'FontSize',10, ...
    'Position',[212 90 80 15], ...
    'FontWeight','bold', ...
    'String','Ninguno|Aluminio|Cobre', ...
    'Style','popupmenu', ...
    'Tag','PopupMenu1', ...
    'UserData','AlCu', ...
    'Value',1);
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','bold', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'String','Num fotones :', ...
    'Position',[87 282 90 15], ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','bold', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'Position',[87 210 108 15], ...
    'String','Potencial (kV) :', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText3');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','bold', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'Position',[87 180 108 15], ...
    'String','Temperatura (C) :', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText4');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','bold', ...
    'HorizontalAlignment','left', ...
    'Position',[87 150 110.25 15], ...
    'String','Presión (mmHg) :', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText5');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[212 282 80 15], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','bold', ...
    'HorizontalAlignment','right', ...
    'String','1000', ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText1');
b = uicontrol('Parent',a, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'Position',[212 210 80 15], ...
    'FontSize',10, ...
    'FontWeight','bold', ...
    'HorizontalAlignment','right', ...
    'String','60', ...

```

```

        'Style','edit', ...
        'Tag','EditText2');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Position',[212 180 80 15], ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','bold', ...
'HorizontalAlignment','right', ...
'String','22', ...
'Style','edit', ...
'Tag','EditText3');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Position',[212 150 80 15], ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','bold', ...
'HorizontalAlignment','right', ...
'String','720', ...
'Style','edit', ...
'Tag','EditText4');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8], ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','bold', ...
'HorizontalAlignment','left', ...
'Position',[87 60 80 15], ...
'String','Espesor (cm) :', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText6');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'HorizontalAlignment','right', ...
'String','0.01', ...
'FontSize',10, ...
'FontWeight','bold', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'Position',[212 60 80 15], ...
'Style','edit', ...
'Tag','EditText5');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Position',[60 315 251 15], ...
'String','Simulación', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText7');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Position',[60 245 251 15], ...
'String','Cámara', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText7');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...
'BackgroundColor',[1 1 1], ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'Position',[60 120 251 15], ...
'String','Filtro', ...
'Style','text', ...
'Tag','StaticText8');
b = uicontrol('Parent',a, ...
'Units','points', ...

```

```

'Position',[150 25 45 20], ...
'FontSize',12, ...
'FontWeight','bold', ...
'String','OK', ...
'Tag','Pushbutton1');

% Seccion eficaz fotoelectronica y Compton para el aire
function st = sigma(e,t,p)
f = log(e);
f2 = f * f;
f3 = f * f * f;
% Oxigeno
s1 = 11.7130 - 2.57229 * f - 0.205893 * f2 + 0.0199244 * f3;
sfo = exp(s1);
s1 = 3.77239 - 0.148539 * f - 0.307124 * f2 + 0.0167303 * f3;
s2 = -1.73679 + 2.17686 * f - 0.449050 * f2 + 0.0264733 * f3;
sco = exp(s1) + exp(s2);
% Nitrogeno
s1 = 11.2765 - 2.65400 * f - 0.200445 * f2 + 0.0200765 * f3;
sfn = exp(s1);
s1 = 3.47760 - 0.215762 * f - 0.288874 * f2 + 0.0151312 * f3;
s2 = -1.23693 + 1.74510 * f - 0.354660 * f2 + 0.0198705 * f3;
scn = exp(s1) + exp(s2);
% secciones eficaces totales
so = sfo + sco;
sn = sfn + scn;
coef = densidad(t,p) * 0.6023 / 14.443;
st = coef * (0.7809 * sn + 0.2191 * so);

% Seccion eficaz fotoelectronica y Compton para el Al
function st = sigmaal(e,densidad)
f = log(e);
f2 = f * f;
f3 = f * f * f;
s1 = 10.8711 - 2.7786 * f + 0.17585 * f2;
s2 = 13.1738 - 2.18203 * f - 0.25896 * f2 + 0.022284 * f3;
sfal = exp(s1) + exp(s2);
s1 = 4.51995 + 0.140549 * f - 0.352441 * f2 + 0.0193692 * f3;
s2 = -0.439322 + 1.30867 * f - 0.211648 * f2 + 0.0075421 * f3;
scal = exp(s1) + exp(s2);
% secciones eficaces totales
sal = sfal + scal;
coef = densidad * 0.6023 / 26.9815;
st = coef * sal;

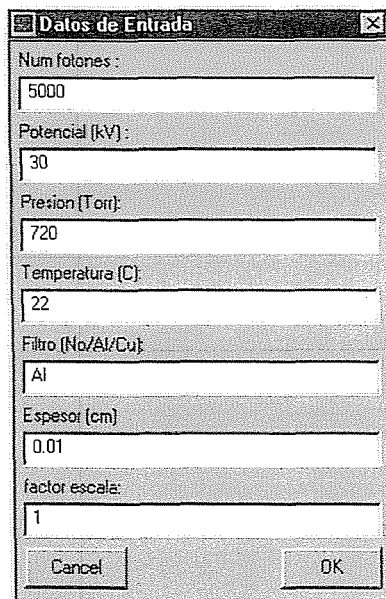
% Seccion eficaz fotoelectronica y Compton para el Cu
function st = sigmaal(e,densidad)
f = log(e);
f2 = f * f;
f3 = f * f * f;
s1 = 14.2439 - 2.58677 * f - 0.0667398 * f2;
s2 = 14.5808 - 1.18375 * f - 0.413850 * f2 + 0.0312088 * f3;
sfcu = exp(s1) + exp(s2);
s1 = 6.17739 + 0.273123 * f - 0.37236 * f2 + 0.0201638 * f3;
s2 = -0.57021 + 1.75042 * f - 0.284555 * f2 + 0.011693 * f3;
sccu = exp(s1) + exp(s2);
% secciones eficaces totales
sal = sfcu + sccu;
coef = densidad * 0.6023 / 63.546;
st = coef * sal;

```

Nada más comenzar la ejecución del programa aparece la ventana de la figura 3. En ella deben incluirse datos de entrada como: número de fotones simulados, potencial del tubo de

rayos X (kV), presión (Torr) y temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) del aire dentro de la cámara, material con que está constituido el filtro (Al, Cu), espesor del filtro (cm).

En la figura 4 se muestra el resultado de la simulación correspondiente a la ventana de entrada de la figura 3. Los resultados numéricos aparecen a la izquierda. En el centro se muestran las distribuciones de energía correspondientes a los fotones incidentes, fotones filtrados y electrones dispersados (tanto fotoeléctricos como Compton). Finalmente, en la parte derecha de la ventana se han trazado las trayectorias de los fotones dentro de la cámara



The image shows a dialog box titled "Datos de Entrada" with the following fields and values:

Parameter	Value
Num fotones :	5000
Potencial [kV] :	30
Presion [Torr] :	720
Temperatura [C] :	22
Filtro [No/Al/Cu] :	Al
Espesor [cm] :	0.01
factor escala :	1

Buttons: Cancel, OK

Fig. 3. Datos de entrada previos a la simulación

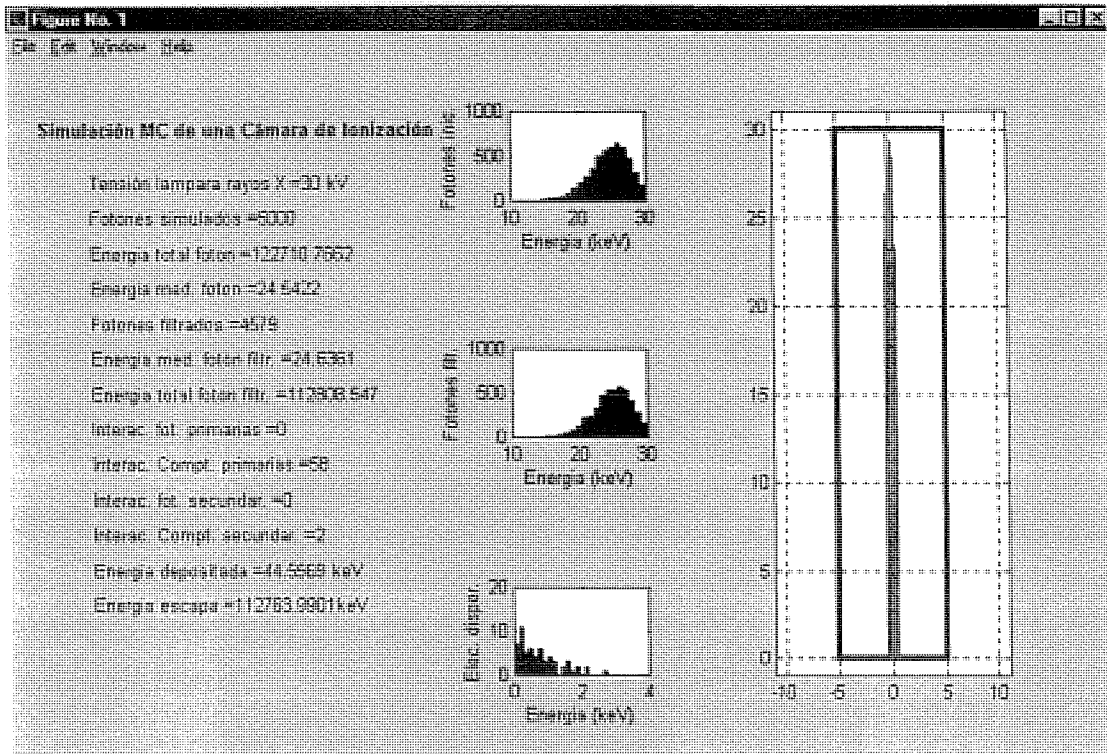


Fig. 4. Ventana de salida del programa después de la simulación

Podemos hacer más vistosa la simulación reduciendo el potencial del tubo de rayos X (10 kV) y aumentando el tamaño de la cámara ( $\times 10$ ). Los datos de entrada y resultados se muestran en las figuras 5 y 6.

**Datos de Entrada**

Num fotones :  
1000

Potencial (kV):  
10

Presion (Torr):  
720

Temperatura (C):  
22

Filtro (No/Al/Cu):  
Al

Espesor (cm):  
0.01

factor escala:  
10

Cancel OK

Fig. 5. Datos de entrada previos a la simulación

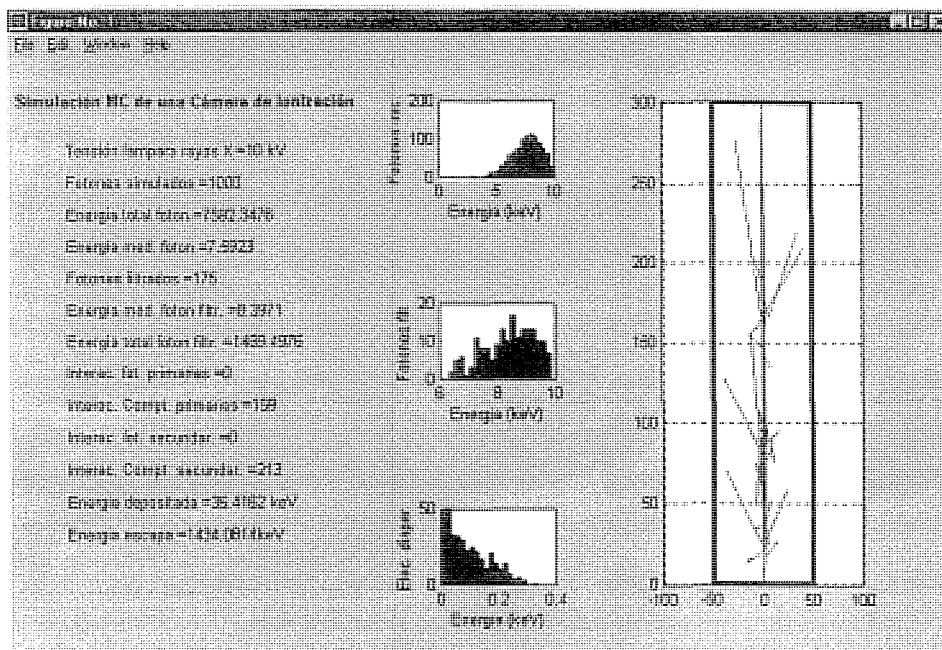


Fig. 6. Ventana de salida del programa después de la simulación



## 7. Referencias

- [1] L. Marton, Methods of Experimental Physics, Nuclear Physics. Vol 5, pp. 89-109. Ionization Chambers, by R. W. Williams, (Academic Press, New York, 1961).
- [2] B. K. Agarwal, X-Ray Spectroscopy (Springer-Verlag, Berlin, 1991)
- [3] La distribución de Weibull  
<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3668.htm>
- [4] J. H. Hubbell, Photon Mass Attenuation and Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV, Appl. Radiat. Isot. 33 (1982) 1269-1290.
- [5] J. Kenneth Shultis, R. E. Faw, Radiation Shielding (Prentice Hall PRT, New Jersey, 1996)
- [6] E. Pärt-Enander, A. Sjöberg, The Matlab 5 Handbook, (Addison-Wesley, Harlow, England, 1999)

