

Sistema para la simulación y análisis de radiografía y tomografía de rayos gamma

J.C. Palacios, J. Santos, L.C. Longoria y R.T. Perry
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México

Recibido el 23 de marzo de 2004; aceptado el 3 de marzo de 2005

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema para reconstruir el interior de objetos industriales utilizando rayos gamma, el cual está conformado por dos subsistemas. El primero obtiene las imágenes radiográficas y el segundo reconstruye imágenes planas correspondientes a cortes del objeto, utilizando tomografía de transmisión y de emisión. Ambos contienen módulos para simular radiografías y tomografías industriales de rayos gamma. El modelo de simulación desarrollado puede utilizarse para diseñar tomógrafos gamma de aplicaciones específicas, determinándose parámetros como el número óptimo de proyecciones y las energías necesarias para la reconstrucción de los objetos involucrados.

Descriptores: Tomografía gamma.

In this work, we present the development of a system to reconstruct the inner content of industrial objects using gamma rays. This system is conformed by two subsystems. The first subsystem obtains radiographic gamma images and the second reconstructs 2D images corresponding to slices of the object, using transmission and of emission tomography. Both subsystem has a module to simulate gamma radiography and industrial gamma tomography, respectively. The developed simulation module can be used to design gamma tomography for specific applications, determining parameters like the number of projections and the necessary energy for the reconstruction of the involved object.

Keywords: Gamma tomography.

PACS: 87.59.Fm

1. Introducción

En el ámbito internacional la tomografía industrial ha tenido un gran desarrollo en los últimos años, en el caso de las aplicaciones industriales existe un gran interés por la reconstrucción de imágenes de objetos, usando técnicas de tomografía, así como por las diversas aplicaciones que pueden tener los tomógrafos de rayos gamma, en particular la tomografía industrial y de proceso. Las aplicaciones de la tomografía de rayos gamma son diversas y van desde el análisis de árboles para conocer su edad, el análisis en tiempo real de fluidos en tuberías, hasta aplicaciones como la reconstrucción de perfiles y distribución de quemado en elementos combustibles de reactores, así como la caracterización de contenedores de desechos radiactivos [1,2,3,4]. Actualmente, esta tecnología está en proceso de desarrollo y aplicación en todo el mundo.

Los tomógrafos industriales son caros y generalmente son contruidos para inspeccionar objetos específicos. Es por eso que el diseño y construcción de tomógrafos con aplicaciones industriales es una tarea particularmente complicada, pues es probable que se tenga que diseñar y construir un tomógrafo para cada aplicación específica. Así que, el contar con una herramienta que permita simular el sistema tomográfico específico para una aplicación determinada, previo a su construcción, permitiría corregir *a priori* errores no evidentes, optimizar el tipo de fuente, el tiempo de adquisición y los materiales a utilizar, con el consecuente ahorro en tiempo y dinero. Aquí se presenta un sistema que permite simular tomografía de transmisión y de emisión de rayos gamma, así como radiografías gamma. Este sistema utiliza el modelo de atenuación tradicional y se presenta un modelo propio que corrige las autoabsorciones en el material.

2. Reconstrucción de imágenes

Un sistema que reconstruye imágenes por tomografía requiere de mediciones de transmisión de la radiación [5]; en el caso de que el objeto bajo estudio también emita radiaciones se requerirá de otro tipo de mediciones a partir de las emisiones radiactivas del objeto, por lo que se conoce como tomografía de emisión [5,6]. Una combinación de ambas mediciones permitirá detallar objetos y, en el caso particular de la tomografía de emisión, ubicar los objetos radiactivos dentro de la zona bajo estudio. Esto se conoce como reconstrucción y permite identificar, localizar y, en su caso, analizar objetos contenidos en la zona de interés y, más aún, en el caso de objetos emisores de radiación es posible identificar el tipo de radioisótopo que está emitiendo dicha radiación, así como su morfología, lo cual es particularmente útil en medicina y en análisis de contenedores de desechos radiactivos. En las siguientes secciones se describen las bases teóricas tanto para la tomografía de transmisión, como la de emisión, utilizadas en nuestra metodología.

2.1. Teoría de reconstrucción

La metodología de reconstrucción por tomografía utilizada en este trabajo está formulada a partir de la teoría de la tomografía tradicional [5,6]. En esta teoría se utiliza un haz monoenergético bien colimado proveniente de una fuente radiactiva y que, después de atravesar el objeto de interés, llega a un detector. Este haz es atenuado como función de los materiales por los cuales atraviesa, es decir, de manera proporcional al coeficiente de atenuación lineal conforme a la

siguiente expresión:

$$N(\theta, t) = N_0 e^{-\int_L \mu(x,y) ds}, \quad (1)$$

donde N_0 es el número de fotones por segundo por unidad de área que se emiten en la fuente gamma; L es la trayectoria que sigue el haz de fotones definida por las variables θ y t en plano vertical fijo, z ; θ es el ángulo entre el eje x y una línea perpendicular a L ; t es la distancia a partir de la línea L a la línea L_0 (definida como la línea que une al par fuente detector en la posición inicial para cada proyección); ds es el incremento en distancia a lo largo de L ; $N(\theta, t)$ es el haz atenuado en L ; y $\mu(x,y)$ denota el coeficiente de atenuación lineal del punto (x, y) en un plano vertical fijo, z . Esta geometría para tomografía de transmisión por rayos paralelos está definida por un plano $x - y$, como se muestra en la Fig. 1. El objeto se encuentra localizado dentro del círculo C . La función $P_\theta(t)$ es llamada proyección [5] y la definiremos más adelante en esta sección.

El coeficiente de atenuación lineal, $\mu(x,y)$, es proporcional al número atómico y a la densidad del objeto, así que la reconstrucción de la función $\mu(x,y)$ resulta en una distribución 2D de estas propiedades. Posteriormente consideraremos la reconstrucción de $\mu(x,y)$ utilizando mediciones experimentales.

Primero definimos la magnitud, $I(\theta, t)$, en términos de las cantidades $N(\theta, t)$ y N_0 determinadas experimentalmente y utilizando la ecuación observamos que

$$I(\theta, t) = \ln\left(\frac{N_0}{N(\theta, t)}\right) = \int_L \mu(x, y) ds. \quad (2)$$

La ecuación explícita para la trayectoria L puede ser escrita en términos de θ y t como [6,7]

$$I(\theta, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mu(\theta, t) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - t) dx dy. \quad (3)$$

En la Ec. (3), δ es la función delta de Dirac y es igual a cero fuera de la línea L . La magnitud, $I(\theta, t)$, también es conocida como la transformada de Radon 2D de $\mu(x,y)$ [5]. Sobre la línea L , $I(\theta, t)$ es llamada la integral de línea. La función $I(\theta, t)$ para un valor fijo de θ es llamado una proyección, se muestra en la Fig. 1 y puede escribirse como

$$P_\theta(t) = I(\theta, t). \quad (4)$$

Un conjunto de datos completo para tomografía consiste de un número específico de proyecciones, n , obtenido para diferentes ángulos, que para la geometría de rayos paralelos están equiespaciados mediante un paso angular, Δ , definido por

$$\Delta = \frac{\pi}{n}. \quad (5)$$

El problema de encontrar la función $\mu(x,y)$ se resuelve obteniendo la transformada inversa de Radon [5] utilizando

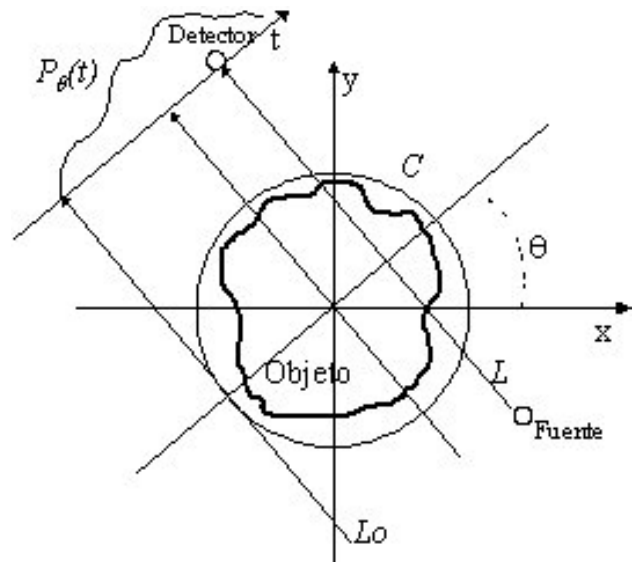


FIGURA 1. Sistema Coordinado para tomografía computarizada.

valores discretos de $I(\theta, t)$ para diferentes ángulos alrededor del objeto. Aquí discutiremos dos soluciones diferentes, una para la tomografía de transmisión y otra para la tomografía de emisión. Sin embargo existen otros algoritmos que resuelven la Ec. (2) y que actualmente se utilizan en diferente tomógrafos médicos e industriales.

En este trabajo se creó un conjunto completo de datos utilizando los modelos de simulación propuestos más adelante, para una geometría de rayos paralelos. Los resultados de la simulación son usados para demostrar la validez de la metodología de reconstrucción.

2.2. Algoritmo de reconstrucción para tomografía de transmisión

Para obtener la función $\mu(x,y)$ para tomografía de transmisión, utilizamos el método de retroproyección filtrada. Este método utiliza la integral de retroproyección derivada del teorema de corte de Fourier [6]:

$$\mu(x, y) = \int_0^\pi \tilde{I}(\theta, x \cos \theta + y \sin \theta) d\theta. \quad (6)$$

La Ec. (6) se aplica a la geometría de adquisición de datos por rayos paralelos [5] y la función $\tilde{I}(\theta, t)$ es la retroproyección filtrada dada por [6]:

$$\tilde{I}(\theta, t) = F^{-1}\{F[I(\theta, t)](w)Q(w)\}(t), \quad (7)$$

donde, $F[I(\theta, t)]$ es la transformada de Fourier de $I(\theta, t)$, $Q(w)$ es la función filtro en el espacio de frecuencias w , y F^{-1} es la transformada inversa de Fourier del producto de funciones F y Q el dominio de frecuencias.

Existen diferentes algoritmos basados en el método de retroproyección, éstos se distinguen por la naturaleza del filtro utilizado. En este trabajo utilizamos el algoritmo propuesto por Kak y Slaney [6], el cual es rápido y produce buenos resultados.

2.3. Algoritmo de reconstrucción para tomografía de emisión

Para reconstruir la distribución de emisores utilizamos la técnica de reconstrucción algebraica ART [7,8], en la cual la imagen (emisión gamma del objeto en el pixel correspondiente) es representada como un vector, $g^T = [g_1, g_2, \dots, g_M]$, y la integral de línea de la Ec. (2) está representada como $p = [p_1, p_2, \dots, p_K]$, donde M es el número de pixeles en la imagen y K es el número de integrales de línea. La relación entre p y g es

$$p = Ag. \quad (8)$$

La matriz A define al sistema digital de reconstrucción [8]. Generalmente el número de ecuaciones es diferente del número de variables en el sistema, así que se requieren metodologías de regresión lineal múltiple para resolverlo.

3. Simulación

En la ausencia de mediciones físicas, se necesita un método que asegure que los modelos tomográficos teóricos son válidos, y que los programas basados en ellos describen apropiadamente estos modelos, por lo que se desarrolló una metodología que permite generar una base de datos de mediciones simuladas, para cualquier geometría de reconstrucción y conteniendo cualquier elección de materiales radiactivos. Esta metodología es referida como simulación. La base de datos así generada puede ser utilizada por los programas de reconstrucción mediante tomografía, con el propósito de determinar si se reproduce la geometría con los materiales radiactivos seleccionados en la creación de la base de datos.

Esta simulación también puede ser usada para determinar los límites de detección de la metodología de reconstrucción. La metodología de simulación se incorporó como un módulo extra a los programas de tomografía. Esta independencia del módulo es importante para futuras investigaciones.

En nuestra metodología de simulación se utiliza la representación por superficies para representar los objetos en un sistema cartesiano [9]. Los componentes individuales del modelo (objetos) pueden elegirse como radiactivos o no. En la simulación para tomografía de transmisión de rayos gamma se generó una fuente externa gamma y se calculó su contribución al detector. En la simulación para tomografía de emisión gamma se consideraron objetos radiactivos y se calculó la contribución de éstos al detector.

El arreglo de la fuente gamma externa y el detector (par fuente – detector) constituye un sistema isótropo monoenergético. La energía de la fuente gamma es arbitraria, pero comúnmente se asocia con algún isótopo como ^{60}Co o ^{137}Cs . Para cada fuente radioactiva sólo se le asocia una energía de emisión, y en el caso de isótopos con más de una energía de emisión (^{60}Co), la simulación es realizada para cada una de las energías de emisión. La intensidad de la fuente de simulación se asigna mediante el número de fotones emitidos en una geometría 4π .

El valor de la emisión gamma en una dirección específica se determina calculando el número de gamas que pasan a través del ángulo sólido subtendido a partir de la fuente y hasta el detector. El detector sólo considera aquellas gamas que llegan a él con la misma energía de emisión de la fuente externa. El haz gamma viaja a partir de la fuente y hasta el detector en línea recta, y es atenuado como función de las propiedades del material que atraviesa en esta trayectoria. Si existe algún material en esta trayectoria que emita gamas con la misma energía de la fuente externa, la correspondiente cantidad es adicionada al conteo total después de ser corregidas por autoabsorción.

El número total de gammas que llegan al detector puede ser corregido por la eficiencia del detector. Este procedimiento se repite tantas veces como cambie la posición del par fuente – detector, en función de la geometría de reconstrucción (rayos paralelos, divergentes, etc.), con lo cual se genera una base de datos completa para tomografía de transmisión. Para la simulación del proceso de emisión el procedimiento anterior se repite pero sin utilizar la fuente externa. Esto resulta en la generación de una base de datos para el problema de la tomografía de emisión.

Para el caso de la tomografía de transmisión se considera que el haz proveniente de la fuente es atenuado conforme al modelo exponencial descrito por la Ec. (1), utilizando los coeficientes de atenuación lineal de cada material en la trayectoria del haz.

Cuando existe más de un material en esta trayectoria, la intensidad del haz $N(\theta, t)$ conforme sale del material se convierte en la N_0 para el siguiente material en la ausencia de una fuente interna. En el caso de que exista un espacio entre materiales se supone que no ocurre atenuación alguna.

La autoabsorción generada por las fuentes internas es considerada mediante la aplicación de la siguiente expresión [10]:

$$N_1 = N_V \frac{f (1 - e^{-\mu t})}{4\pi \mu}, \quad (9)$$

donde N_1 es el número de fotones por unidad de área que emergen de la superficie del material como resultado de los fotones producidos dentro del material, μ es el coeficiente de atenuación lineal del material, N_V es la fuente gamma volumétrica, f es un factor de calibración por tamaño del colimador y t es la longitud del material que atraviesa el haz.

En la tomografía de emisión, el valor de N_1 se suma a las emisiones de materiales anteriores y se convierte en N_0 para el siguiente material. Como se mencionó anteriormente, en el evento de que exista un espacio entre materiales, se supone que no existe atenuación alguna. De la misma manera, los cálculos continúan hasta que se alcanza el detector. Este proceso se repite para un número diferente de ángulos generando así la base de datos.

En las mediciones reales, se considera que el espectro energético medido tiene un intervalo de energías diferentes alrededor de la energía de interés. Este proceso mejora la estadística y nos permite evitar algunos errores inherentes a la detección de la radiación. En el proceso de simulación so-

lo consideramos aquellos conteos que provienen de la fuente en la energía de interés, puesto que estamos suponiendo un proceso perfecto de detección. Esto ocasiona pequeñas variaciones en la estadística de la simulación cuando se compara con las mediciones reales.

4. Sistema de radiografía computarizada de rayos gamma

Como una primera aproximación para realizar tomografía de rayos gamma, y con el propósito de validar la metodología de simulación en la adquisición de datos de tomografía, se desarrolló un sistema para obtener radiografías gamma computarizadas, el cual nos permitiría comparar las radiografías reales con las obtenidas por datos generados usando el módulo de simulación desarrollado, así como evaluar los parámetros físicos que podrían aplicarse en el desarrollo del tomógrafo de rayos gamma

Para realizar lo anterior se diseñó un contenedor de aluminio, mostrado en la Fig. 2(a), con dimensiones de $30 \times 30 \times 30$ cm y 0.2 cm de espesor de las paredes (1). En su interior se ubicaron diferentes materiales: bloque de plomo de $10.7 \times 10.7 \times 5.2$ cm (2), bloque de poliplomo de $21 \times 9.8 \times 5.2$ cm (3), cilindro de aluminio de radio 2 cm y altura 7.5 cm (4), bloque de hierro de $8.5 \times 4.0 \times 0.5$ cm (5), bloque de lucita de $6 \times 4 \times 0.5$ cm (6), bloque de madera de $18.5 \times 4.5 \times 2$ cm (7). En todos los casos la última dimensión mencionada es la profundidad, es decir la distancia que va a recorrer el haz de rayos gamma en el material. Se dividió el contenedor en una malla de 10×10 pixeles con dimensiones de 3×3 cm para cada pixel.

Se utilizó un sistema de espectrometría gamma de alta resolución para rayos gamma conformado por un detector de germanio hiperpuro de 30 % de eficiencia, un amplificador, una tarjeta multicanal y un software comercial analizador de espectros. Para calibrar en energía y eficiencia se utilizaron diferentes fuentes gamma certificadas: ^{241}Am , ^{57}Co , ^{22}Na , ^{137}Cs y ^{60}Co . Utilizando estas fuentes se tomó una lectura para cada una de estas fuentes, con el sistema colimado para la posición central del contenedor de aluminio, con dicho contenedor vacío y con la misma geometría sin el contenedor, esto con el propósito de evaluar la atenuación debida a las paredes del contenedor y la respuesta a diferentes energías del sistema de adquisición de datos, los resultados se muestran en la Tabla I.

4.1. Adquisición de datos experimentales para radiografía gamma

Para obtener los datos experimentales y reconstruir el interior del contenedor mediante radiografía de rayos gamma, se utilizó el sistema de espectrometría gamma descrito anteriormente con un colimador cuadrado de 3×3 cm., y las siguientes fuentes puntuales de rayos gamma:

- Fuente de ^{241}Am con una energía de 58 keV.

TABLE I. Conteos obtenidos sin contenedor, y con el contenedor vacío, para diferentes energías.

Energía (keV)	Sin Contenedor (Conteos)	Contenedor Vacío (Conteos)	Diferencia (Conteos)
59.03	4552	3943	609
121.29	4233	3620	613
510.18	5534	5068	466
660.84	6850	6447	403
1331.46	3229	2999	230

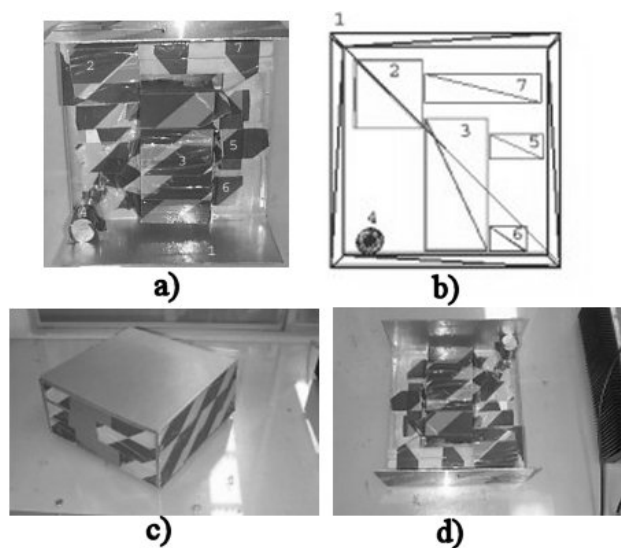


FIGURA 2. Arriba a) Del lado izquierdo: Fotografía del interior del cesto. b) Del lado derecho: Malla (wireframe) del cesto simulado. Abajo se muestra el cesto a radiografiar cerrado y abierto.

- Fuente de ^{137}Cs con una energía de 661.5 keV.
- Fuente de ^{60}Co con energías de 117.2 keV y 1331.5 keV.

Con estas fuentes se cubre un amplio rango energético y se puede observar la respuesta de la atenuación por material contra una energía específica, lo que finalmente proporcionará información acerca de la mejor energía para realizar radiografías gamma con estos materiales. Después de tomar las lecturas de calibración descritas al final de la Sec. 4, se tomó una lectura de fondo sin el contenedor y una lectura con el contenedor vacío para calcular la atenuación debida a las paredes del contenedor para estas fuentes radiactivas, y posteriormente se tomó una lectura con el contenedor lleno por cada fuente de rayos gamma, para cada pixel. En la Fig. 3 se presenta una comparación de atenuación por posición y por tipo de fuente, donde se observa claramente la respuesta del detector para cada posición en el cesto, en función directa del tipo de material. Asimismo se observa un comportamiento similar para las diferentes energías utilizadas, aunque en ciertas posiciones correspondientes a materiales con densidades bajas se pueden observar pequeñas diferencias en la respues-

TABLE II. Distribución X-Y de los conteos para la fuente de Co-60 (Energía 1332 keV), normalizada.

X \ Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0.0406	0.0391	0.0314	0.5650	0.7726	0.7832	0.8003	0.7887	0.7676	0.7926	1
3	1	0.0337	0.0359	0.0344	0.5150	0.7189	0.7558	0.7280	0.7219	0.7481	0.7463	1
4	1	0.0386	0.0314	0.0317	0.5655	0.7800	0.7496	0.7770	0.7822	0.7859	0.7674	1
5	1	0.7511	0.7582	0.7783	0.5412	0.3232	0.3239	0.3375	0.8023	0.7726	0.7595	1
6	1	0.7577	0.7951	0.7582	0.5835	0.3138	0.3205	0.3341	0.6684	0.6508	0.6464	1
7	1	0.7629	0.7949	0.7850	0.5857	0.3096	0.3229	0.3328	0.7825	0.7986	0.7555	1
8	1	0.7545	0.7966	0.7854	0.4786	0.3197	0.3321	0.3286	0.7716	0.7924	0.7793	1
9	1	0.7560	0.7659	0.7763	0.3576	0.3284	0.3172	0.3113	0.7894	0.7882	0.7540	1
10	1	0.7592	0.8000	0.7835	0.3051	0.3093	0.3217	0.3175	0.7812	0.7904	0.7842	1
11	1	0.2670	0.6125	0.7941	0.3153	0.3224	0.3073	0.3177	0.7315	0.7530	0.7696	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

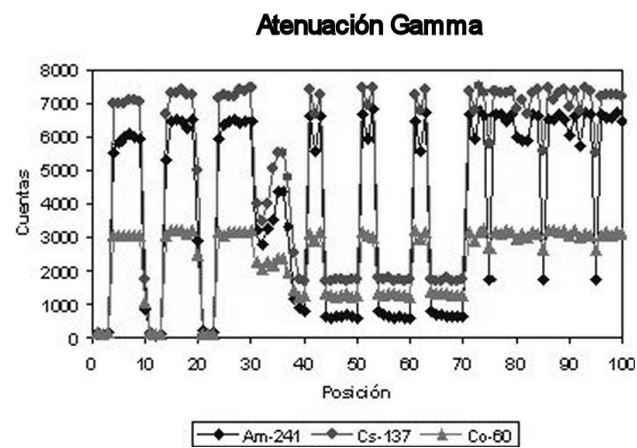


FIGURA 3. Atenuación por tipo de fuente.

ta del detector a diferentes energías. Lo anterior es evidente al comparar la respuesta del americio en las posiciones 3 a 9, donde el rayo gamma de esa energía es más atenuado con respecto a la respuesta del cobalto para las mismas posiciones, lo cual se verá reflejado al momento de reconstruir la imagen.

4.2. Radiografía gamma con datos experimentales

A partir de las mediciones obtenidas conforme al punto anterior, se generó la primera aproximación a una radiografía gamma del cesto de la Fig. 2(a). La Tabla II muestra la distribución de conteos en X-Y normalizados al conteo en el aire, registrados en el detector para cada pixel, correspondientes a la energía de 1332 keV de la fuente de ⁶⁰Co. Las posiciones en el eje X, correspondientes a las filas 1 y 12 son conteos fuera de la caja, es decir en el aire y por ello tienen un valor constante al atenuarse únicamente por distancia. Lo mismo aplica para las columnas 1 y 12 en la posición Y.

La Fig. 4 es una representación por superficie de los datos de la Tabla I, generado en una Hoja de cálculo comercial. Como se puede observar en la Fig. 4 esta manera de digitalizar

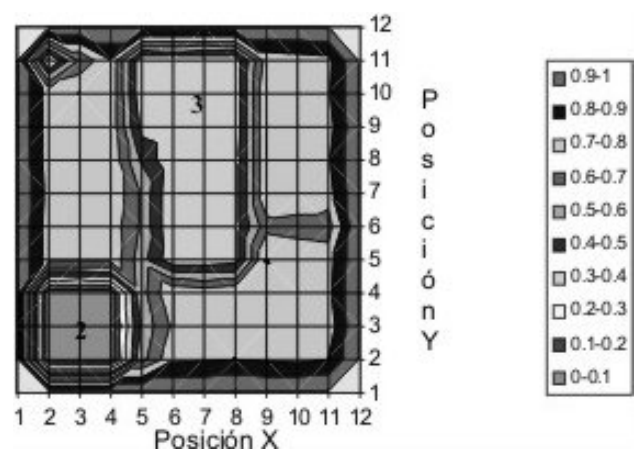


FIGURA 4. Representación de las atenuaciones (normalizadas) correspondientes a la fuente de Co-60 (Energía 1332 keV).

los datos de atenuación, nos permite reconstruir la imagen de objetos fuertemente atenuantes y su silueta se dibuja claramente, es decir la Fig. 4 es una radiografía del cesto de la Fig. 2(a). En dicha figura es posible ver el problema de interferencia en las fronteras de los objetos dentro del contenedor, como se observa en el caso del plomo y el poliplomo, objetos 2 y 3 en la Fig. 2 y representados con los mismos números en la Fig. 4. La delimitación de bordes es un problema que se presentará en la reconstrucción por tomografía y se puede resolver generando una malla mas refinada, mediante colimación.

Posteriormente, utilizando las mediciones obtenidas en la Sec. 4.1, se hizo una radiografía del cesto de la Fig. 2(a), utilizando el software desarrollado y descrito en la Sec. 6. Los resultados de las mediciones se muestran en la Fig. 5(a), donde los tonos de gris más claros corresponden a una mayor atenuación. La energía del ⁶⁰Co es la mayor de las tres (1332.5 keV), lo cual se refleja en una imagen más oscura o con menor atenuación. El ²⁴¹Am con energía de 58 keV muestra la imagen más clara y son más notables el hierro y

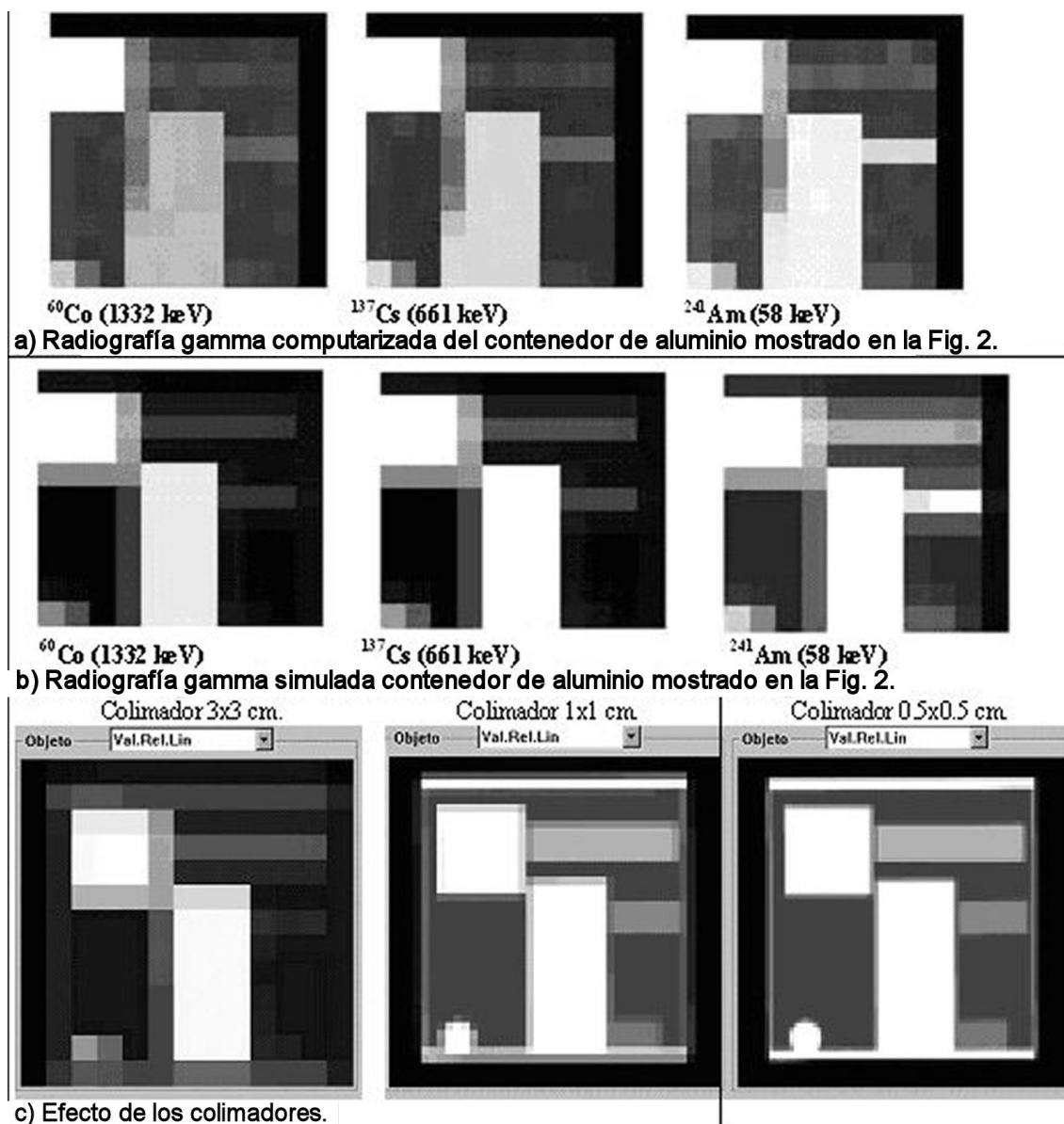


FIGURA 5. Radiografías real (a) y simulada (b) del contenedor de aluminio para tres diferentes fuentes de radiación. Radiografía usando diferentes colimadores (c).

la madera que en las otras dos imágenes. El ^{137}Cs (661 keV) muestra un comportamiento intermedio entre las energías mencionadas. Al comparar la radiografía mostrada en la Fig. 5(a) con la imagen de la Fig. 4, se pueden notar las diferencias en la calidad de la imagen reconstruida al utilizar el software desarrollado.

4.3. Radiografía gamma con datos generados mediante simulación

En esta etapa se construyó el cesto virtual, mostrado en la Fig. 2(b), simulando el proceso de adquisición de datos para radiografía conforme a lo descrito en la Sec. 3, y utilizando las mismas energías que en la Sec. 4.1. A partir de este conjunto de datos generado se realizó una radiografía del cesto virtual de la Fig. 2(b). Los resultados se presentan en la

Fig. 5(b); estos resultados muestran un comportamiento similar al de la Fig. 4 y al de la Fig. 5(a), para todas las energías utilizadas. Por ejemplo, la mayor energía (1332.5 keV) muestra una imagen menos atenuada y la energía de 58 keV muestra la imagen más atenuada. En el caso de la menor energía (58 keV) se observan de manera más clara los materiales como la madera y el hierro.

Finalmente se realizó un estudio de sensibilidad para la reconstrucción de imágenes mediante radiografía gamma, utilizando el cesto mostrado en la Fig. 2(b). Se simuló radiografías utilizando diferentes colimadores y una fuente externa de energía 1.33 MeV con una intensidad de 1 Ci. Los resultados se muestran en la Fig. 5(c) y se observa que la definición de los objetos aumenta conforme se reduce la sección eficaz del colimador.

De los resultados anteriores podemos concluir que el modelo de atenuación gamma utilizado [10,11], en conjunto con las bases de datos de los coeficientes de atenuación utilizadas [12], reflejan la dependencia energética que tienen los coeficientes de atenuación para cada material, lo cual está en total concordancia con la teoría y las mediciones experimentales.

Las radiografías gamma tienen un patrón similar, tanto para las mediciones reales como para las simulaciones. El contraste de intensidades en cada imagen es el mismo. Esto indica que la metodología de simulación utilizada para la atenuación de rayos gamma y para la adquisición de datos, utilizando el modelo propuesto en la Sec. 3, funciona correctamente y permite generar imágenes radiográficas gamma. Más adelante se utiliza esta misma metodología en la generación de datos por tomografía.

5. Sistema para tomografía gamma a nivel laboratorio (TGL)

A partir de lo desarrollado en la sección anterior se procedió a diseñar y construir un tomógrafo gamma a nivel laboratorio. Este tendrá el propósito de confirmar el proceso de simulación de adquisición de datos, que fue validado en la sección anterior, así como validar los algoritmos de reconstrucción desarrollados, tanto para tomografía de transmisión como para tomografía de emisión. El TGL esta conformado por un sistema de detección de radiación, un sistema de colimadores ajustables y un sistema electromecánico, todo esto acoplado a una computadora personal que controla la adquisición de datos y los sistemas anteriores. El posicionamiento del sistema electromecánico del TGL está integrado por un sistema de movimiento horizontal, otro movimiento vertical y un movimiento rotacional. Esto hace tres grados de libertad en sus movimientos, definidos como el número de actuadores que mueven articulaciones individuales. El sistema tiene una precisión de ± 0.5 mm en los desplazamientos X y Z, y de $\pm 0.5^\circ$ en su rotación.

El sistema de adquisición de datos está conformado por un sistema de emisión gamma colimado, para el cual se utilizan fuentes gamma de diferentes isótopos y un sistema de detección de radiación, compuesto por detectores de yoduro de sodio de 2 pulgadas. Cada detector está conectado a una tarjeta ORTEC, a su vez conectada a una computadora a través de un convertidor análogo – digital (ADC). Estas tarjetas contienen en su interior el preamplificador y el amplificador acoplados. Estas cadenas de medición tienen su propio software de control y lectura. Asimismo cada arreglo fuente-detector tiene asociado un sistema de colimadores ajustables en función del tamaño del objeto a reconstruir, de la malla a utilizar y del método de reconstrucción.

El sistema TGL es capaz de realizar automáticamente inspecciones de objetos, puede recibir y suministrar las señales para la adquisición de datos, el control del movimiento (dirección, velocidad, posición requerida) y para establecer el tiempo necesario en cada uno de sus parámetros. Una vez

realizadas las mediciones (adquisición de datos) el sistema está en condiciones de utilizar el software de reconstrucción para reconstruir la imagen del interior del objeto bajo estudio.

La operación del sistema TGL se puede describir como sigue:

- Se define el tipo de geometría a utilizar y en función de ello el número de detectores.
- Se define el número de proyecciones a medir (n), correspondiente al número de pasos en el sistema de rotación. Este valor depende del tipo de geometría a utilizar y define el ángulo de rotación. Para rayos paralelos el ángulo es $180/n$ y para rayos divergentes es $360/n$. O sea, para obtener 20 proyecciones de rayos paralelos el ángulo será de 9° y para la misma cantidad de proyección de rayos divergentes es 18° .
- Se define el número de rayos suma a medir en cada proyección. Para la geometría de rayos paralelos, éste es el número de posiciones en que se moverá el par fuente - detector formando haces paralelos. Este parámetro define el paso de recolección en cada proyección (m). Para rayos divergentes este parámetro define el número de mediciones tomadas para una misma posición de la fuente externa. El sistema TGL está diseñado para mover el objeto en lugar del par fuente – detector, cumpliéndose la geometría descrita.
- Se define el tipo de fuente gamma a utilizar, y con ello la energía y la intensidad de dicha fuente. Esto permite definir el tiempo de conteo en cada rayo suma en función de la intensidad de la fuente y el error estadístico requerido.
- Se programan los datos anteriores en el software que controla el movimiento y el sistema de adquisición de datos.
- Se adquieren las proyecciones definidas en la Sec. 2 y utilizando el software de tomografía que se describe en la Sec. 6, se reconstruye la imagen.

Las características operacionales del TGL son:

- Fuentes de radiación: ^{241}Am , ^{137}Cs y ^{60}Co .
- Diámetro del área de reconstrucción: 400 mm.
- Altura del área de reconstrucción: 500 mm.
- Peso máximo del objeto: 50 kg.
- Longitud máxima: 80 cm.
- Precisión máxima en X y Z: ± 0.5 mm.
- Precisión angular máxima: $\pm 0.5^\circ$.
- Posibilidad de reconstrucción 2D y 3D.

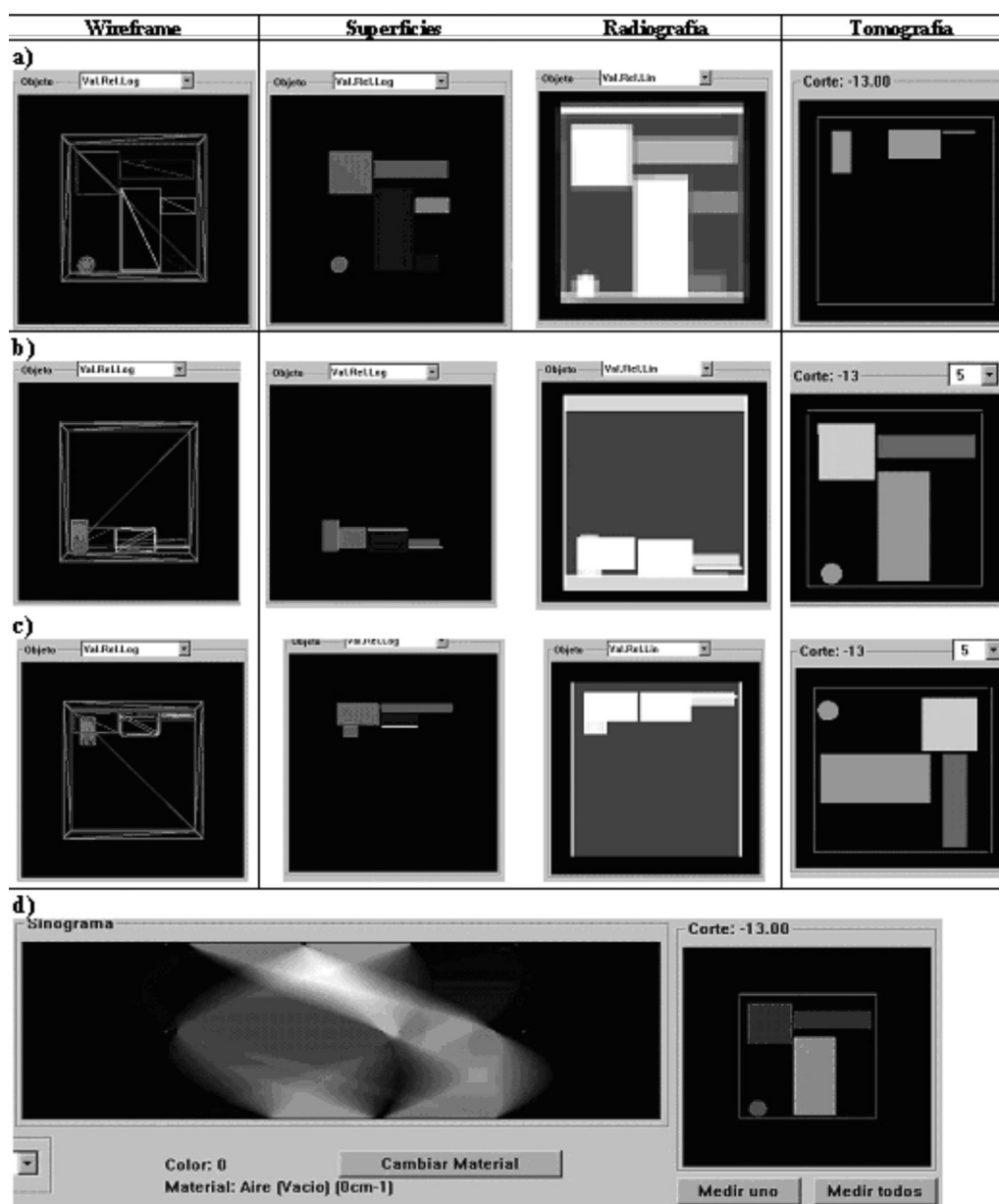


FIGURA 6. a) Tomografía del contenedor de la Fig. 2. b) Vista lateral rotada 90° en el eje z respecto a (a). c) Vista lateral rotada 180° con respecto a b). Sinograma y tomografía.

El uso de un tomógrafo requiere de un análisis previo de sus posibilidades y limitaciones. Por ejemplo, para la reconstrucción de un objeto con contenido de hierro y carbono, una sola fuente de ^{60}Co y un solo detector, se tendrá que medir al menos un minuto para tener una estadística aceptable. Considerando que la región máxima a reconstruir es de $400 \times 400 \text{ mm}^2$, para obtener 64 rayos suma (m) por proyección en una geometría de rayos paralelos, se tendría que usar un paso de 6.25 mm. Con esta información se establecen las dimensiones del colimador a utilizar. Suponiendo que se miden 40 proyecciones, el paso angular sería de 4.5° , y el total de mediciones sería de 2650. Esto equivaldría a 42.6 horas.

Un estudio anterior [11] establece la necesidad de una mayor resolución de mediciones en función de la calidad de

reconstrucción deseada. Una imagen de buena calidad se puede obtener utilizando 80 proyecciones (paso 2.25 grados) y 256 rayos suma (paso 1.6 mm), pero se deben tomar 20480 lecturas. Esto daría un tiempo de medición de 341.3 horas. Para la misma fuente el incremento en resolución implica un tiempo de medición 8 veces mayor y se llegan a tiempos de recolección que pueden ser imprácticos.

En algunos casos será necesario medir sólo 20 ó 40 proyecciones y hasta 64 rayos suma en cada una de las proyecciones. Para mejorar la imagen así obtenida se debe utilizar un post procesamiento digital [13].

Se establece que con el TGL se logran obtener mediciones con suficiente resolución (mayor que 1.6 mm) para lograr imágenes de alta calidad, acorde a lo que establecen los algo-

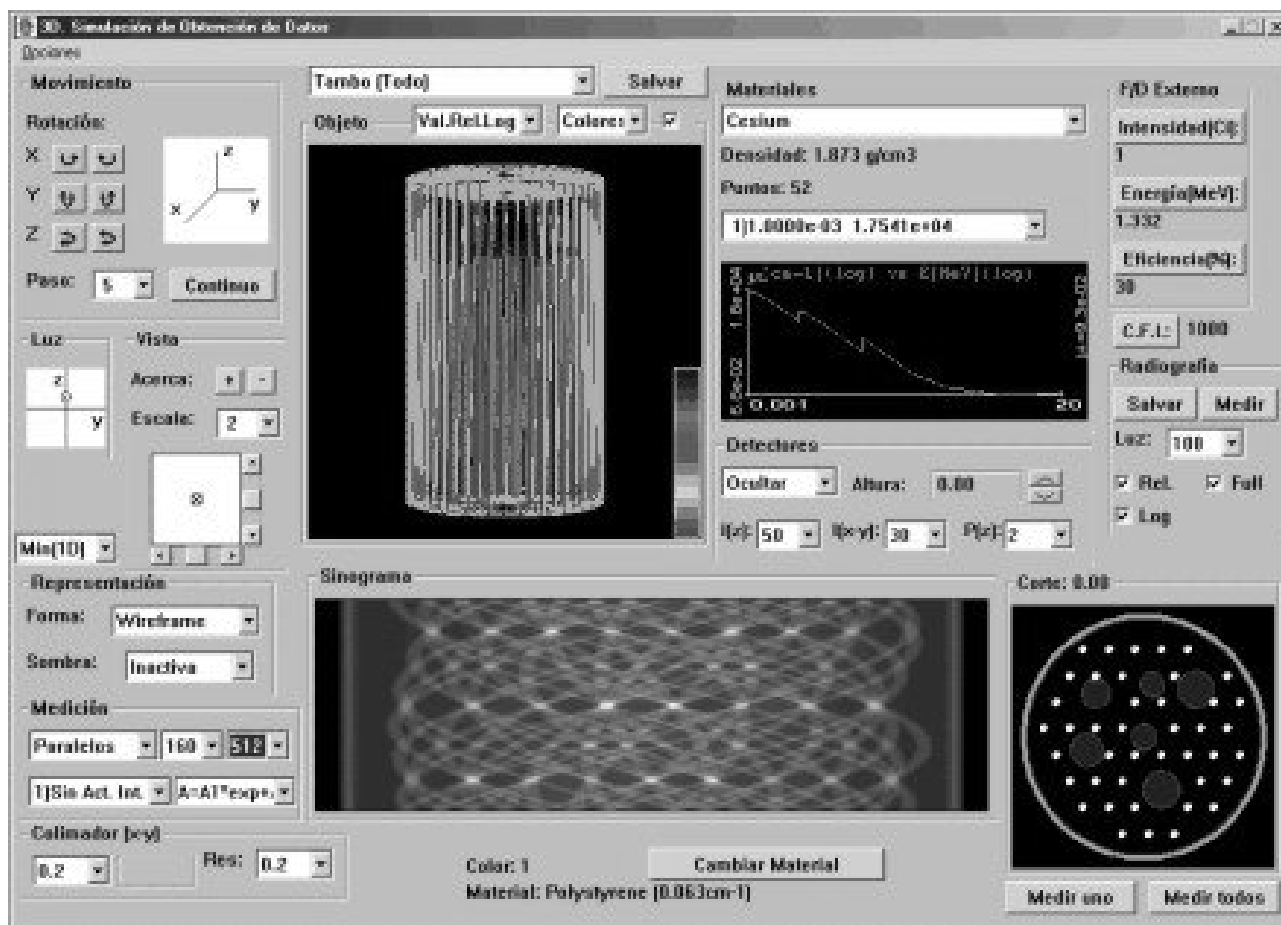


FIGURA 7. Programa para la reconstrucción de imágenes mediante las proyecciones.

ritmos de reconstrucción [10,11], aunque el tiempo de medición puede ser muy largo. En múltiples aplicaciones industriales de tomografía, el tiempo no es el factor más importante, sino la resolución.

6. Software para radiografía y tomografía de rayos gamma

Tomando como base las Secs. 2, 3, 4 y 5 se desarrolló un programa de cómputo que permite reconstruir imágenes mediante tomografía de rayos gamma. Utilizando la información sobre mediciones de atenuación de los rayos gamma se obtienen imágenes planas del interior del objeto que atraviesa la radiación [11].

Existen muchos factores asociados a la adquisición de datos en tomografía que dificultan la reconstrucción de imágenes. El estudio experimental detallado de estos factores exige gran cantidad de tiempo de recolección. Para compensar este tiempo, predecir algunos resultados y ajustar las mediciones, se desarrolló un modelo computacional de simulación del TGL. Este modelo está implementado en un software que permite la adquisición de datos mediante la simulación descrita en la Sec. 3 y basada en la validación realizada en las Secs. 4 y 5. El software incluye el programa desarrollado pa-

ra la reconstrucción de radiografías y tomografías de rayos gamma.

Para ilustrar las diferencias en las imágenes obtenidas, así como las capacidades del software desarrollado se simuló diferentes radiografías y tomografías de rayos paralelos del contenedor de la Fig. 2, utilizando una energía de la fuente de 1.17 MeV, con una intensidad de 1 Ci, 80 proyecciones y 256 rayos por proyección, y un colimador de 0.5 cm de diámetro, y para el caso de la radiografía un colimador de 1×1 cm, los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 6.

En la Fig. (6a) podemos observar las diferencias existentes entre la radiografía y la tomografía obtenida con un corte transversal a la altura del cilindro representado por (4) en la Fig. 2. La tomografía, nos proporciona información sobre la longitud del cilindro, la altura del bloque de plomo (3) y el espesor de la placa de acero (6) como aparecen en la Fig. 2. Esta información es imposible de obtener en la radiografía.

Finalmente se simuló tomografías para dos vistas laterales del contenedor con 180° de diferencia entre ellas y 90° respecto de la Fig. 6(a), los resultados se muestran en las Figs. 6(b) y 6(c).

En la Fig. 6(b) se puede ver que la radiografía así medida oculta mucha información sobre el interior del contenedor, en tanto que la tomografía muestra una descripción detallada de

los objetos dentro del contenedor. El mismo fenómeno se observa en la Fig. 6(c). El contenedor en la Fig. 6(c) está rotado 180° con respecto de la Fig. 6(b).

Los resultados anteriores permiten establecer que los métodos de reconstrucción, implementados para las mediciones que se obtendrán con el tomógrafo, funcionan correctamente en todas sus transformaciones.

En la Fig. 7 se muestra una pantalla del programa desarrollado, el cual permite, entre otras:

- Manipular diferentes patrones de atenuación y emisión, incluyendo las mediciones de objetos tridimensionales, así como utilizar geometrías de rayos paralelos y divergentes, con diferente cantidad de proyecciones y rayos.
- Reconstruir imágenes de las proyecciones mediante el método de retroproyección con varios tipos de filtros o núcleos de transformación, mediante convolución o filtrado en frecuencia, y para diferente tipo de interpolación entre rayos.
- Calcular los errores en la reconstrucción en 2D y 1D. Análisis gráficos y numérico de proyecciones y retroproyecciones.

7. Demostración

En las Secs. 4, 5 y 6 se demostró la validez del modelo utilizando datos experimentales y generados mediante el modelo de atenuación gamma propuesto. Con el propósito de mostrar el alcance y validez de los modelos propuestos en el presente trabajo se utilizó el programa de simulación y reconstrucción de la Sec. 6 para obtener tomografías de un contenedor de desechos radioactivos. Los resultados de la simulación y de la reconstrucción tomográfica así obtenida se pueden usar para realizar diseños preliminares de sistemas tomográficos, pues además se obtiene información relacionada con la resolución y los límites de detección

7.1. Simulación de un contenedor de desechos

El contenedor de desechos seleccionado es un contenedor utilizado por el US DOE para otros estudios tomográficos [4]. El contenedor es un contenedor estándar de acero de 55 galones. En su interior se encuentran 42 barras cilíndricas de 0.8 cm de radio y 65 cm de altura, de uranio. También hay otros seis cilindros con radios que van desde 2.5 cm hasta 4 cm y una altura de 50 cm conteniendo cesio 137 en su interior. Estos últimos cilindros tienen una cubierta de aluminio de 2 mm de grosor. Todos los cilindros internos están fijos en una matriz de soporte de poliestireno. Además hay una cubierta cilíndrica de 3 mm de grosor, entre la matriz y el tambo, de cloruro de polivinilo.

Una representación *wireframe* del contenedor se muestra en la Fig. 8a. Los colores de la figura corresponden al valor de atenuación μ del material a un energía de 661 keV

utilizando una escala logarítmica. El color rojo representa el valor correspondiente al uranio [2.5 cm^{-1}] y el azul oscuro representa el poliestireno [0.088 cm^{-1}]. Los resultados de los cálculos de simulación y las razones de conteo así obtenidas ($I(\theta, t)$) para el contenedor se transformaron en una radiografía simulada del contenedor como se muestra en la Fig. 8b. Aquí la mayor razón de conteo corresponde al color más oscuro. Los datos obtenidos por el modelo de simulación se utilizaron para generar cortes tomográficos, los resultados se presentan en la siguiente sección.

7.2. Resultados de la tomografía del contenedor simulado

Como se mencionó en la sección anterior, los datos obtenidos con el modelo de simulación se usaron como entrada para realizar una tomografía de dicho contenedor utilizando una

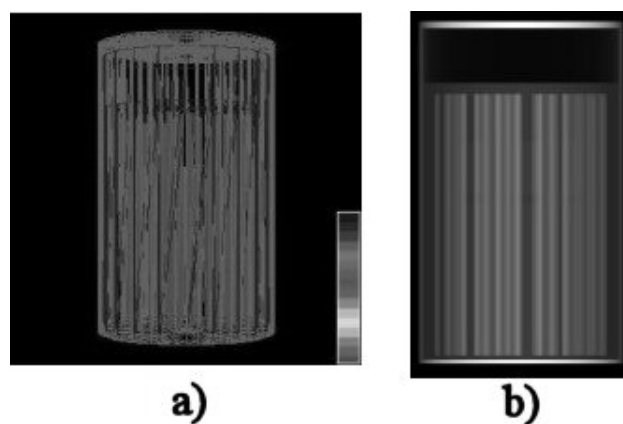


FIGURA 8. Dos vistas del contenedor de desechos utilizado.

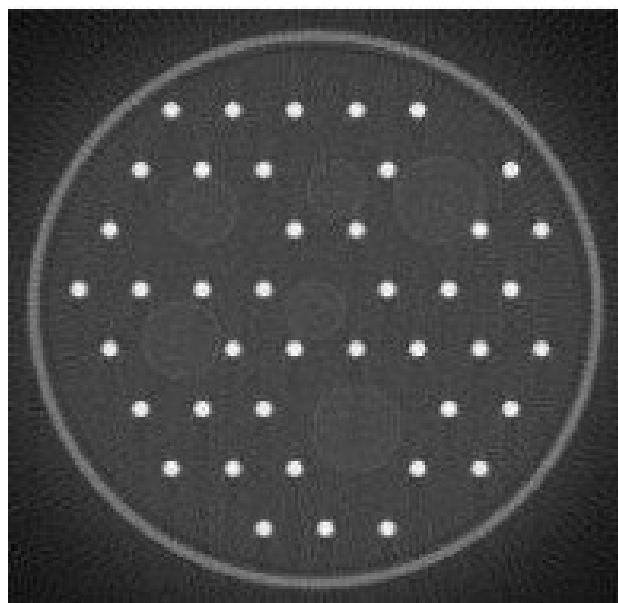


FIGURA 9. Corte tomográfico a la mitad de la altura del contenedor simulado.

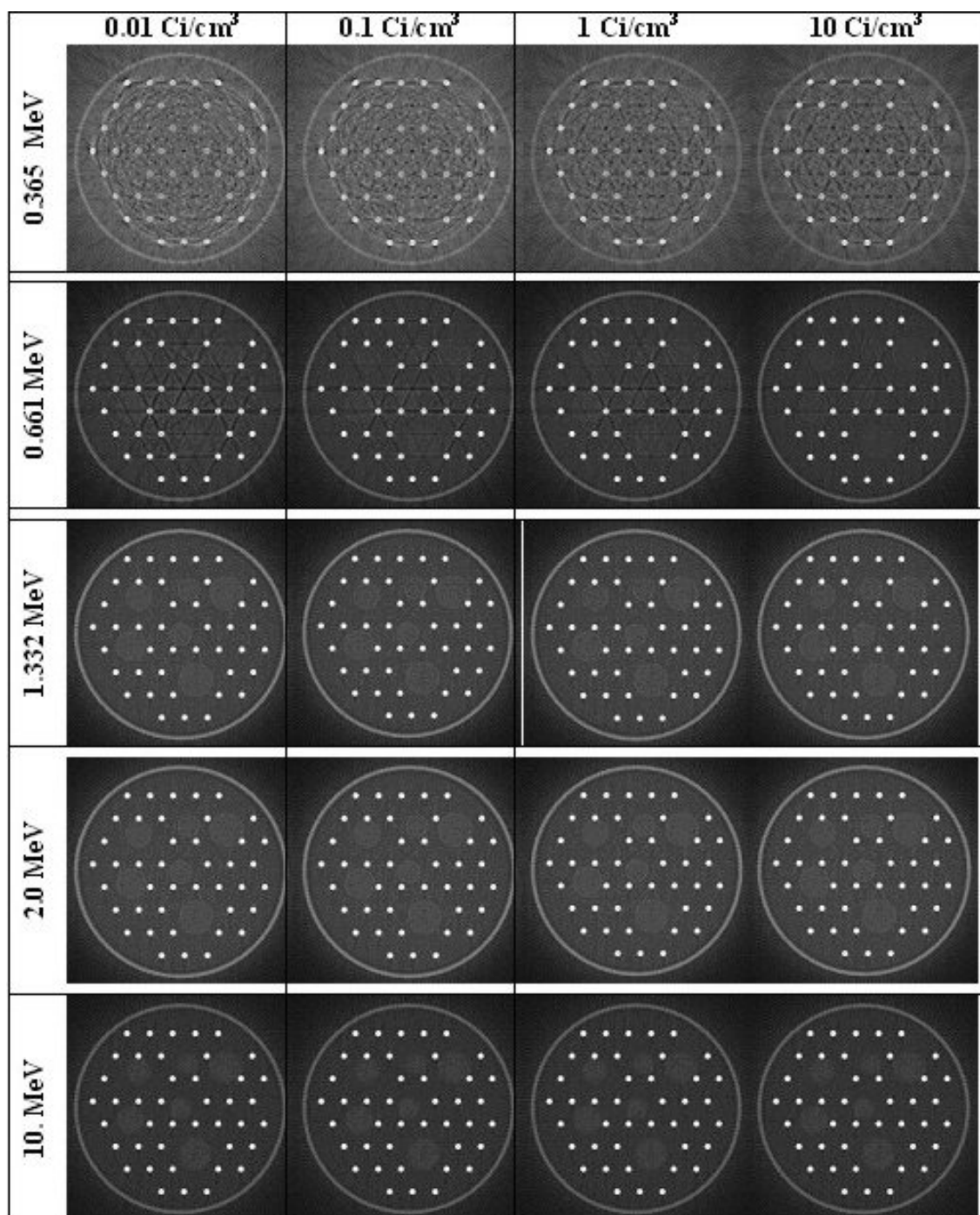


FIGURA 10. Cortes tomográficos tomados a la mitad del contenedor a diferentes energías e intensidades de la fuente externa.

fuentes de 1.332 MeV (^{60}Co) y 2 Ci. La eficiencia del detector fue del 30 % y la ventana del colimador de 4×4 mm. En estas condiciones se obtuvo una tomografía del contenedor, tomada a la mitad de su altura y con la misma fuente, mostrada en la Fig. 9. En la imagen así obtenida se pueden observar claramente las barras de uranio, las de cesio, el aluminio que cubre a las barras de cesio, el tambo de acero, etc.

Posteriormente, la intensidad de la fuente externa se varió desde 0.1 Ci hasta 10 Ci y la energía de la fuente desde

0.365 MeV hasta 10 MeV, produciendo así un total de 20 conjuntos de datos simulados. Estos valores se utilizaron para producir cortes tomográficos a la mitad de la altura del contenedor y los resultados se muestran en la Fig. 10.

Es evidente de la Fig. 10 que la energía de la fuente externa es el parámetro más importante, en comparación con la intensidad de la fuente cuando se pretende obtener una imagen precisa del contenedor. Para energías por debajo de 1 MeV, los cálculos para diferentes direcciones resultan en que cero

fotones alcanzan el detector y esto produce imágenes distorsionadas. Para una energía de 10 MeV es difícil distinguir entre *el liner*, la matriz el cesio y el aluminio, pues se pierden varios detalles. Como se puede notar, las mejores imágenes se obtienen utilizando las fuentes externas de 1.332 MeV and 2.0 MeV.

Finalmente, con el propósito de validar el modelo de atenuación propuesto, se reemplazó el material de empaque del contenedor (poliestireno) por Pyrex y por Teflon. Las imágenes obtenidas son muy similares a las mostradas en la Fig. 10, sin embargo cuando las comparamos resultó evidente que el Pyrex es el mayor atenuador de rayos gamma de los tres. Esto era de esperarse, dado que el Pyrex tiene el mayor coeficiente de atenuación lineal para las energías utilizadas, lo cual demuestra que el modelo de simulación es acorde con la teoría.

8. Conclusiones

Se puede concluir que el modelo de atenuación gamma utilizado [10,11], en conjunto con las bases de datos de los coeficientes de atenuación utilizadas [12], reflejan la dependencia energética que tienen los coeficientes de atenuación para cada material, lo cual está en total concordancia con la teoría y las mediciones experimentales.

Se establece que con el TGL se logra obtener mediciones con suficiente resolución (mayor que 1.6 mm) para lograr imágenes de alta calidad, acorde a lo que establecen los algoritmos de reconstrucción [10,11], aunque el tiempo de medición puede ser muy largo. En múltiples aplicaciones industriales de tomografía, el tiempo no es el factor más impor-

tante, sino la resolución.

El sistema de tomografía gamma desarrollado cumple con todos los requisitos necesarios para la obtención de los datos con la resolución necesaria.

Los sistemas de reconstrucción de imágenes desarrollados pueden utilizar la información del tomógrafo para reconstruir el interior de objetos industriales con la calidad requerida. Se puede obtener la distribución de actividades y la distribución de densidades.

Los resultados obtenidos permiten establecer que los métodos de reconstrucción, implementados para las mediciones que se obtendrán con el tomógrafo, funcionan correctamente en todas sus transformaciones.

Los resultados de la simulación y de la reconstrucción tomográfica, obtenida a partir de la simulación de la atenuación de rayos gamma, se pueden usar para realizar diseños preliminares de sistemas tomográficos, pues además se puede obtener información acerca de la resolución y de los límites de detección del tomógrafo a utilizar.

El software desarrollado permite:

- Manipular diferentes patrones de atenuación y emisión, así como utilizar geometrías de rayos paralelos y divergentes, con diferente cantidad de proyecciones y rayos.
- Reconstruir imágenes de las proyecciones mediante el método de retroproyección con varios tipos de filtros o núcleos de transformación, mediante convolución o filtrado en frecuencia, y para diferente tipo de interpolación entre rayos.

1. R. Duwe y P. Jansen, *Nuclear Engineering and Design* **130** (1991) 89.
2. P.D. Taggart, S.E. Betts y J.J. Vigil, "LANL's Mobile Nondestructive Assay and Examination Systems for Radioactive Wastes", *International Conference on Nuclear and Hazardous Waste Management*, Seattle (August 18-23 1996).
3. H.E. Martz, G.P. Roberson, R. Coutant y D.C. Camp, "Experimental A&Pct Research and Development Efforts to Characterize Mixed Wasted Forms", *Lawrence Livermore National Laboratory Report Ucl-Jc 110826* (December 1993).
4. United States Office of Science DOE 96-RCI-09 Department of and Technology, "Final Report for Non-Destructive X-ray Examination (NDE) and Non-Destructive Gamma Assay (NDA) of Transuranic (TRU) Waste Drums with Waste Inspection Tomography (WIT)" (August 1998) Washington, D.C.
5. G.T. Herman, *Image Reconstruction from Projections: The fundamentals of computerized tomography* (Academic Press, New York, 1980).
6. A.C. Kak y M. Slaney, *IEEE Press* (New York, 1987).
7. T.H. Prettyman, R.A. Cole, R.J. Estep y G.A. Sheppard, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sec. A* **356** (1995) 470.
8. E. Levitan y G.T. Herman, *IEEE Transaction on Medical Imaging* **6** (1987) 3.
9. D. Hearn y M.P. Baker, "Computer Graphics" (Prentice Hall, United States, 1995).
10. J.C. Palacios, L.C. Longoria, J. Santos y R.T. Perry, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A* **508** (2003) 500.
11. J. Santos, L.C. Longoria y J.C. Palacios, *Linear Algebra and its Applications* **339** (2001) 195.
12. M. Seltzer y J.H. Hubbell, "Tables and Graphs of Photon Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients for Photon Energies 1keV to 20 MeV for Elements z=1 to 92", *Ionizing Radiation Division*, Physics Laboratory, NIST, United States
13. R.C. González, R.E. Woods, *Digital Image Processing* (Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1992).