

SISTEMA GAMMA ESCANER TOMOGRAFICO AR-TGS

**Martínez Garbino, L. J.^{1,3}, Belzunce, M. A.^{2,3}, da Ponte, E.², Morales, P.¹, Fabbro, M.¹,
Ciavaro, M.¹, Verrastro, C. A.^{2,3}**

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica, PNGRR

² Comisión Nacional de Energía Atómica, Instrumentación y Control

³ Universidad Tecnológica Nacional, GIAR

RESUMEN

La Comisión Nacional de Energía Atómica está desarrollando un Gamma Escáner Tomográfico (AR-TGS). El sistema busca aumentar significativamente la sensibilidad usando dos tipos de detectores de radiación. Un detector de GeHP para realizar mediciones de Gamma Escáner Segmentado y un cabezal compuesto por seis detectores de NaI y sus respectivos colimadores. Con el prototipo desarrollado, se realizaron ensayos de un segmento de un tambor relleno de arena con fuentes puntuales del Cs137 y Co60 de distintas actividades, colocadas en diferentes posiciones espaciales. Mediante estas mediciones, se localizaron las distintas fuentes con sus intensidades relativas logrando tiempos de medición breves.

1. INTRODUCCIÓN

El manejo de los residuos radioactivos es una etapa clave dentro del ciclo de combustible y otras aplicaciones de las radiaciones ionizantes como ser industriales y médicas. Durante el manejo de los mismos es necesaria su caracterización y verificación. En numerosos casos y de acuerdo al tipo de residuo, este estudio se realiza utilizando técnicas basadas en espectrometría Gamma mediante Ensayos No Destructivos.

Una forma frecuente de almacenar residuos radioactivos es en tambores de 200 l, compactados o cementados para su inmovilización, que se identifican apropiadamente. La caracterización y/o verificación consiste en determinar el tipo y actividad de los radioisótopos dentro del mismo, estos datos junto con la información relativa al origen y/o corriente del residuo es utilizada para alimentar la base de datos del inventario radiológico del lugar donde será almacenado.

Particularmente para los tambores de residuos, la caracterización consiste en la cuantificación de los radioisótopos y su distribución espacial. Los tambores cementados son acondicionados de manera de que su distribución de actividad sea homogénea y por lo tanto es importante corroborar esta característica luego de su acondicionamiento. Para los tambores compactados la matriz es heterogénea, en este caso se debe caracterizar la distribución espacial de actividad, además de los radioisótopos contenidos.

Un Gamma Escáner Segmentado (SGS) es una herramienta que identifica el tipo de radioisótopos dentro de un tambor y sus correspondientes actividades. Este equipo realiza una espectrometría Gamma analizando varios segmentos de altura constante. Así aporta información del contenido radioactivo en cada segmento. Esta clase de medición es útil para tambores cementados donde, por diseño, la actividad del tambor es uniforme. En el caso de los residuos compactados, debido a que su matriz es heterogénea, es necesaria una técnica

que aporte información espacial en tres dimensiones, por lo que resulta necesaria una técnica Tomográfica, y el equipo que realiza esta medición es un Gamma Escáner Tomográfico (TGS). Se genera una imagen tridimensional de la distribución de actividades de cada fotopico, mediante la técnica de tomografía por emisión de fotón único (SPECT) rotando el tambor y desplazando el conjunto detector-colimador en las direcciones axial y transversal.

En el año 1997 la CNEA adquirió un SGS. En pocos años el equipo dejó de estar operativo por problemas de software. El fabricante del equipo no brinda soporte para la actualización y en su lugar ofreció un equipo nuevo. Debido a que el hardware del equipo (detector y sistema mecánico) está en perfectas condiciones se decidió reemplazar todo el sistema de adquisición electrónico y software por instrumentación desarrollada en CNEA. Esta tarea se concretó con éxito y a continuación se comenzó a trabajar en el agregado de capacidad Tomográfica al equipo existente (AR-TGS) [1,2,3]. En el presente trabajo se hace un repaso por los distintos aspectos del diseño y se muestran los resultados obtenidos hasta el momento.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. Diseño de colimadores

Dado que la técnica tomográfica utilizada está basada en SPECT, para conocer la dirección de del fotón es necesario la utilización de un colimador. Cuanto menor sea la apertura del mismo se puede alcanzar una mejor resolución espacial. Sin embargo, esto trae aparejado una importante pérdida de sensibilidad incrementando el tiempo necesario para la realización de un ensayo. Por lo tanto los parámetros principales en el diseño de los colimadores son la sensibilidad y la resolución espacial. Como ambas características, en general se contraponen para un mismo tipo de detector, es necesario encontrar el punto de equilibrio entre ambas características. Mediante simulaciones basadas en GATE/GEANT4, se ensayaron tres configuraciones diferentes. La primera llamada AM, la segunda A4 y la tercera AU [1]. Un esquema de las mismas se muestra en la Fig. 1

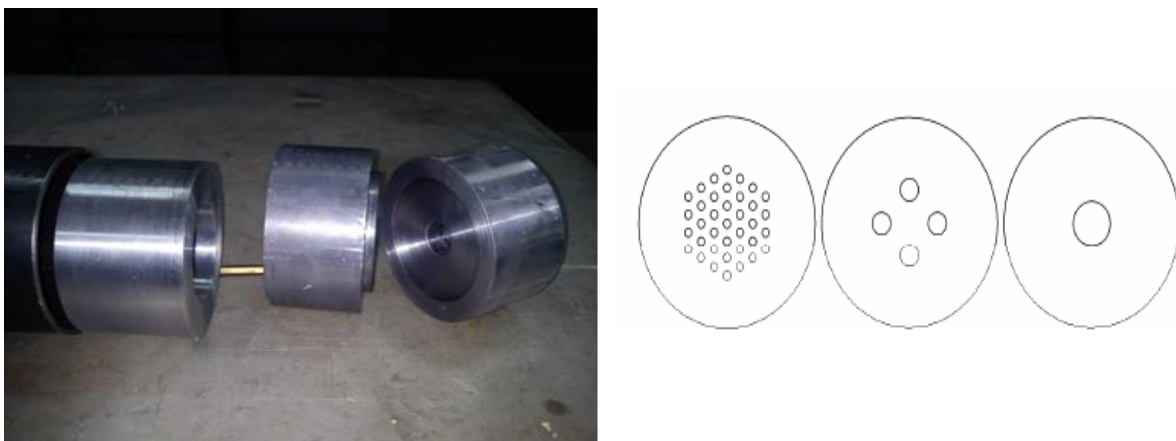


Figura 1. Conjunto Blindaje-Colimador (izq), geometría de los colimadores probados (der) AM, A4 y AU.

A fin de medir la sensibilidad se simuló un tambor de 200l, con 10 mCi de Co-60 distribuidos uniformemente y detectores de NaI 2M2 (Ioduro de sodio activado con Talio de dos pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de espesor), tomando como cifra de merito la cantidad de cuentas detectados dentro de la ventana de energía. Los resultados se muestran en la tabla 1, donde se observa que el colimador AU es el de mejor sensibilidad [1]. La figura 1 muestra un colimador junto con el blindaje para el Fotomultiplicador.

Tabla 1. Resultados de simulación de colimadores

Tipo de Colimador	Tasa total [cps]	Tasa en ventana [cps]	Sensibilidad[cps/ μ Ci]
AM	3902.9	562.8	2.81
A4	4501.4	740.0	3.70
AU	6124.4	1193.3	5.96

2.2. Elemento Detector Tomográfico

En este diseño se toma ventaja de las excelentes propiedades de sensibilidad del Ioduro de Sodio a pesar de su pobre resolución energética, para compensarla se mantiene el detector de Germanio hiperpuro, que se utiliza para identificar las zonas del espectro con mayor actividad. Así el Elemento Detector Tomográfico (EDT) está constituido por un cristal centellador 2M2 de NaI(Tl), sobre el cual se encuentra montado el tubo fotomultiplicador (PMT), el colimador y un Procesador Digital de Pulsos (PDP) [4,5], este último es el encargado de procesar los destellos generados por los rayos gamma en el cristal, estimando su energía, para dar como resultado un Espectro de Energía. El PDP posee toda la electrónica asociada al detector como ser, Polarización del PMT, Preamplificador, Tensión de Polarización, etc. La señal de salida del PMT es acondicionada por el Preamplificador Conformador de Pulsos y digitalizada mediante un ADC de 10 bits operando a 40 MHz. El procesamiento es realizado en una FPGA de la familia Spartan3 de Xilinx. El sistema cuenta con un canal de comunicación serie para ser conectado a una PC mediante un protocolo basado en MODBUS. La figura 2 muestra el sistema de detección y procesamiento.

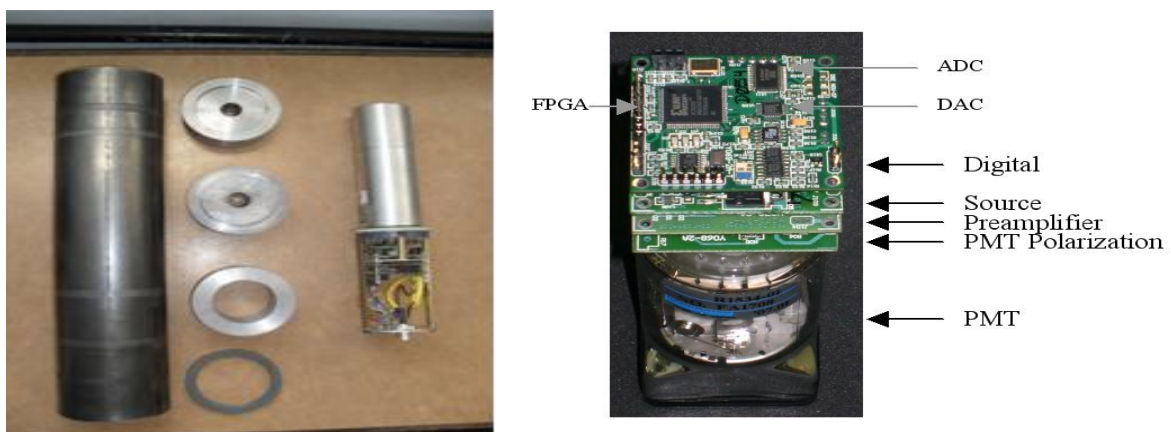


Figura 2. Izq: Despiece de un elemento detector. Der: detalle de la Unidad de Procesamiento de Pulsos.

La detección de un evento (pulso) así como la estimación de Energía del mismo es implementada mediante Procesamiento Digital de Señales. El desarrollo de los algoritmos de estimación de Energía, el ajuste de los parámetros de estos y el dimensionamiento aritmético se lleva a cabo con el soporte de un simulador Monte Carlo propietario [6,7]. Típicamente la estimación de Energía conduce a una relación de compromiso entre la Tasa Máxima y la resolución de Energía de los pulsos, siendo estas características antagónicas. El simulador permite optimizar el tipo de procesamiento de acuerdo al parámetro que se desea optimizar. La figura 3 muestra el resultado de la comparación del desempeño en resolución de energía de dos tipos de algoritmos, con la misma capacidad de Tasa Máxima, en la misma se observa que el Estimador llamado *Suma12* (promedio móvil de 12 muestras), es superior en todo el rango de energías respecto del algoritmo llamado *Muestra Máxima* (interpolación del pico del pulso).

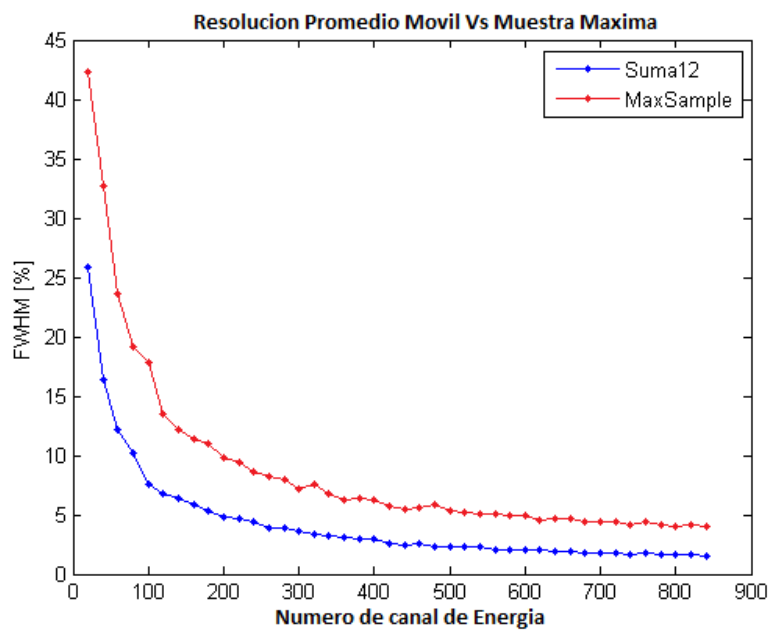


Figura 3. Comparación de algoritmos para estimación de Energía

2.3. Cabezal Detector

Si bien para el ensayo Tomográfico es suficiente un único detector que moviéndose en la dirección horizontal recorra todo el ancho del tambor, a fin disminuir el tiempo de adquisición y considerando que los detectores seleccionados (NaI) son económicamente accesibles, se utilizan seis detectores con sus respectivos colimadores. Los mismos son conectados a un sistema llamado Concentrador. Este sistema hace de interfaz entre los seis detectores y el software de aplicación en PC mediante una conexión USB. Este conjunto conforma el Cabezal Detector. La figura 4 muestra el conjunto de detectores con su electrónica asociada y el Concentrador.



Figura 4. Conjunto de detectores

2.4. Sistema de Posicionamiento

Para la reconstrucción de imágenes en 3D, es necesaria la adquisición con tres grados de libertad espaciales. En nuestro caso: rotación, movimiento horizontal y vertical. La rotación se logra mediante el sistema mecánico del SGS, del cual se utiliza además el sistema de carga y descarga de tambores. Para el resto de los movimientos del Cabezal de Detección se desarrollo un sistema electromecánico. Este permite controlar la velocidad de movimiento y posición tanto en la dirección vertical como horizontal. La figura 5 muestra el sistema mecánico completo, el agregado mecánico se muestra en color naranja, el resto es parte del equipo SGS. En la misma figura se muestra un detalle del cabezal con el sistema de desplazamiento horizontal. Todo esto es controlado por un sistema electrónico y se interface con la aplicación de PC mediante una conexión USB.

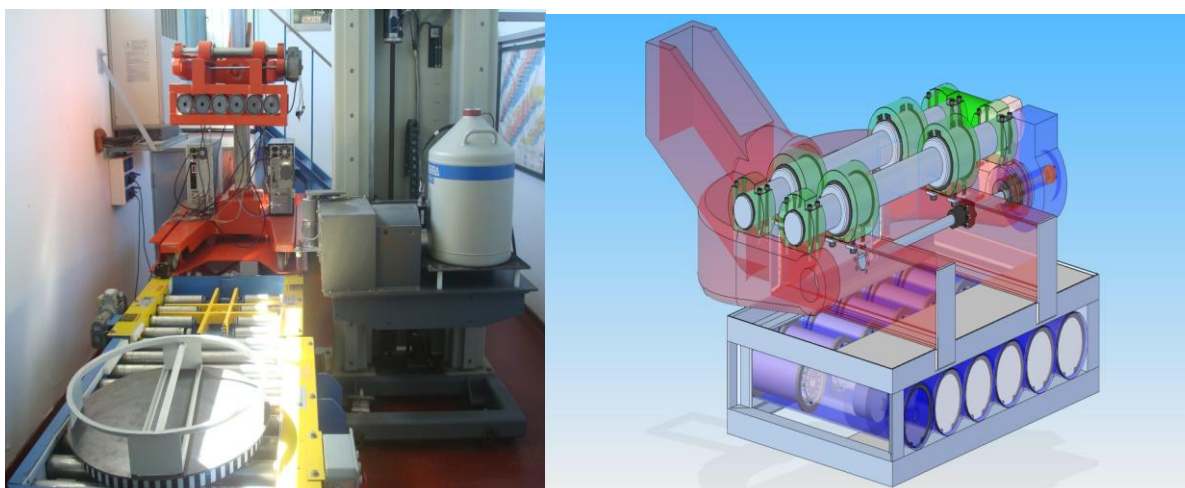


Figura 5. Sistema de posicionamiento mecánico

2.5. Reconstrucción Tomográfica

Para la reconstrucción tomográfica el volumen del tambor es dividido en segmentos de altura constante. A cada uno se le hace una tomografía por emisión de fotón único rotando el tambor y moviendo el Cabezal Detector en las direcciones axial y transversal. Luego con los espectros medidos en cada posición $X-\Omega$ se generan Sinogramas [8]. Las imágenes son generadas utilizando el algoritmo de reconstrucción 2D MLEM [8]. El mismo tiene en cuenta el Angulo solido de apertura del colimador además de la atenuación y penetración en el mismo. Para cada segmento medido se genera un sinograma 2D usando una ventana de energía para Cs137 de 591-731 keV y para Co60, de 1000-1500 keV. Para la corrección por dispersión se utilizo el método de triple ventana de energía. La figura 6 muestra un esquema de la geometría de medición.

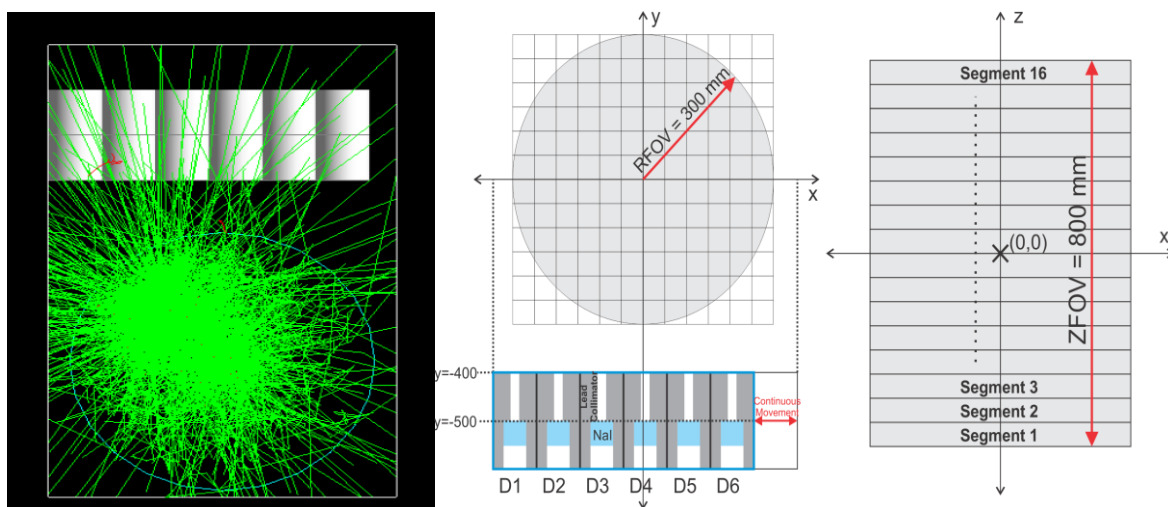


Figura 6. Geometría de medición

3. RESULTADOS

3.1. Reconstrucción Bidimensional

Para esta medición se construyo un fantoma de un segmento de tambor relleno de arena, en el cual se introdujeron 3 fuentes puntuales de Cs137 con actividades de $5\mu\text{Ci}$, $100\mu\text{Ci}$ y $200\mu\text{Ci}$ localizadas en diferentes puntos de un mismo plano. Se realizaron adquisiciones en 10 posiciones horizontales del cabezal espaciadas 1cm, y 60 posiciones angulares de 6° , obteniéndose un espectro de energía por cada detector por cada posición lo cual arroja un total de 3600 espectros. La adquisición duro 10 min. Con estos datos se reconstruyo la imagen. La figura 7 izquierda muestra la configuración para la medición, en donde se indican las fuentes y sus posiciones. La figura 7 derecha muestra el resultado de la reconstrucción tomográfica con tres algoritmos diferentes donde se destaca el algoritmo ACOR[3]. Debido a

la diferencia de actividades entre las fuentes es necesario aumentar el contraste de la imagen para ver la fuente de menor actividad, como se muestra en las figuras de la parte inferior.

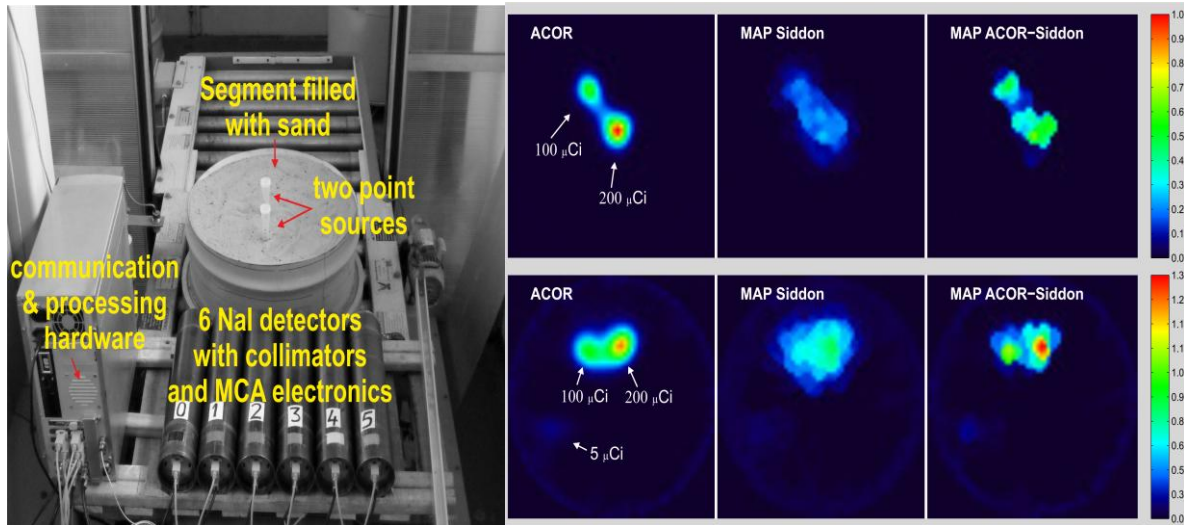


Figura 7. Izq: arreglo de medición. Der: resultados de diferentes algoritmos de reconstrucción

3.2. Reconstrucción Tridimensional

Para esta medición se utilizó el mismo fantoma de un segmento de tambor relleno de arena, en el cual se introdujeron 5 fuentes puntuales, 4 de ^{137}Cs de actividades $10\mu\text{Ci}$, $20\mu\text{Ci}$, $100\mu\text{Ci}$ y $200\mu\text{Ci}$ y una de ^{60}Co de actividad $30\mu\text{Ci}$, distribuidas espacialmente. Se realizaron adquisiciones en 10 posiciones horizontales espaciadas en 1cm, 10 posiciones verticales espaciadas en 2cm y 60 posiciones angulares de 6° , obteniéndose un espectro de energía por cada detector por cada posición lo cual arroja un total de 36000 espectros. La adquisición duró 80 min. Con estos datos se reconstruyó la imagen de la figura 8, donde se pudo observar la localización de todas las fuentes y sus intensidades relativas [8].

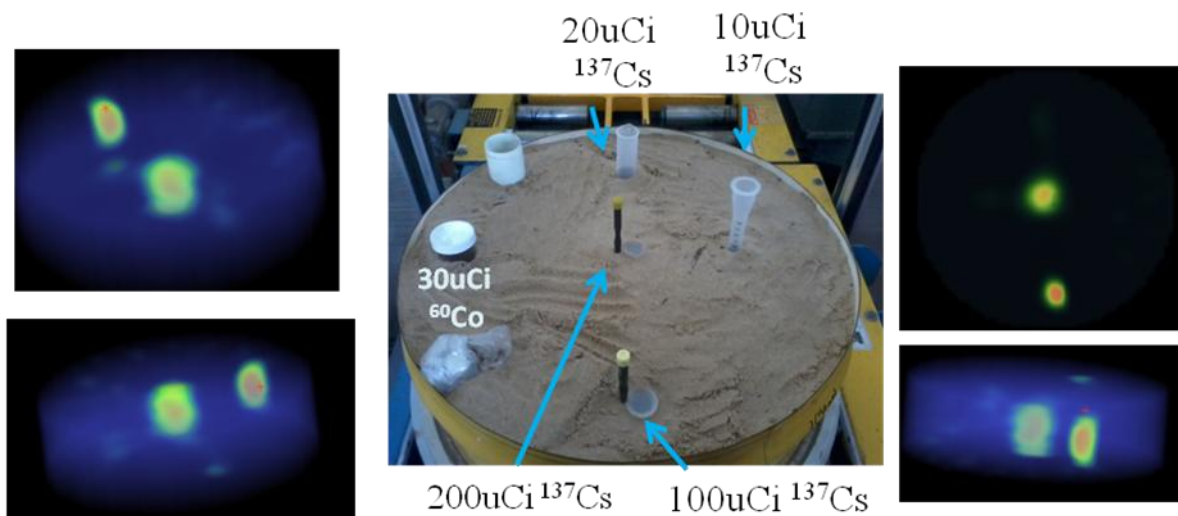


Figura 8. Medición 3D

4. CONCLUSIONES

Se implementó de un prototipo funcional incluyendo el desarrollo de los sistemas electrónicos, mecánicos y software de aplicación. Todas las etapas de diseño fueron validadas ya sea mediante simulación y/o mediciones. La reconstrucción de imágenes de fantasmas reales permitió validar el sistema completo. Los resultados obtenidos como se muestra en las imágenes son alentadores cumpliendo las especificaciones de diseño y logrando mantener tiempos de medición cortos lo cual resulta una característica destacable en la medición de residuos radioactivos.

5. REFERENCIAS

- [1] Venialgo, E., Belzunce, M.A., Verrastro, C.A., Martínez Garbino, L.J., da Ponte, E., Alarcón, J.E., Carimatto, A.J., Estryk, D.S. and Prieto, I., "Analysis and Comparison of Tomographic Gamma Scanner (TGS) Architectures for Nuclear Waste Characterization Systems", *XXXV International Symposium "Scientific Basis for Nuclear Waste Management"*, Buenos Aires, Argentina, October 2 - 7, 2011. MRS Proceedings, 1475, imrc11-1475-nw35-o33 doi:10.1557/opl.2012.628.
- [2] Belzunce, M.A., Verrastro, C.A., Venialgo, E., da Ponte, E., Carimatto, A.J., Martínez Garbino, L.J., Alarcon, J.E., Estryk, D.S., "An attenuated projector for iterative reconstruction algorithm of a novel Tomographic Gamma Scanner," *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2012 IEEE* , vol., no., pp.951,957, Oct. 27 2012-Nov.3 2012 doi: 10.1109/NSSMIC.2012.6551248.
- [3] Belzunce, M.A., Verrastro, C.A., Martínez Garbino, L.J., Venialgo, E., da Ponte, E., Carimatto, A.J., Alarcon, J.E., Estryk, D.S., Cohen, I.M., "An Attenuated Projector for Iterative Reconstruction Algorithm of a High Sensitivity Tomographic Gamma Scanner," *Nuclear Science, IEEE Transactions on* , vol.61, no.2, pp.975,984, April 2014 doi: 10.1109/TNS.2014.2302454.
- [4] Estryk, D.S., Verrastro, C.A., Marinsek, S., Belzunce, M.A., Venialgo, E., "FPGA hierarchical architecture for a Positron Emission Tomography Scanner," *Programmable Logic Conference (SPL), 2010 VI Southern* , vol., no., pp.113,118, 24-26 March 2010 doi: 10.1109/SPL.2010.5483028.
- [5] Estryk, D.S., Rios, G.E., Verrastro, C., "FPGA Neural Networks Implementation for Nuclear Pulses Parameters Estimation," *Programmable Logic, 2007. SPL '07. 2007 3rd Southern Conference on* , vol., no., pp.7,12, 28-26 Feb. 2007 doi: 10.1109/SPL.2007.371716.
- [6] Martínez Garbino, L.J., Venialgo, E., Estryk, D.S., Verrastro, C.A., Belzunce, M.A., "A Pulse Modeling Tool for PET Scanners", *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, Seattle, EEUU , Noviembre 2014.
- [7] Martínez Garbino, L.J., Verrastro, C.A., Belzunce, M.A., "Verificación de Algoritmos DSP en FPGA para Espectrometría Gamma", *Congreso Regional en Instrumentación Avanzada CRIA 2014*, Santa Clara, Costa Rica, 17 al 19 de diciembre de 2014.
- [8] Belzunce, M.A., Martínez Garbino, L. J., Verrastro, C.A., da Ponte, E., "3D Imaging in Non Destructive Assays of Nuclear Waste Drums", *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, Seattle, EEUU , Noviembre 2014.