

CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA DEL ESPECTRÓMETRO AMPTEK XR-100-CdTe MEDIANTE SIMULACIÓN MONTE CARLO CON EL CÓDIGO PENELOPE

CHARACTERIZATION OF THE XR-100-CdTe AMPTEK SPECTROMETER RESPONSE BY MEANS OF MONTE CARLO SIMULATIONS USING THE PENELOPE CODE

N. E. Martín^{*1,2}, M. Sofo Haro³ y M. Valente^{**1,2,4}

¹Instituto de Física Enrique Gaviola, CONICET, FAMAF, UNC,
Av. Medina Allende, Córdoba, 5000, Argentina.

²Laboratorio de Investigaciones e Instrumentación en Física Aplicada a la Medicina e Imágenes por Rayos X - LIIFAMIR[®], FAMAF,
Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, 5000, Argentina.

³Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA,
Av. Exequiel Bustillo 9500, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.

⁴Centro de Física e Ingeniería en Medicina CFIM, Depto. de Ciencias Físicas, Universidad de la Frontera, Temuco, 4780000, Chile.

Recibido: 21/12/2021; Aceptado: 04/05/2022

En los últimos años, el estudio de la espectrometría de rayos X ha logrado avances significativos en diversas áreas de la ciencia, lo que ha permitido masificar la utilización de la radiación ionizante en muchas aplicaciones de la tecnología moderna. Un sistema típico de espectrometría de rayos X consiste en un conjunto integrado de dispositivos capaces de convertir la radiación incidente en una señal eléctrica detectable. Resumidamente, los componentes principales incluyen: el volumen sensible (detector), el dispositivo de procesamiento de pulsos (multicanal), y el software asociado. El telurio de cadmio se ha introducido como un material semiconductor adecuado para el volumen sensible, ya que presenta una mayor eficiencia en comparación con los diodos de silicio. En este contexto, el espectrómetro Amptek XR-100T-CdTe ha ganado amplias aplicaciones durante los últimos años, principalmente debido al desempeño reportado por el fabricante asegurando alta eficiencia hasta 100 keV, junto a la alta tasa de conteo que es capaz de resolver. El presente trabajo analiza, mediante simulaciones Monte Carlo, la respuesta del detector Amptek XR-100T-CdTe teniendo en cuenta, individualmente, la contribución de los diferentes componentes del espectrómetro a la señal de respuesta. Para ello, las propiedades geométricas y de composición elemental de los diferentes componentes se han incluido cuidadosamente en la configuración de la simulación. Implementando una metodología basada en *kernels*, se obtuvo la respuesta del detector a haces de rayos X mono-energéticos estrechos con energía dentro de [5-1000] keV, discriminando la contribución relativa de los diferentes componentes del espectrómetro. Finalmente, los resultados de la simulación se compararon con la curva de eficiencia reportada por el fabricante, mostrando una buena concordancia para el volumen sensible a CdTe y la ventana de vacío.

Palabras claves: respuesta de espectrómetro de rayos X, Amptek XR-100T-CdTe, simulación Monte Carlo.

In recent years, the study of X-ray spectrometry has promoted significant advances in various scientific areas, thus increasing the implementation of ionizing radiation in many applications of modern technology. Typical X-ray spectrometry systems consist of a set of devices that allow this radiation to be converted into a detectable electrical signal. The main spectrometer components include: the sensitive volume (detector), the multichannel pulse processing device, and the associated software. Cadmium telluride (CdTe) has been introduced as a suitable bulk-sensing semiconductor material that reports higher efficiency compared to silicon diodes. Then, the Amptek XR-100T-CdTe spectrometer, has gained wide applications during the last years, mainly due to its performance achieving high efficiency up to 100 keV. The present work reports on the characterization of detector response for the Amptek XR using Monte Carlo simulations, while separately accounting for the contribution of the different spectrometer components. To this aim, the geometry along with the elemental composition properties of the different components have been carefully included in the simulation setup. A kernel based approach has been implemented to study the response of the detector using narrow monoenergetic X-ray beams having incident kinetic energy within [5-1000] keV, and discriminating the relative contribution for each kernel attributable to the different spectrometer components. Finally, the simulation results have been compared with the efficiency curve reported by the manufacturer, showing good agreement with the kernel based approach characterization when the CdTe sensitive volume along with the Be vacuum window are taken into account.

Keywords: X-ray spectrometer response, Amptek XR-100T-CdTe, Monte Carlo simulation.

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2022.33.2.42>



ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, los avances en el estudio de los detectores de radiación ionizante han permitido am-

* nico_martin93@hotmail.com ** mauro.valente@gmail.com

pliar su utilización y aplicación en diversas áreas tecnológicas. La extensión en el uso de los detectores de rayos X a diversas áreas incluye no sólo los usos tradicionales en investigación científica en física de altas energías, física nuclear e investigación médica, sino también la utilización en instalaciones industriales o de uso comercial que incluyen diagnósticos médicos y dentales e involucran imágenes [1, 2]. Si bien la tecnología de detección de radiación ha evolucionado para abordar estas aplicaciones científicas e industriales, los avances tecnológicos a nivel mundial han creado nuevos desafíos y demandas en la tecnología de detección de radiación. En este sentido, actualmente la detección de radiación es más que una simple indicación de la presencia de radiación. El resultado esperado de determinaciones espectrométricas incluye, como mínimo, una medida de la cantidad de radiación y también debe incluir información sobre la energía, el tipo o la ubicación de la radiación [3]. Resumida y sintéticamente, los sistemas de detección modernos constan de tres componentes: el volumen sensible (detector) y la instrumentación asociada que proporciona la señal de medida real, éstos dos conforman el *hardware*, y el *software* de control y procesamiento. Por tanto, un detector de radiación es un dispositivo capaz de proporcionar una señal analizable cuando partículas cargadas o las radiaciones electromagnéticas lo atraviesan. Según la composición del volumen sensible, existen diferentes tipos de sistemas de detección de radiaciones como son los detectores gaseosos, los centelladores o los detectores de estado sólido. Los sistemas de detección que utilizan como material sensible sustancias gaseosas, presentan algunas desventajas principalmente asociadas a baja eficiencia para varios tipos de radiaciones. Contrariamente, se conoce la mayor eficiencia en la respuesta de los detectores de estado sólido, ya que presentan mayor probabilidad de interacción [4]. En el grupo de detectores de estado sólido, se encuentran los semiconductores que ofrecen importantes ventajas comparativas, ya que además de la mayor densidad, en general, cuando están ionizados por acción de radiación incidente, la carga eléctrica puede ser colectada por medio de la aplicación de un voltaje externo. Los materiales más comunes para detectores semiconductores son silicio y germanio, aunque más recientemente se está estableciendo también el telurio de cadmio [5]. Este último se ha introducido como un material semiconductor adecuado para el volumen sensible que reporta potencialmente una mayor eficiencia en comparación con los diodos de silicio.

En este trabajo se presenta una metodología para caracterizar la respuesta de un espectrómetro mediante simulaciones Monte Carlo, basadas en adaptaciones del código PENELOPE, para estudiar la respuesta en términos de la contribución relativa de cada uno de los principales componentes del dispositivo. Para tal fin, la metodología desarrollada se utilizó para caracterizar al espectrómetro Amptek XR-100T-CdTe, ya que este equipamiento ha ampliado sus aplicaciones durante los últimos años debido a su alto desempeño.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

El abordaje propuesto consiste, principalmente, de modelar los efectos físicos de transporte y colisión de la ra-

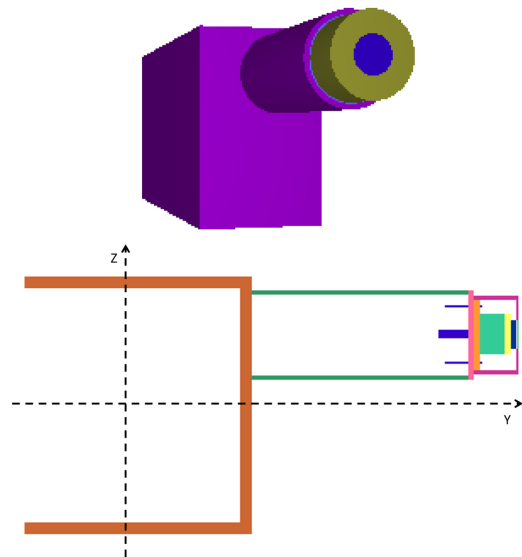


FIG. 1: Visualización 2D y 3D del detector XR100-CdTe completo con las carcasas externas. En la imagen superior, en color violeta se observa la carcasa de aluminio que cubre el circuito electrónico del mismo, en amarillo la prolongación de níquel donde se ubica el material sensible (cristal de CdTe) y en azul la ventana (Be). En la imagen inferior se observa un corte transversal del detector donde se muestran los componentes básicos más próximos al material sensible.

diación incidente en la geometría representativa del espectrómetro de estudio, caracterizando separadamente la contribución de cada uno de los principales componentes del dispositivo a la respuesta integral. Para la simulación estocástica del transporte de radiación y las interacciones en el material del detector, se empleó el método Monte Carlo, que es una técnica estadística, utilizada para resolver problemas matemáticos complejos a través de la generación de variables aleatorias.

Modelo Monte Carlo basado en PENELOPE

Para simular los procesos y fenómenos involucrados en la irradiación de un espectrómetro con un haz de rayos X, se utilizó PENELOPE [6], que es una herramienta Monte Carlo moderna y de uso general para simular el transporte de radiación ionizante en la materia. PENELOPE describe el transporte acoplado de fotones, electrones y positrones en geometrías complejas y materiales de composición arbitraria, con aplicación en un rango de energías que va desde los pocos centenares de eV hasta 1 GeV. Su nombre es un acrónimo del inglés *PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons* y el algoritmo se basa en un modelo de dispersión que combina bases de datos numéricas con modelos analíticos de secciones eficaces para los diferentes mecanismos de interacción. Cabe mencionar que el código base PENELOPE ha sido extensa y exitosamente aplicado al estudio de problemas en física de radiaciones y, en particular en física médica [7-10].

En el presente trabajo se aplicó el método para caracterizar la respuesta del espectrómetro Amptek XR-100T-CdTe [11], el cual tiene amplias aplicaciones principalmente debido al desempeño reportado por el fabricante asegurando alta eficiencia hasta 100 KeV. Para la estimación de la res-

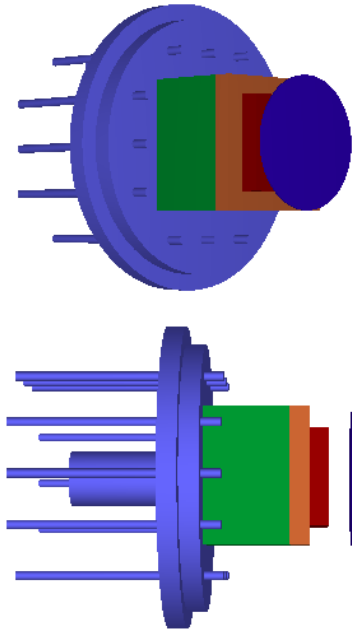


FIG. 2: Visualización 3D frontal (arriba) y lateral (abajo) de la base de apoyo del detector XR100-CdTe. En celeste se observa TO-8 de kovar, en verde el cooler (teluro de bismuto), en naranja el sustrato (óxido de aluminio), en rojo el material sensible (cristal de CdTe) y en azul la ventana (Be).

puesta del detector de CdTe, el modelo geométrico simulado se basó en datos detallados proporcionados por el fabricante [12].

Representación simulada del espectrómetro Amptek XR-100T-CdTe

Como se muestra en las Figs. 1 y 2, y de acuerdo con las especificaciones técnicas provistas por el fabricante [12] y detalles recabados directamente sobre un espectrómetro Amptek XR-100 CdTe, se definió al volumen sensible como un cristal de CdTe rectangular de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ de área y 1 mm de espesor, en un armazón-contenedor cilíndrico hueco al vacío de níquel con una ventana frontal de berilio de $100 \mu\text{m}$ de espesor. Atendiendo a la configuración instrumental, la parte trasera/inferior del detector se unió a un sustrato de óxido de aluminio y a un disipador de calor pasivo de teluro de bismuto de 7 mm de espesor, que pasaremos a denominar como *cooler*. Como se muestra en la Fig. 1, se consideró la estructura completa del detector dividiendo la geometría en diferentes grupos de componentes para poder analizar separadamente la influencia de cada componente en la respuesta del dispositivo. El procedimiento consistió en realizar un grupo de simulaciones, iniciando por considerar sólo el volumen sensible, luego incorporar la ventana de berilio de sellado de vacío y repetir el conjunto de simulaciones, una por cada *kernel* mono-energético; e incorporar, uno por vez, cada uno de los componentes de dispositivo.

Desde el punto de vista técnico del proceso de simulación Monte Carlo, la configuración consistió en utilizar al volumen sensible (cristal CdTe) para definir detectores virtuales (*tallies*) que permiten obtener estimaciones de cantidades radiológicas en esa región espacial, como por ejemplo la deposición de energía. El método Monte Carlo se ba-

sa en la repetición de una dada cantidad de historias, cada una asociada a una *partícula primaria*, y a través de formalismo estadístico proveer estimaciones para valores medios e incertezas asociadas. Por ello, se utilizó un número pre-definido por el usuario de fotones incidentes (rayos X primarios) emitidos por la fuente, los que se transportan y rastrean a través de la configuración geométrica definida, contemplando todas las interacciones, tanto de fotones primarios como de las partículas secundarias, para determinar la deposición de energía dentro del volumen activo del detector. El número de partículas simuladas para cada caso se tomó como 10^7 , lo que aseguró que la fluctuación estadística se mantuviera dentro de los límites razonables a los fines del presente estudio, *i.e.* inferiores a 3%.

Caracterización de la respuesta por medio de *kernels*

Cuando un haz de rayos X atraviesa un material, la cantidad de ionizaciones producidas en éste guarda correlación con la energía cedida en el volumen, por lo que el haz -en primera aproximación- se atenuará de acuerdo con la ley de Beer-Lambert, como muestra la expresión:

$$I = I_0 e^{-\mu t} = I_0 e^{-(\mu/\rho)t_d} = I_0 e^{\mu_m t_d} \quad (1)$$

donde I e I_0 son las intensidades del haz de rayos X atenuado y no atenuado, respectivamente; $\mu (\text{cm}^{-1})$ es el coeficiente de atenuación lineal, t (cm) es el espesor lineal, $\mu_m = \mu/\rho$ (cm^2/g) es el coeficiente de atenuación de masa y t_d (g/cm^2) es el espesor de densidad de la muestra [13]. Tanto la energía cedida al volumen como la atenuación del haz incidente, representan indirectamente la capacidad de respuesta de un material sensible. Para poder estimar la energía liberada con respecto a la fluencia de la radiación en el volumen sensible, se realizó el cálculo de la eficiencia intrínseca en energía mediante la expresión (2), donde mayormente se procede a dividir el volumen sensible en subvolumenes (vóxeles) discretos que permiten dar cuenta de la deposición de energía por partículas primarias o secundarias incidentes desde la fuente [14].

$$\varepsilon = \frac{E_d}{E_t} = \frac{E_d}{\Phi E_k} \quad (2)$$

donde E_d es la energía depositada, E_t la energía total del haz, E_k la energía del haz mono-energético y Φ la fluencia de partículas.

El *kernel* de deposición de energía da cuenta de la respuesta del medio al haz de radiación incidente [15]. En este contexto, se implementó la metodología de *kernels* mono-energéticos para caracterizar separadamente la contribución de cada uno de los principales componentes del dispositivo a la respuesta de la eficiencia intrínseca del material sensible, como se muestra en la Fig. 3. En base a la Fig. 3, el primer conjunto de simulaciones se realizó irradiando la configuración geométrica representada en el esquema (a), siguiendo con los esquemas (b) y (c) de la Fig. 3, respectivamente. En todos los casos el número de partículas simuladas se tomó como 10^7 , desde una fuente puntual con un haz de fotones filiforme, externo a la ventana de berilio, para conformar cada uno de los *kernels* en el rango de energías de 5 a 1000 keV. Por otro lado, para obtener una

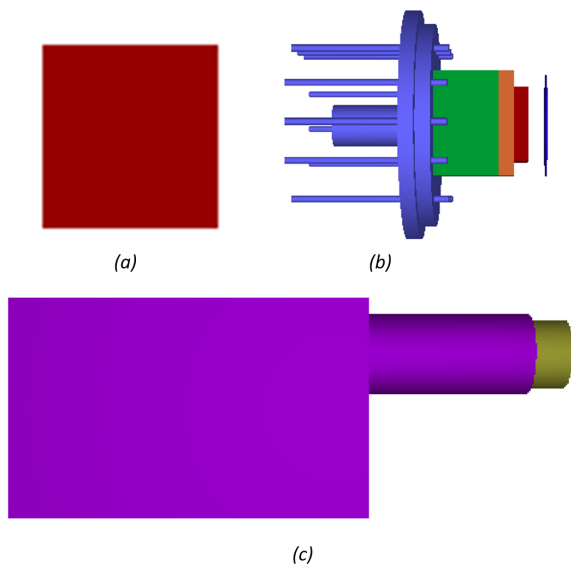


FIG. 3: Visualización 3D de las partes principales del detector XR100-CdTe. En (a) se puede observar el material sensible de CdTe, en (b) se muestra la base completa donde se apoya el cristal de CdTe, es decir los componentes más próximos al material sensible y en (c) se observa la estructura completa del detector.

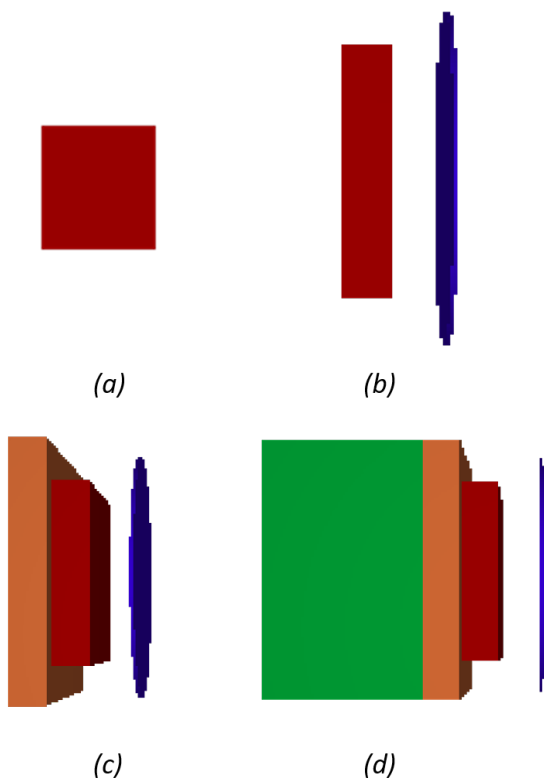


FIG. 4: Visualización 3D de la división realizada en base a los componentes más próximos al material sensible (cristal de CdTe) del detector XR100-CdTe. En (a) se observa solamente el cristal de CdTe. En (b) se indican el material sensible junto con la ventana de berilio. En (c) se muestra la configuración geométrica de (b) con el sustrato. Por último en (d) se muestra en color verde el cooler, junto con la configuración geométrica de (c).

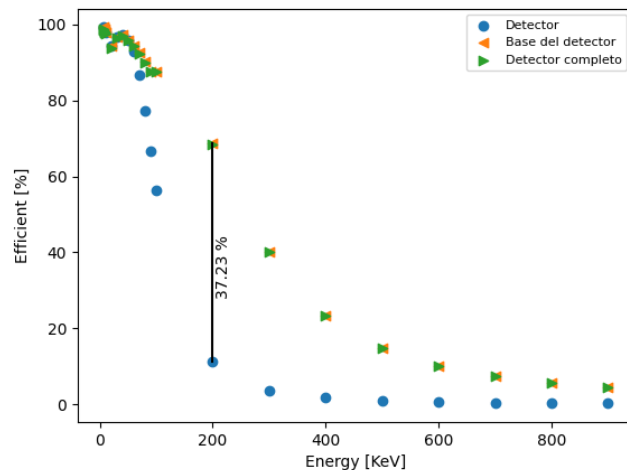


FIG. 5: Respuesta del detector AmpTek XR-100-CdTe discriminando la contribución de los diferentes componentes del espectrómetro observados en la Fig. 3. Los resultados mostrados del detector (azul) corresponden a la simulación de la Fig. 3.a, y los resultados de la base del detector (naranja) y del detector completo (verde) corresponden a las simulaciones de la Fig. 3.b y 3.c, respectivamente. Las incertezas de los valores obtenidos para cada una de las simulaciones realizadas con PENELOPE se encuentran por debajo del 2%.

descripción completa de la contribución de los componentes más cercanos al material sensible, se decide realizar un segundo conjunto de simulaciones irradiando las configuraciones geométricas representadas en los esquemas de la Fig. 4. Al igual que en el primer conjunto de simulaciones, se tomó el número de partículas simuladas como 10^7 , desde una fuente puntual con un haz de fotones filiforme, externo a la ventana de berilio con un rango de energías de 5 a 1000 keV.

Con el objetivo de poder validar los resultados del trabajo se obtuvieron los valores reportados por el fabricante en la eficiencia intrínseca del cristal detector, donde se discriminan estimaciones por absorción y por interacciones totales. Cabe aclarar que las estimaciones por absorción e interacciones totales son resultados proporcionados por el mismo código PENELOPE.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la Fig. 5 se resume los resultados obtenidos aplicando los formalismos de las expresiones (1) y (2) para la estimación de la respuesta obtenida en cristal de CdTe teniendo en cuenta la contribución de los diferentes componentes del espectrómetro.

Como puede apreciarse en la Fig. 5, para el rango de aplicación típico, existe un incremento en la eficiencia del 37%, en promedio, al considerar las contribuciones del total de los componentes principales, respecto de la respuesta propia del volumen sensible (cristal de CdTe).

A fin de caracterizar detalladamente la influencia de los componentes de mayor criticidad, por su cercanía al cristal de CdTe, se estudió específicamente las contribuciones provenientes de la ventana, el sustrato y el cooler.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la Fig. 6.

Como se muestra en la Fig. 6, la presencia del cooler

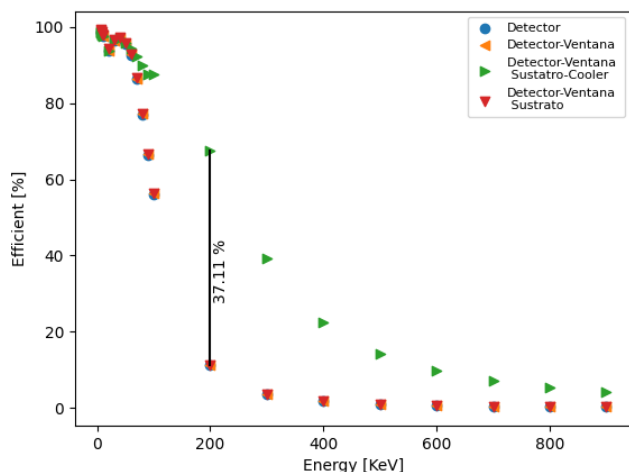


FIG. 6: Estimación de la respuesta, caracterizada por la eficiencia de detección, comparando el caso del cristal de CdTe solitario (Fig. 4.a) y el caso de la incorporación de los diferentes componentes de la base de apoyo, como son la ventana de berilio (Fig. 4.b), el sustrato de óxido de aluminio (Fig. 4.c) y el cooler (Fig. 4.d). Las incertezas de los valores obtenidos por simulación se encuentran, en todos los casos, por debajo del 2%.

incrementa la respuesta del detector alrededor del 37% por medio del modelo de *kernels* y estimada como porcentaje de energía absorbida en el volumen sensible.

Esta variación puede interpretarse debido al material, de número atómico efectivo apreciable, y las dimensiones (espesor alrededor de 7 mm) del *cooler*, lo que produce contribuciones al volumen sensible por medio de (retro-) dispersión.

Por último, para convalidar la metodología desarrollada, se procedió a comparar la eficiencia intrínseca del cristal detector en sí con la información provista por el fabricante, como se reporta en la Fig. 7, donde se discrimina estimaciones por absorción y por interacciones totales.

Los resultados reportados en la Fig. 7 indican un promisorio acuerdo entre las estimaciones logradas por el método propuesto. Un análisis cuantitativo indica diferencias porcentuales promedio a lo largo de todo el rango energético estudiado en la curva de eficiencia alrededor del 2.38% para la componente de absorción y diferencia porcentual global de 3.36% para las componentes de interacción total y absorción de fotones.

Cabe indicar que los valores reportados por el fabricante como así también por otros estudios [15, 16], representan un comportamiento promedio, de abordaje analítico; mientras que los resultados obtenidos por el método desarrollado y descrito en el presente trabajo incluyen inherentemente las consideraciones estocásticas propias al problema.

Por ello, si bien menores y cuantitativamente en el orden de magnitud de las incertezas propias del abordaje Monte Carlo implementado, las discrepancias obtenidas pueden atribuirse a este contexto.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se presenta e implementa una metodología para modelar la respuesta de un espectrómetro de rayos X por medio de simulaciones Monte Carlo, basadas en *ker-*

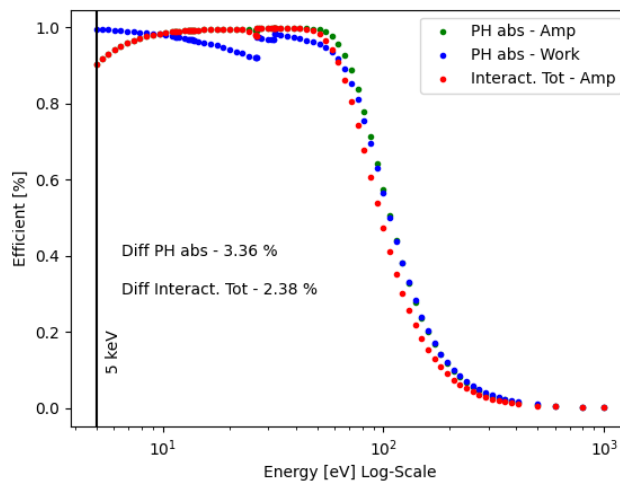


FIG. 7: Eficiencia del espectrómetro AmpTeK XR-100-CdTe obtenida por medio del método propuesto (incertezas menores al 2%) junto con los datos reportados por el fabricante. En azul se muestran los resultados obtenidos por el método propuesto, en verde la componente de absorción y en rojo la componente de interacción total reportados por el fabricante respectivamente. En una línea vertical de color negro se marca el límite inferior del intervalo de energía que se toma como comparación (5-1000 keV).

nels mono-energéticos.

Se reportan evaluaciones por simulación Monte Carlo implementadas adaptando rutinas del código PENELOPE de los valores de la respuesta y caracterización de la eficiencia total del detector AmpTeK XR-100-CdTe determinando la contribución relativa de cada uno de los diferentes componentes principales del espectrómetro, logrando caracterizar las contribuciones de cada uno de éstos.

Se obtuvo la respuesta del espectrómetro AmpTeK XR-100-CdTe, y contribuciones relativas de cada componente utilizando *kernels* con energías en el rango de 5 a 1000 keV, lo que cubre largamente la inmensa mayoría de las aplicaciones de este tipo de detectores.

A partir de los resultados obtenidos, junto a la satisfactoria comparación cualitativa y cuantitativa con datos provistos por el fabricante, puede confirmarse que la eficiencia relativa se mantiene en valores cercanos al 100% para rayos X en el rango 5 a 100 keV; mientras que la curva de eficiencia obtenida puede utilizarse para deconvolucionar la señal directa detectada y corregir las lecturas directas por eficiencia a fin de poder aplicar apropiadamente el espectrómetro en cualquier rango de interés.

Además del estudio de caracterización de contribuciones relativas de los diferentes componentes principales del espectrómetro, puede concluirse que la mayoría de los componentes que conforman el espectrómetro no generan contribuciones significativas a la respuesta integral, excepto por el *cooler* que debido a su espesor y alto número atómico dispersa los fotones incidentes contribuyendo alrededor de un 37% en la eficiencia total.

Por otro lado, cabe remarcar que pudo corroborarse cuantitativamente la fiabilidad de la metodología desarrollada, convalidando a partir de datos para la respuesta del cristal de CdTe, la que con diferencias menores al 2% se muestra en acuerdo con datos provistos por el fabricante.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue parcialmente financiado por CONICET, proyecto **PIP 11220200100751CO**, por SeCyT-UNC proyecto **33620180100366CB** y por la Universidad de La Frontera, Chile por medio del proyecto **DI21-0068**.

Este trabajo utilizó recursos computacionales del CCAD de la Universidad Nacional de Córdoba (<https://ccad.unc.edu.ar/>), que forman parte del SNCAD del MinCyT de la República Argentina.

REFERENCIAS

- [1] J. Seco, B. Clasié y M. Partridge. Review on the characteristics of radiation detectors for dosimetry and imaging. *Phys. Med. Biol.* **59**, R303-R347 (2014).
- [2] M. I. Ahmad, M. H. Ab. Rahim, R. Nordin, F. Mohamed, A. Abu-Samah y N. F. Abdullah. Ionizing Radiation Monitoring Technology at the Verge of Internet of Things. *Sensors* **21** (2021). ISSN: 1424-8220.
- [3] G. Knoll. *Radiation Detection and Measurement* ISBN: 0-471-07338-5 (ene. de 2000).
- [4] A. Karmakar, J. Wang, J. Prinzie, V. De Smedt y P. Leroux. A Review of Semiconductor Based Ionising Radiation Sensors Used in Harsh Radiation Environments and Their Applications. *Radiation* **1**, 194-217 (2021). ISSN: 2673-592X.
- [5] S. R. Cherry, J. A. Sorenson y M. E. Phelps. en *Physics in Nuclear Medicine (Fourth Edition)* (eds. Cherry, S. R., Sorenson, J. A. y Phelps, M. E.) Fourth Edition, 173-194 (W.B. Saunders, Philadelphia, 2012). ISBN: 978-1-4160-5198-5.
- [6] NEA. *PENELOPE 2018: A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport: Workshop Proceedings* (OECD Publishing, 2019).
- [7] P. Andreo. Monte Carlo simulations in radiotherapy dosimetry. *Radiation Oncology* **13**, 121 (2018).
- [8] F. Malano, F. Mattea, F. Geser, P. Pérez, D. Barraco Diaz, M. Santibañez, R. Figueroa y M. Valente. Assessment of FLUKA, PENELOPE and MCNP6 Monte Carlo codes for estimating gold fluorescence applied to the detection of gold-infused tumoral volumes. *Appl. Radiat. Isot.* **151**, 280-288 (2019).
- [9] V. Mariotti, A. Gayol, T. Pianoschi, F. Mattea, J. Vedelago, P. Pérez, M. Valente y M. Alva. Radiotherapy dosimetry parameters intercomparison among eight gel dosimeters by Monte Carlo simulation. *Radiat. Phys. Chem.* **190**, 109782 (2021).
- [10] R. Figueroa, F. Geser, J. López-Correa, F. Malano y M. Valente. Monte Carlo study of a convergent X-ray beam for high resolution X-ray fluorescence imaging. *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine* **170** (2021).
- [11] R. Redus. Design and performance of the X-123 compact X-ray and gamma-ray spectroscopy system. *Nuclear Science Symposium Conference Record* **6**, 3794-3797 (2006).
- [12] Amptek. *User Operating Manual XR-100CdTe X-Ray Detector & Preamplifier* English. Amptek (sep. de 2017). 26 págs. published.
- [13] F. H. Attix. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry* (1986).
- [14] T. R. Mackie, A. F. Bielajew, D. W. O. Rogers y J. J. Battista. Generation of photon energy deposition kernels using the EGS Monte Carlo code. *Phys. Med. Biol.* **33**, 1-20 (1988).
- [15] M. Bazalova y F. Verhaegen. Monte Carlo simulation of a computed tomography x-ray tube. *Phys. Med. Biol.* **52**, 5945-5955 (2007).
- [16] A. Basit, M. T. Siddique, S. M. Mirza, S. U. Rehman y M. Y. Hamza. Study of CdTe detection efficiency for medical applications using Geant4-based stochastic simulations. *J. Radiol. Prot.* **38**, 1483-1500 (nov. de 2018).