

## Caracterización de tres centelladores de 1.5"x1.5", 2"x2" y 3"x3" para la puesta a punto de una cadena para espectroscopia gamma

E. Villarreyes<sup>\*1,2</sup>, G. Patiño<sup>1</sup>, A. Luna<sup>1,2</sup>, O. Baltuano<sup>1,3</sup> y L. Angulo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

<sup>2</sup> Universidad del Pacífico, Lima, Perú

<sup>3</sup> Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), Lima, Perú

Recibido 30 Oct 2022 – Aceptado 15 Abr 2023 – Publicado 20 Abr 2023

### Resumen

Los detectores de radiación gamma que usan centelladores, siguen teniendo una gran relevancia en varios campos como es el estudio de las radiaciones en la física nuclear, en las medidas de radiación medioambiental, en la protección radiológica y en la industria. El grupo de investigación INFISA adscrito a la FCF de la UNMSM, que está ubicado en el Instituto de Investigación de Física, cuenta con tres centelladores sólidos inorgánicos de yoduro de sodio dopado con talio NaI(Tl) de tamaño de cristal de 1.5"x1.5" (REXON), 2"x2" (TELEDYNE) y 3"x3" (BICRON). En el presente trabajo presentamos los resultados de la comparación, mostrando que el detector de 1.5"x1.5" tiene una mejor resolución, seguido del 3"x3" y por último el de 2"x2"; por otro lado el detector de 1.5"x1.5" es eficiente para bajas energías, seguido del 3"x3" y 2"x2", para altas energías el detector de 3"x3" tienen una mejor eficiencia seguido del 1.5"x1.5" y finalmente del 2"x2".

**Palabras clave:** Centelladores, NaI(Tl), Resolución, Eficiencia, Espectroscopia gamma.

### Characterization of three 1.5"x1.5", 2"x2" and 3"x3" scintillators for the development of a chain for gamma spectroscopy

### Abstract

Gamma radiation detectors that use scintillators continue to have great relevance in various fields such as the study of radiation in nuclear physics, environmental radiation measurements, radiation protection and industry. The INFISA research group attached to the FCF of UNMSM, which is located at the Physics Research Institute, has three solid inorganic scintillators of sodium iodide doped with thallium NaI(Tl) with a crystal size of 1.5"x1.5" (REXON), 2"x2" (TELEDYNE) and 3"x3" (BICRON). In this paper we present the results of the comparison, showing that the 1.5"x1.5" detector has a better resolution, followed by the 3"x3" and finally the 2"x2" one; on the other hand, the 1.5"x1.5" detector is efficient for low energies, followed by the 3"x3" and 2"x2", for high energies the 3"x3" detector has a better efficiency followed by the 1.5"x1.5" and finally 2"x2".

**Keywords:** Scintillators, NaI(Tl), Resolution, Efficiency, Gamma Spectroscopy.

### Introducción

Los detectores centelladores gozan de mucha popularidad sea por su versatilidad, bajo costo, y su alta eficiencia en la detección de radiación gamma; por ello son usados ampliamente en los diversos campos de la espec-

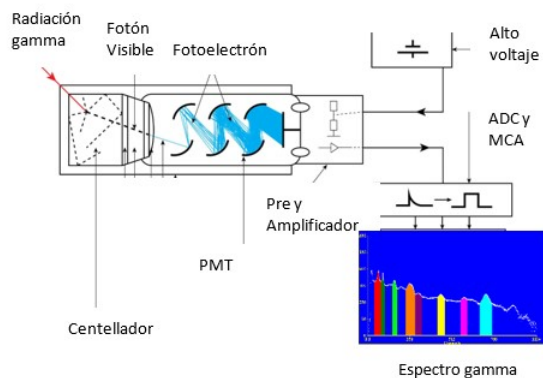
troscopia gamma, como son las mediciones medioambientales de radiactividad natural o artificial, búsqueda de los NORM (Materiales Radiactivos de Origen Natural), así como en la dosimetría en la medicina nuclear y en los diversos campos de la industria [1].

\*eduardo.villarreyes@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



La detección de la radiación gamma se da cuando la radiación entra en contacto con el cristal centellador produciéndose una luz (centelleo), esta luz luego es recogida por el fotomultiplicador (PMT), conectado a un alto voltaje y convertida en pulsos eléctricos [2]. Luego estos pulsos son pre amplificados y posteriormente amplificados para su conversión digital (ADC). En este punto se tiene una señal óptima que será clasificada de acuerdo a su altura de pulso en un analizador multicanal (MCA), con esto se genera un espectro gamma donde se destacan los fotopicos y otros fenómenos de la interacción de la radiación con la materia (fotoeléctrico, Compton, aniquilación, creación de pares, etc.) [3]. (Figura 1).



**Figura 1:** Esquema de la detección gamma por un Centellador.

## Material y Métodos

En el laboratorio de Instrumentación Física y Aplicaciones (INFISA), se cuenta con tres cadenas de detección gamma, una de ellas consta de un blindaje de plomo y acero inoxidable de 5.0 cm de grosor, 28.0 cm de diámetro externo, 15.0 cm de diámetro interno y 37.0 cm de altura (incluido la tapa), además de una cadena de alto voltaje, preamplificador y amplificador Ortec 570, un analizador multi-

canal Amptek Pocket MCA8000D, y una computadora para el estudio del espectro gamma (figura 2).



**Figura 2:** Cadena para espectroscopia gamma donde se aprecia a la derecha el blindaje para el detector.

También se cuenta con tres detectores sólidos cilíndricos, de yoduro de sodio dopado con talio NaI(Tl) de tamaño de cristal de 1.5"x1.5" (REXON), 2"x2" (TELEDYNE) y 3"x3" (BICRON); que se han adquirido de los diversos proyectos de investigación y con recursos de la Facultad de Ciencias Físicas (FCF), (figura 3).



**Figura 3:** De izquierda a derecha, tres detectores de diámetro de cristal: 3"x3", 2"x2" y 1.5"x1.5".

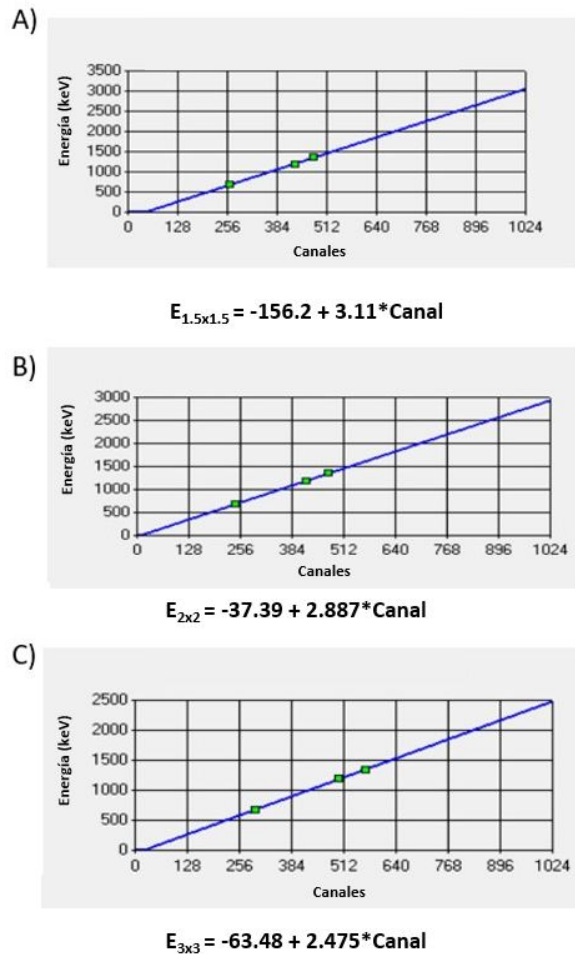
También se han detallado sus características principales en las que destacan las marcas, los voltajes óptimos de funcionamiento, la dimensión del cristal tanto en diámetro como en la altura y si cuentan con cadena propia para la espectroscopia gamma, (tabla 1).

CENTEILLADOR	1	2	3
Marca	BICRON	TELEDYNE	REXON
Modelo	ES-294	E5152	180601-21
Diámetro del cristal	3" (7.62 cm)	2" (5.08 cm)	1.5" (3.81 cm)
Voltaje de funcionamiento	600 V	640 V	800 V
Año de adquisición	2021	2006	2017
Cadena gamma	NO	NO	SI
Resolución de fábrica a 662 keV	7.5	8.5	6.5

**Tabla 1:** Características principales de los tres centelladores

### Calibración por energías

En los detectores centelladores, existe una relación semi lineal entre la amplitud de los impulsos eléctricos a la salida del sistema electrónico y la energía de la radiación detectada, esto implica la relación entre canales y energías [4-6]. Por ello se hizo una calibración de energías para los tres detectores independientemente. Esta consistió en primer lugar, en observar los espectros de fuentes radiactivas gamma certificadas, a fin de conocer las energías con mucha precisión; luego se extrae el espectro de dichas fuentes que cubran la región a estudiar, donde se tendrá la identificación de los picos en canales; y finalmente se ajusta a una función que nos brinda la curva de calibración en energías, (Figura 4).



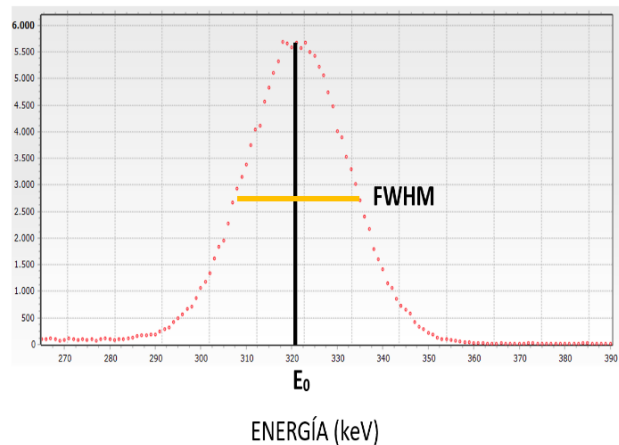
**Figura 4:** Recta de calibración en energía y su respectiva ecuación para A) detector 1.5"x1.5" B) detector 2"x2" y C) detector 3"x3".

### Resolución del detector

Se entiende por resolución de un detector, a la capacidad del detector gamma, de mostrar (resolver) dos fotopicos consecutivos de energía de rayos gammas de un espectro de altura de pulsos [1, 2]. Cuanto más estrechos y nítidos sean estos fotopicos, mayor será la resolución del detector. Además la capacidad de distinguir y medir energías de un determinado radionúclido será mejor [6, 7]. La resolución se expresa generalmente como el Ancho a Media Altura - Full Width at Half Maximun - (FWHM) de un determinado fotopico en un espectro gamma en kilo electrón voltio (keV). En otras ocasiones se expresa en porcentajes, dividiendo el FWHM entre la centroide de energía ( $E_0$ ) y multiplicado por 100, (ecuación 1).

$$R = FWHM(keV) = \frac{FWHM * 100}{E_0} (\%) \quad (1)$$

En la Figura 5 se tiene un fotopico aproximado a una función gaussiana, donde se indica su FWHM y su centroide.



**Figura 5:** Fotopico donde se indica su resolución (R) dada por el FWHM.

Dado un espectro gamma, para determinar la resolución (R) de un fotopico, se recurre a softwares comerciales especializados en espectroscopia gamma donde se sombrea o resalta la región de interés (ROI), tales como: Genie2000, Maestro, UCS30, Tiny entre otros.

Para la determinación de la curva de resolución a distintas energías para cada uno de los detectores, se usaron cuatro fuentes radiactivas certificadas para el estudio de sus fotopicos [9, 10], estos radionúclidos son:  $^{133}\text{Ba}$  (356.0 keV),  $^{137}\text{Cs}$  (661.7 keV),  $^{22}\text{Na}$  (511 keV y 1274.5 keV) y  $^{60}\text{Co}$  (1173.2 keV y 1332.4 keV) es decir se analizaron las energías de 5 fotopicos, las fuentes radiactivas se aprecian en la Figura 6.

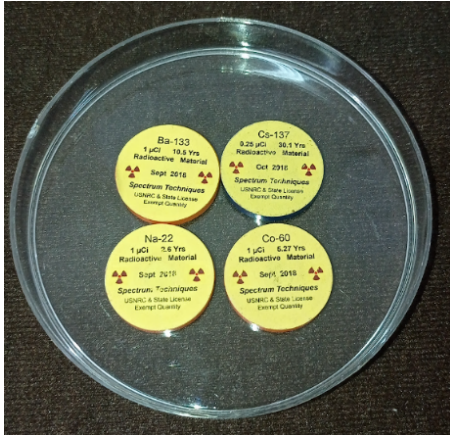


Figura 6: Fuentes radioactivas certificadas.

## Eficiencia

Para comparar los distintos cristales de centelleo una segunda característica es la eficiencia [2]. La eficiencia del detector se refiere a la cantidad de la radiación gamma que es detectada por el centellador [7], también conocido como la eficiencia absoluta ( $\varepsilon$ ) que se determina como la división entre el número de gammas detectados sobre el número de gammas que se emite por la fuente radiactiva, tal como se aprecia en la ecuación (2). [8, 11].

$$\varepsilon = \frac{\text{Numeros de gammas detectados}}{\text{Numero de gammas emitidos por la fuente}} \quad (2)$$

La eficiencia absoluta de pico para una cierta energía ( $\varepsilon_e$ ), o simplemente eficiencia de un detector centellador, se determina a partir de su espectro gamma con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_e = \frac{N_n}{I * A * t_R} \quad (3)$$

Donde se tiene que  $N_n$  es el número de cuentas netas del fotopico,  $I$  Intensidad de probabilidad de emisión de energía,  $A$  actividad del radionúclido y  $t_R$  tiempo de recuento de la muestra.

Hay que indicar que para determinar las eficiencias consideramos el número de gammas detectadas en el fotopico (cuentas en el ROI). La eficiencia depende de la

posición entre la fuente y el detector, así como de la geometría de la fuente. Por ello, para el estudio de los tres centelladores, se ubicaron las fuentes lo más cerca al detector y en la parte central del mismo, en un envase Petri de 9.5 cm de diámetro.

Mediante el software Genie 2000 se obtuvo los ROI correspondientes a cada fotopico, luego se procesó los datos y se determinó primero la resolución de cada centellador usando la ecuación (1).

## Resultados y Discusión

Por cada centellador se obtuvo los espectros gamma de dos fuentes conjuntamente para calibración, tal como se aprecia en la Figura 7.

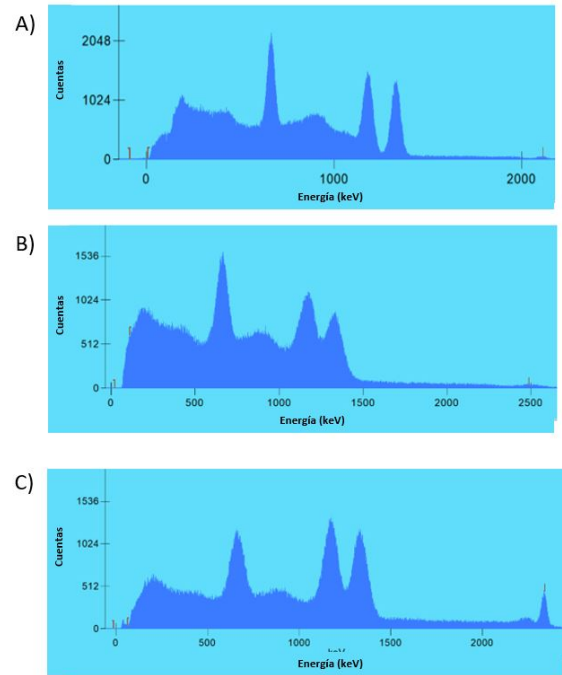


Figura 7: Espectro gamma conjunto de  $^{60}\text{Co}$  y  $^{137}\text{Cs}$  para: A) Detector 1.5"x1.5", B) Detector 2"x2" y C) Detector 3"x3".

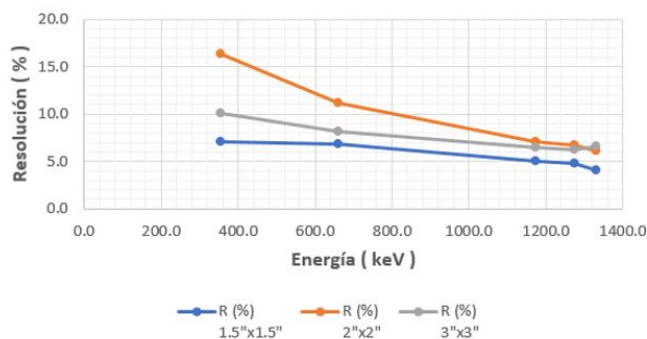
Se analizó los espectros gamma de cada fuente radiactiva, cuyo resultados para la resolución de cada fotopico se muestran en la tabla 2. Además, se muestra la gráfica de la resolución de los tres centelladores, ver Figura 8.

Energía (keV)	R (%) 1.5"x1.5"	R (%) 2"x2"	R (%) 3"x3"
356.0	7.1	16.4	10.1
661.7	6.8	11.2	8.2
1173.2	5.0	7.1	6.5
1274.5	4.8	6.7	6.2
1332.4	4.1	6.1	6.6

Tabla 2: Resolución para cada energía correspondiente a los tres centelladores,

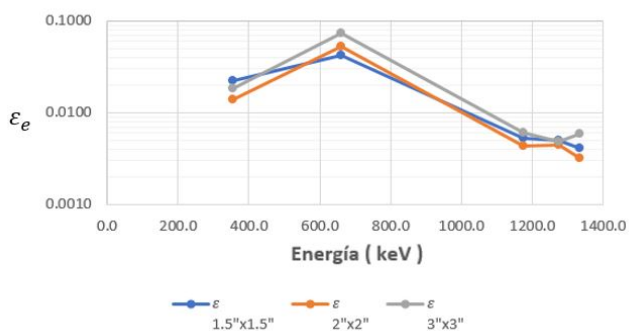
Energía (keV)	$\epsilon_e$ 1.5"x1.5"	$\epsilon_e$ 2"x2"	$\epsilon_e$ 3"x3"
356.0	0.0219	0.0138	0.0184
661.7	0.0422	0.0521	0.0727
1173.2	0.0052	0.0043	0.0061
1274.5	0.0049	0.0044	0.0048
1332.4	0.0041	0.0032	0.0058

**Tabla 3:** Eficiencia para cada energía correspondiente a los tres detectores.



**Figura 8:** Gráfica conjunta de la resolución de los tres detectores en función a su energía.

También se determinó la eficiencia de cada centellador usando la ecuación (3); los resultados de la eficiencia se muestran en la tabla 3. Además el gráfico conjunto de la eficiencia de los tres detectores, ver Figura 9.



**Figura 9:** Gráfica conjunta de la eficiencia de los tres detectores en función a su energía.

### Discusión

En nuestra investigación sobre los centelladores, los datos obtenidos están dentro del rango con los valores hallados en el trabajo de El Hamli [12], para el detector

1.5"x1.5" la resolución va desde un 14% hasta 4.5%; el de 3"x3" va desde un 11.2% hasta 4.0%. Para el de 2"x2" nuestros datos están fuera de rango ellos encontraron valores desde un 11.9% hasta 4.8%; y para la eficiencia, los autores encontraron que para el 1.5"x1.5" los valores están en el rango de 0.051 hasta 0.004; en el caso del 2"x2", nuestros valores de la eficiencia están fuera de rango ya que los autores encontraron valores que están entre 0.064 y 0.01, al igual que el de 3"x3" también encontramos valores fuera de rango, los autores encontraron datos que están entre 0.084 y 0.018. Por otro lado, nuestros valores, están fuera del rango con los datos obtenidos por Casanovas [13], para el centellador de 2"x2", encontraron una resolución que va desde el 9.0% hasta el 5.2%. Y finalmente nuestros valores están en el rango, con los datos obtenidos por Pilakouta [14], para la eficiencia de un 3"x3", obtuvieron valores desde 0.15 hasta 0.038.

### Conclusiones

De los tres detectores centelladores estudiados, el de 1.5"x1.5", tiene una mejor resolución tanto para bajas energías (menor a 400 keV) y altas energías, (mayor e igual a 400 keV) seguido del detector 3"x3" y finalmente el de 2"x2". Para la eficiencia se tiene que el detector de 1.5"x1.5" tiene una mejor eficiencia para bajas energías, seguido del 3"x3" y luego el de 2"x2"; en cambio para altas energías el de 3"x3" tiene una mayor eficiencia seguido del 1.5"x1.5" y finalmente de 2"x2". Esto último pone de manifiesto que el detector de 2"x2" ha perdido eficiencia y resolución, tal vez debido a su tiempo en uso (16 años) u otros factores no estudiados en este trabajo. Además con los datos obtenidos, se concluye también que para realizar análisis en espectroscopia, es importante saber de antemano un aproximado de los valores energéticos a estudiar, para así seleccionar el detector adecuado para la cadena gamma. Con la información obtenida de los distintos detectores, ya las cadenas para espectroscopia gamma están listas para su uso en educación e investigación.

## Referencias

- [1] N. Vajda, R. Pöllänen, P. Martin, Ch. Kim. Handbook of Radioactivity Analysis Volume 1: Radiation Physics and Detectors. Academic Press is an imprint of Elsevier, pp. 505-510 (2020).
- [2] G. Knoll. Radiation Detection and Measurement, fourth ed. J. Wiley and Sons, New York, pp. 830 (2010).
- [3] J. Pejchal, V. Babin, R. Kucerkova, et al. Luminescence processes in Ti-doped LiAlO<sub>2</sub> single crystals for neutron scintillators. *J. Lumin.* 201, pp. 231-244 (2018).
- [4] Live Chart Of Nuclides. Nuclear structure and decay data IAEA - Nuclear Data Section. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (2022).
- [5] S.Y.F. Chu, L.P. Ekström, B. Firestone. Table of Isotopes. University of Lund. <http://nucleardata.nuclear.lu.se> (2022).
- [6] G. Gilmore. Practical Gamma-ray Spectrometry. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 131-140 (2008).
- [7] D. Demir, A. Un, Y. Sahin. Efficiency determination for NaI(Tl) detectors in the 23 keV to 1333 keV energy range. *Instrumentation Science and Technology*, 36: pp. 291-301 (2008).
- [8] R. Scafè, P. Auer, P. Bennati, et al. Production of radioactive phantoms using a standard inkjet printer and the public domain multi-printing code GENIA. *Phys. Med.* In press (2011).
- [9] P. Chiozzi, P. De Felice, A. Facio, et al. Laboratory application of NaI(Tl) gamma ray spectrometry to studies of natural radioactivity in Geophysics. *Applied Radiation and Isotopes*, 53: pp 127-132 (2000).
- [10] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Exposures from Natural Radiation Exposure Sources. UNSCEAR 2000 Report, Annex B, United Nations (2000).
- [11] M. García-Reyna, C. Márquez, G. Campillo-Rivera, et al. Curvas de eficiencia de un sistema espectrométrico para rayos gamma con un detector de NaI(Tl). *Sociedad Mexicana de Irradiación y Dosimetría* (2021).
- [12] A. EL Hamli, A. Bazz, A. Moussa, et al. Data and simulation studies on the influence of scintillation crystal dimensions on spectrometric parameters. *Applied Radiation and Isotopes*, 181: 110053 (2022).
- [13] R. Casanovas, J.J. Morant, M. Salvadó. Implementation of gamma-ray spectrometry in two real-time water monitoris using NaI(Tl) scintillation detectors. *Applied Radiation and Isotopes*, 80: pp. 49-55 (2013).
- [14] M. Pilakouta, F.K. Pappa, D.L. Patiris, C. Tsabaris, C.A. Kalfas. A methodology for expanding the use of NaI(Tl) based spectrometry in enviromental radioactivity measurements. *Applied Radiation and Isotopes*, 139: pp 159-168 (2018).