

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN INTERNOS SIN
FINANCIAMIENTO O AUTOGESTIONADOS
ANEXO 2 – DETALLES DE LA PROPUESTA

Investigación Básica Investigación Aplicada

DEPARTAMENTO(S) Y/O INSTITUTO(S):
 1. Departamento de Ciencias Nucleares
 2.

LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:
 1. Aplicaciones de radioisótopos y aceleradores de electrones

DISCIPLINA CIENTÍFICA (Marque X, solamente una opción)	
Ciencias Naturales y Exactas;	
Ingeniería y Tecnologías;	X
Ciencias Médicas;	
Ciencias Agrícolas;	
Ciencias Sociales;	
Humanidades	

OBJETIVO SOCIOECONÓMICO (Marque X, solamente una opción)	
Exploración y explotación del medio terrestre;	
Ambiente;	
Exploración y Explotación del espacio;	
Transporte, telecomunicaciones y otras infraestructuras;	
Energía;	
Producción y tecnología industrial;	X
Salud;	
Agricultura;	
Educación;	
Cultura, ocio, religión y medios de comunicación;	
Sistemas políticos y sociales, estructuras y procesos;	
Defensa;	
Avance general del conocimiento: I+D financiada con los Fondos Generales de Universidades (FGU);	
Avance general del conocimiento: I+D financiados con otras fuentes.	

1 Proyecto de Investigación
Título: Desarrollo de una Aplicación en GEANT4 para la calibración de un detector HPGe para geometrías irregulares



Resumen del proyecto (máximo 200 palabras)

Una aplicación digital en GEANT4 se desarrollará para la calibración de un detector HPGe para geometrías irregulares. Un modelo digital del detector será obtenido con las especificaciones provistas por el fabricante. Con este modelo se simularán en Monte-Carlo N Particle (MCNP) los experimentos realizados para la calibración en eficiencias y energías para fuentes puntuales. Las especificaciones del modelo serán modificadas hasta que el error de la simulación sea menor al 10%. Se desarrollará la aplicación en GEANT4 para la simulación del modelo antes obtenido. Se determinará la desviación que existe entre MCNP y GEANT4. La aplicación en GEANT4 es un aporte a la tecnología nuclear debido a que reemplazará las mediciones experimentales para la calibración del detector HPGe en eficiencias para situaciones en las que la experimentación es complicada. Para probar su efectividad se simulará la adquisición de cuentas de un contenedor Marinelli, de 8,5 cm de diámetro interno lleno con una solución múltiplo de actividad conocida y se determinará la curva de calibración en eficiencias. Se medirá experimentalmente este sistema para comprobación. Este procedimiento se seguirá para una geometría irregular como la del banano (*musa*) para determinar la concentración de potasio-40 (^{40}K) mediante espectroscopia gamma y métodos químicos.

Palabras clave (4-6):

Calibración en eficiencia y energía, detector HPGe, simulación Monte Carlo, Geant4

2 Objetivos, relevancia, productos y resultados esperados de esta propuesta de investigación

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Desarrollar una Aplicación en GEANT4 para la calibración de un detector HPGe para geometrías irregulares.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Construir las curvas de calibración en eficiencias y energías para fuentes puntuales a distancias conocidas para el detector HPGe.
- Obtener un modelo digital del detector HPGe para simular su comportamiento a través de MCNP.
- Validar resultado de la simulación en MCNP a través de la comparación del resultado simulado con el resultado experimental.
- Calibrar el detector HPGe en eficiencias y energías para una fuente de geometría irregular en contacto con el detector a través de una aplicación en Geant4.

2.2 Detalle de los resultados esperados (con relación a los objetivos)

- Curvas de calibración energía – canal de detección y energía – eficiencia para el detector HPGe para fuentes puntuales a distancias conocidas.
- Modelo digital del detector HPGe susceptible de ser usado para la simulación en un software Monte Carlo
- Modelo digital comprobado del detector HPGe que pueda ser usado para simulaciones de diferentes configuraciones geométricas.
- Aplicación en Geant4 para calibración del detector para medición de fuentes volumétricas.

3 Relevancia de la propuesta de investigación y su relación con la(s) líneas de investigación

El germanio híper puro es un material semiconductor. Según la temperatura a la que este material se encuentre es capaz de conducir la electricidad o no. A bajas temperaturas, se comporta como un aislante y



altas temperaturas es un conductor [1]. Esto ocurre porque la temperatura promueve los electrones de la capa de valencia a niveles energéticos superiores, también llamados capas de conducción. En estas capas, los electrones están menos ligados a los átomos y pueden circular en forma de electricidad. Sin embargo, esta promoción también ocurre cuando este material interactúa con radiación ionizante, específicamente con fotones gamma [2]. Estos fotones gamma, promueven los electrones a la banda de conducción y dejan un átomo ionizado, así se forma lo que se conoce como un par hueco (átomo ionizado de carga positiva) – electrón. En presencia de alto voltaje, estos pares hueco – electrón se dirigen hacia el polo positivo (el electrón) o hacia el polo negativo (hueco) del circuito eléctrico que conforma un detector de radiación. De esta forma se recolecta una carga eléctrica, la cual produce un pulso que puede ser registrado. La intensidad del pulso depende de la energía del fotón que interactuó con el detector y el número de veces que se produce un pulso de determinada intensidad depende de la actividad de la fuente que emitió el fotón. Este es el principio de funcionamiento de los detectores de germanio hiper puro HPGe. Estos detectores son acoplados a analizadores multicanales, los cuales son capaces de clasificar los impulsos generados por el detector en función del voltaje. De esta forma el detector genera un gráfico que relaciona el voltaje del impulso, el cual es presentado como número de canal, con la cantidad de cuentas que son detectadas en ese canal. A este gráfico se lo conoce como espectro gamma [1].

Algunos isótopos radiactivos emiten fotones de energías específicas. Cuando un detector HPGe es expuesto a uno de estos isótopos, se genera un espectro que es específico del elemento objeto de la medición. Esta técnica se llama espectrometría gamma [2-5]. Una de las principales aplicaciones de esta técnica es la medición de isótopos radiactivos en muestras ambientales. Sin embargo, para poder usar la técnica es necesario conocer la relación del canal de detección (voltaje) con la energía de los fotones y la relación de la energía de los fotones con la cantidad de impulsos que el detector es capaz de registrar [6]. A la primera relación se la llama calibración en energías y la segunda relación tiene el nombre de calibración en eficiencias.

La calibración en eficiencias es un trabajo experimental que suele ser combinado con simulaciones mediante técnicas Montecarlo [4, 5, 7-9]. Morera-Gómez et al [3], por ejemplo, calibran por experimentación y simulación Montecarlo un detector HPGe. Esta calibración es verificada con materiales de referencia y a través de intercomparación con otros laboratorios. Liu et al [7] desarrollaron, por su parte una aplicación en GEANT4 para simular el comportamiento de un detector HPGe y, a través de esta simulación, calcular las eficiencias de detección para geometrías regulares. Estas eficiencias fueron empleadas en la mediación de radiación gamma de muestras ambientales. Montalván-Olivares et al [4] también combinan medidas experimentales y cálculos Montecarlo para determinar la eficiencia de pico a máxima energía (full energy peak efficiency) de un detector HPGe usado para medidas ambientales. Esta combinación de técnicas, les permitió desarrollar un método que sustituye parcialmente la experimentación para la calibración en eficiencias dentro del rango de energías que va desde 53 hasta 1408 keV. Por otro lado, Naskar et al [5], demostraron que es posible evitar el proceso experimental de calibración si se emplea el método de comparación de área. En esta técnica se comparan las áreas bajo los picos de una muestra de referencia y la muestra estudiada y se determina la eficiencia. Esta comparación de áreas es aplicable siempre que ambas geometrías sean parecidas. El presente trabajo se relaciona con la aplicación de radioisótopos por cuanto pretende generar una aplicación en GEANT4 que permita el cálculo de eficiencias en geometrías irregulares y evite la determinación de estas eficiencias de forma experimental. Esto es necesario debido a la inexistencia de material de referencia para muestras específicas como bananos y otras frutas o alimentos. En proyectos futuros esta aplicación podrá ser ampliada para calibrar distintos tipos de detectores (detectores de sodio, de silicio, etc) para distintos tipos de muestras (bananos, pescados, etc). Esta aplicación puede ser empleada para el análisis de muestras ambientales de diferentes matrices (aguas y suelos) para detectar contaminantes radioactivos. El presente proyecto se relaciona con la tecnología industrial por cuanto podría ser aplicada para la detección de contaminación radioactiva en plantas industriales que empleen este tipo de material.

En cuanto a aplicaciones de corto plazo, el Departamento de Ciencias Nucleares (DCN) de la Escuela Politécnica Nacional dispone de un detector HPGe acoplado a un analizador multicanal. Este equipo ha sido empleado para detectar la presencia de material radiactivo en muestras de aguas y de alimentos. Sin embargo, al no estar calibrado en eficiencias, la cuantificación de material radioactivo no es posible. La calibración en eficiencias y energías, previstas como parte de este proyecto, permitiría la cuantificación de material radiactivo para muestras típicas analizadas, como el caso de bananos. La calibración y el desarrollo de la



aplicación en GEANT4 le permitirán al Departamento de Ciencias Nucleares incursionar en el análisis de muestras ambientales de radioisótopos para detección y cuantificación de los mismos.

4	Productos esperados (marcar con una “X” al menos uno de los productos no señalados)
----------	--

Tipo de Producto:	Marcar con una “X”
a. Disertación a la Comunidad Politécnica (obligatorio);	X
b. Presentación de un artículo en formato de la Revista Politécnica (obligatorio)	X
c. Proyecto de Titulación;	
d. Aplicación tecnológica construida o implementada;	
e. Patente presentada;	
f. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación.	X
g. Publicaciones científicas indexada en SCIMAGO-SCOPUS/WoS/SCIELO/Latindex Catálogo o un artículo en congreso indexado en SCOPUS.	

5	Descripción y metodología y diseño del proyecto
----------	--

5.1 Descripción, metodología y diseño del proyecto (Máximo dos carillas)

Para la calibración en energías y eficiencias del detector se medirá el número de cuentas detectadas de una fuente ubicada a diferentes distancias del detector. Se utilizarán fuentes radioactivas monopico para la calibración en energías, de manera que se obtengan al menos seis puntos en la curva de calibración [10]. Adicionalmente se empleará ⁶⁰Co, debido a que las especificaciones de la resolución del detector están seleccionadas con base en este isótopo. Se utilizará también ²⁴¹Am debido a que es una fuente multipico de larga vida media. El tiempo de adquisición de datos, o el tiempo de conteo, será determinado de manera que la incertidumbre en el conteo grueso sea menor al 10%. El conteo grueso es el número de fotones detectados, de una energía determinada, que provienen de la fuente y del fondo. La incertidumbre en el conteo grueso viene dada por la ecuación 1 [1].

$$\sigma_{C_g} = \sqrt{C_g} \quad (1)$$

Donde C_g es el conteo grueso. El conteo total C_t está definido como la diferencia entre el conteo grueso y el conteo de fondo C_f [2].

Con los datos de cuentas en función de la distancia se calculará el punto virtual de detección (VDP) para el detector a diferentes energías. El VDP es una abstracción matemática que representa el punto del detector donde ocurren todas las interacciones de los fotones y es empleado para facilitar el proceso de calibración en eficiencias [11] [12].

La eficiencia del detector se define matemáticamente con la ecuación 2.

$$\epsilon = \frac{\text{Número de fotones detectados}}{\text{Número de fotones emitidos por la fuente}} \quad (2)$$

Por su parte, la calibración en energías consistirá en determinar la relación que existe entre el canal de detección de un fotopico y la energía del fotón detectado [4]. Esto se realizará con el conocimiento de que



cada una de las fuentes utilizadas emite fotones con una energía determinada. El resultado de ambas calibraciones son curvas que relaciona energía con canal de detección o energía con eficiencia de detección.

El detector a ser empleado es un detector de germanio hiperpuro de amplio espectro (Broad Energy) modelo BE 2020 de Canberra, acoplado a un multicanal LYNX también de Canberra. Los datos serán adquiridos a través del software Genie 2000, y los datos serán analizados con MatLab ®. Los cálculos Monte Carlo se realizarán en los programas MCNP y Geant4. El modelo digital de este detector, en una primera aproximación, será generado a partir de las especificaciones de fábrica detalladas en la tabla 1 [8].

Tabla 1: Lista de especificaciones físicas del detector BE2020 de Canberra provistas por el fabricante

Elemento	Valor	Unidad
Diámetro activo	50.5	mm
Longitud/espesor	20	mm
Distancia hasta la ventana	4.68	mm
Espesor de la ventana	0.6	mm
Material de la ventana	Compósito de carbono	
Área activa	2000	mm

El modelo digital generado será empleado para simular la adquisición de cuentas de una fuente localizada a diferentes distancias del detector. Las fuentes simuladas serán las mismas que se usaron en la experimentación. Estos resultados simulados serán comparados con los valores experimentales y el error será determinado de acuerdo a la ecuación 3[13].

$$E = \frac{C_{t,s} - C_{t,e}}{C_{t,e}} \times 100 \quad (3)$$

Donde E es el error en porcentaje, $C_{t,s}$ es el conteo total simulado y $C_{t,e}$ es el conteo total experimental. A partir de estos resultados se introducirán modificaciones sobre el modelo digital del detector hasta que el error este por debajo del 10% [7, 13]. Este procedimiento de refinación del modelo digital ha sido empleado en experiencias similares y está recomendado debido a que el proceso de fabricación del detector es estandarizado y las especificaciones provistas no son exactas [7, 9]. Esta primera simulación será realizada en MCNP.

El modelo digital validado será empleado para simular las mismas condiciones en Geant4. Se determinará la desviación que existe entre los resultados simulados en MCNP y los datos obtenidos en Geant4. Se plantea el uso de este software debido a que es de acceso libre y gratuito [14]. Esta característica permitirá la creación posterior de una aplicación más completa para calibrar el detector objeto de este estudio.

Se simulará en Geant4 la adquisición de cuentas de una fuente volumétrica en contacto con el detector. La fuente volumétrica a simular será un contenedor Marinelli de 8.5 cm de diámetro interno que contiene una solución múltiplo de actividad conocida. Con esta simulación se podrá determinar la calibración en eficiencias para el detector en estudio para la geometría especificada en este párrafo. Esta simulación será validada mediante la medición de una fuente volumétrica similar al contenedor simulado.

Finalmente, un procedimiento similar al descrito en el párrafo anterior se seguirá para calibrar al detector en eficiencias y energías para una geometría irregular, como la del banano. Experimentalmente, por métodos espectrométricos se determinará el contenido total de ^{40}K en una muestra de la misma fruta con la calibración obtenida previamente. El contenido determinado por espectrometría será comprobado a través de la determinación del contenido K mediante absorción atómica.



6 Infraestructura, equipos y fondos adicionales.

6.1 Infraestructura y equipos

- Indicar la infraestructura y equipos disponibles para la ejecución del proyecto, con la ubicación actual de los mismos

Tabla 2. Detalle de la infraestructura a ser usada en el proyecto

Infraestructura	Equipos	
	Nombre del Equipo	Ubicación del Equipo
Centro de Irradiación EPN	Detector de Germanio Hiperpuro acoplado a un analizador multicanal	Laboratorio de dosimetría – Departamento de Ciencias Nucleares
	Fuente de cobalto 60 de 3000 Bq	Laboratorio de dosimetría – Departamento de Ciencias Nucleares
	Fuente de cesio 137 de 12 µCi	Laboratorio de dosimetría – Departamento de Ciencias Nucleares
	Computadora de escritorio	Acelerador de electrones, oficinas

6.2 Breve justificación del equipo requerido

- Justificar la infraestructura y equipos solicitados para la ejecución del proyecto e indicar el departamento en el cual se ubicará dicho equipamiento.

Tabla 3. Justificación de la adquisición de materiales adicionales

Equipo/Reactivo	Justificación de uso
Contenedor Marinelli de 1 L de capacidad para detectores de 85 mm de diámetro lleno de solución emisora múltiplo (al menos Am241, Cd109, Co57, Ce139, Hg203, Sn113, Sr85, Cs137, Co60, Y88)	Calibración en eficiencias para fuente volumétrica. Actualmente el laboratorio no cuenta con fuentes para calibración volumétrica del detector.
Fuentes puntuales Ba-133, Cd-109, Co-57, Co-60, Cs-137, Mn-54, Na-22, Am241.	Calibración en energías. Actualmente el laboratorio solo cuenta con fuentes de Co60 y Cs137. Al ser únicamente dos isótopos, no se cuentan con los suficientes puntos para producir la curva de calibración.

6.3 Fondos Adicionales

- No hay fondos provistos por organismos externos.

7. Bibliografía

1. Tsoufanidis, N., *Measurement and detection of radiation*. 2010: CRC press.
2. Turner, J.E., *Atoms, radiation, and radiation protection*. 1995, New York : J. Wiley: New York.
3. Morera-Gómez, Y., et al., *Validation of an efficiency calibration procedure for a coaxial n-type and a well-type HPGe detector used for the measurement of environmental radioactivity*. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2016. **818**: p. 51-56.
4. Montalván Olivares, D.M., M.V.M. Guevara, and F.G. Velasco, *Determination of the HPGe detector efficiency in measurements of radioactivity in extended environmental samples*. Applied Radiation and Isotopes, 2017. **130**: p. 34-42.



5. Naskar, N., et al., *Measurement of naturally occurring radioactive materials, 238 U and 232 Th: anomalies in photopeak selection*. An International Journal Dealing with All Aspects and Applications of Nuclear Chemistry, 2016. **310**(3): p. 1381-1396.
6. Venturini, L. and V.R. Vanin, *HPGe detector efficiency calibration for extended sources in the 50–1400 keV energy range*. Applied Radiation and Isotopes, 1993. **44**(7): p. 999-1002.
7. Liu, C., et al., *Detection efficiency calculations using Geant4 for a broad-energy germanium gamma spectrometer*. An International Journal Dealing with All Aspects and Applications of Nuclear Chemistry, 2017. **312**(3): p. 471-478.
8. Maidana, N.L., et al., *Experimental HPGe coaxial detector response and efficiency compared to Monte Carlo simulations*. Applied Radiation and Isotopes, 2016. **108**: p. 64-74.
9. Venturini, L., N.L. Maidana, and V.R. Vanin. *Aramis: a computer code to estimate total and peak efficiencies of an HPGe photon detector*. in *2007 International nuclear atlantic conference–INAC 2007*. 2007.
10. Ababneh, A.M. and M.M. Eyadeh, *Coincidence summing corrections in HPGe gamma-ray spectrometry for Marinelli-beakers geometry using peak to total (P/T) calibration*. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2015. **8**(3): p. 323-327.
11. Alfassi, Z.B., et al., *HPGe virtual point detector for radioactive disk sources*. Applied Radiation and Isotopes, 2007. **65**(2): p. 253-258.
12. Mohammadi, M.A., et al., *Evaluation of HPGe detector efficiency for point sources using virtual point detector model*. Applied Radiation and Isotopes, 2011. **69**(2): p. 521-526.
13. Helmer, R.G., et al., *The use of Monte Carlo calculations in the determination of a Ge detector efficiency curve*. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, 2003. **511**(3): p. 360-381.
14. Agostinelli, S., et al., *Geant4—a simulation toolkit*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003. **506**(3): p. 250-303.

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN INTERNOS SIN
FINANCIAMIENTO O AUTOGESTIONADOS**
ANEXO 4 - DECLARACIÓN

TIPO DE INVESTIGACIÓN

Investigación básica Investigación aplicada

TÍTULO DEL PROYECTO

Desarrollo de una Aplicación en GEANT4 para la calibración de un detector HPGe para geometrías irregulares.

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DEL PROYECTO

El equipo de investigadores, representado por el Director del Proyecto declara lo siguiente:

- Que el presente proyecto es una creación original de mi autoría y del equipo de investigadores, y por tanto asumimos la completa responsabilidad legal en caso de que un tercero alegue la titularidad de los derechos intelectuales del proyecto, exonerando a la EPN de cualquier acción legal que se derive por esta causa.
- Que el presente proyecto no ha sido presentado en ninguna convocatoria de otra institución pública o privada. El incumplimiento será causal para que el proyecto no sea tomado en consideración.
- Que todos los bienes adquiridos en proyecto permanecerán bajo la custodia y responsabilidad del director de proyecto durante la ejecución del mismo.
- Que si el proyecto genera algún producto o procedimiento susceptible de obtener derechos de propiedad intelectual, de los cuales se deriven beneficios, aceptamos que éstos serán compartidos entre los investigadores y la institución o las instituciones participantes en el proyecto, conforme a lo establecido en el COESC.
- Que el equipo de investigadores y/o instituciones participantes se comprometen a mantener la confidencialidad de la información si ésta podría ser susceptible de protección por patentes, y solicitar la valoración de propiedad intelectual respectiva previa a cualquier publicación o difusión.
- Que para el caso de derechos de autor otorgamos una licencia de uso exclusivo con fines académicos para la o las instituciones participantes en el proyecto.



Firma del Director del Proyecto
Nombre: Roque Antonio Santos Torres
C.I.:1716629959



DECLARACIÓN DEL JEFE DE DEPARTAMENTO

Esta propuesta ha sido aprobada y avalada por el Consejo del Departamento de ~~Ciencias Exactas~~ en sesión del día ~~16 de julio de 2018~~ mediante resolución No. ~~52-18~~.

Las instalaciones, incluyendo personal, edificios, equipo y recursos financieros están a disposición del proponente y sus colaboradores de acuerdo con las especificaciones que se encuentran en esta propuesta.

Firma del Jefe del Departamento

Nombre: *Catalina Vasco*

C.I.: *171174871-3*