

Simulación de la reacción de captura neutrónica por gadolinio por medio de GEANT4

Simulation of the gadolinium neutron capture reaction using GEANT4

Diego Alexander Téllez¹, Robinson Steven Medina¹, José A. Sarta², Edwin Munévar¹ y José Alfonso Leyva²

Citación: D. A. Téllez, R. S. Medina, J. A. Sarta, E. Munévar y J. A. Leyva., “Simulación de la reacción de captura neutrónica por gadolinio por medio de GEANT4”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 3, pp. 28-35, 2019. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.508>

Recibido: 27 de septiembre de 2019

Aceptado: 11 de diciembre de 2019

Publicado en línea: 30 de diciembre de 2019

Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.3.2019.508>

RESUMEN

El uso de nucleidos de gadolinio como agentes de captura de neutrones en la terapia de cáncer por captura neutrónica es de gran interés debido principalmente a su alta sección eficaz de 225.000 barns. El espectro del estado final de la reacción contiene 158-gadolinio (158Gd), emisión de fotones (rayos X y rayos gamma) y electrones (conversión interna y Auger). Este espectro ofrece una física muy rica y de enorme potencial para la eliminación de células tumorales debido a su alta transferencia lineal de energía. En este trabajo presentamos simulaciones de este proceso, realizadas en las últimas seis versiones de Geant4 (10.00.p04, 10.01.p03, 10.02.p03, 10.03.p03, 10.04.p03 y 10.05.p01). Tomando en cuenta que para este trabajo nos interesan particularmente los neutrones de baja energía (energías < 20 MeV), usaremos el paquete G4NeutronHP. Finalmente obtenemos el conteo de eventos, la energía promedio y las distribuciones angulares (theta y phi) de las partículas en el estado final, encontrando, de esta manera, que para neutrones de baja energía, el estudio de la reacción de captura neutrónica por 158Gd es viable con Geant4.

Palabras clave: gadolinio, captura neutrónica, electrones Auger, LET

ABSTRACT

The use of gadolinium nuclides as neutron capture agents in neutron capture cancer therapy is of great interest, mainly because of these nuclides' high cross-section of 225,000 barns. The final state spectrum of the reaction contains gadolinium-158 (Gd-158), photon emission (X-rays and gamma rays) and electrons (internal conversion and Auger electrons). This spectrum offers very rich physics and enormous potential for the elimination of tumor cells due to high linear energy transfer. In this article, we present simulations of this process performed using the last six versions of Geant4 (10.00.p04, 10.01.p03, 10.02.p03, 10.03.p03, 10.04.p03 and 10.05.p01). Given that we are particularly interested in low-energy neutrons (energies <20 MeV) in this work, we used the G4NeutronHP package. Finally, we obtained the event count, the average energy and the angular distributions (theta and phi) of particles in the final state and find that for low-energy neutrons, study of the neutron capture reaction by Gd-158 with Geant4 is viable.

Keywords: gadolinium, neutron capture, Auger electrons, LET

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Proyecto Curricular de Licenciatura en Física, Bogotá, Colombia

² Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Física, Bogotá, Colombia
Email de correspondencia: leyvaa@javeriana.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En 1935, Goldhaber y Taylor [1] describieron de manera teórica la captura de neutrones por medio de núcleos, procedimiento que posteriormente se propuso como posible terapia (NCT, por sus siglas en inglés) contra el cáncer [2]. Esta terapia, de carácter no invasiva, se desarrolla mediante un proceso binario focalizado a partir del uso de fármacos o portadores de isótopos como 10-Boro (^{10}B) y/o 157-gadolinio (^{157}Gd), que se almacenan principalmente en los tejidos cancerígenos y, en una menor proporción, en el tejido sano circundante. Los portadores son entonces irradiados con un haz de neutrones de baja energía que incide en la zona de interés, con lo cual se logra que la terapia se focalice aún más, reduciendo así el posible daño a los tejidos sanos [3] [4] [5] [6].

De los portadores de isótopos, el más utilizado en NCT es el ^{10}B , que tiene una sección eficaz de captura neutrónica, de aproximadamente 3.840 barns [7]. La reacción de captura neutrónica con ^{157}Gd , por su parte, cuenta con una sección eficaz mucho más alta, de aproximadamente 225.000 barns [7]. El estado final de esta reacción (véase la figura 1) se da a través de un núcleo en retroceso de 158-gadolinio (^{158}Gd) y la emisión de rayos γ y electrones de conversión interna

(IC, por sus siglas en inglés). Con posterioridad a la emisión de electrones IC se producen fotones (rayos X) y/o electrones Auger. Debido a su transferencia lineal de energía (linear energy transfer, o LET, por sus siglas en inglés) de aproximadamente $300 \text{ keV}/\mu\text{m}$, los electrones Auger emitidos son altamente capaces de eliminar células tumorales. Esta es una de las razones por las cuales la terapia por captura neutrónica con ^{157}Gd permite lograr distribuciones de dosis y efectos biológicos comparables con aquellos obtenidos a partir de ^{10}B [7] [8] [9] [10].

Lo anterior demuestra el uso potencial y eficiente del ^{157}Gd como agente portador en la terapia por captura neutrónica. Los procesos complejos implicados en dicha captura dejan ver la necesidad de llevar a cabo estudios de simulación que puedan elucidar aún más detalles de la reacción. El objetivo de este trabajo se centra en simular, con Geant4, la reacción de captura neutrónica por ^{157}Gd . Para esto se evalúan cantidades como el número promedio de partículas por captura neutrónica y el correspondiente espectro de energía, que pueden ser contrastadas con trabajos previos, tanto en términos de experimentación como de simulación. Adicionalmente, se determinan las distribuciones angulares de los productos de la reacción, con el fin de verificar qué tan completa es la información concerniente a estas.

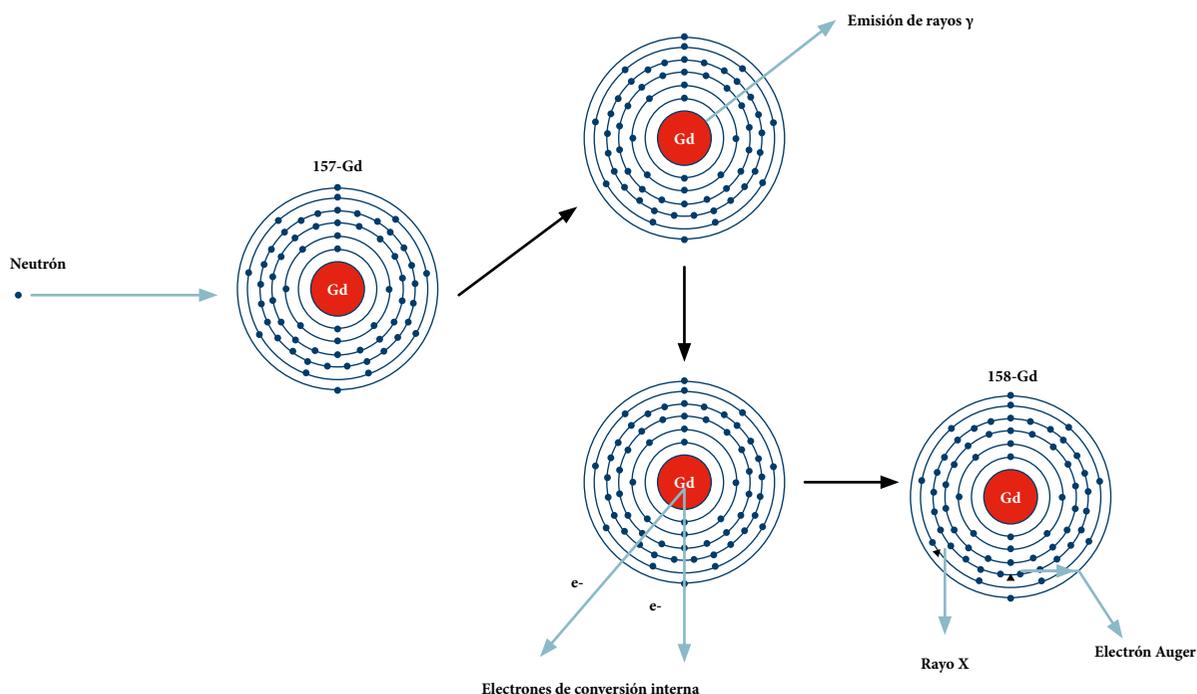


Figura 1. Representación de la reacción GdNC. Reacción producida por la captura de neutrones por ^{157}Gd .

Fuente: Realizada con base en la representación del GdNCT de [7].

2. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO DE LA REACCIÓN $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$

Los estudios previos de la reacción de captura neutrónica por ^{157}Gd están enfocados en el número promedio de partículas producidas y su energía promedio. Entre estos estudios se destaca el trabajo de Sakurai y Kobayashi [11], en el que se determina experimentalmente el espectro de rayos γ y rayos X. Los picos más prominentes se observan a energías de 79,5 keV, 182 keV y 6.750 keV. Con base en este espectro, los autores determinan de manera indirecta el espectro energético de electrones IC y Auger. El espectro de rayos γ también es medido en [16]. En el espectro se observan picos prominentes en 181, 1.187, 5.903 y 6.750 keV. La medición del espectro de los electrones IC se encuentra en el trabajo de Kandlakunta [12]. Allí se observa un espectro discreto que está relacionado principalmente con transiciones a partir de los dos niveles de energía más bajos del núcleo excitado de $^{158}\text{Gd}^*$. Dependiendo de la capa en la que se encuentren los electrones IC (K, L o M), se observa emisión de electrones en el rango de 29 a 228 keV; el pico de mayor intensidad está centrado en 71 keV [12]. Goorley y Nikjoo [7] y Stepanek [9] determinan el espectro de fotones y electrones en la reacción a partir de Montecarlo. Los resultados de estos dos trabajos se muestran en la tabla 1. Como se puede observar, los valores obtenidos con rayos γ y electrones IC son consistentes en ambos trabajos. Por

el contrario, los valores derivados de rayos X y electrones Auger difieren significativamente en los dos trabajos.

Tabla 1. Resultados computacionales obtenidos por Goorley y Nikjoo [7] y Stepanek [9] sobre el número promedio por captura y energía promedio de los núcleos y partículas presentes en el estado final de la reacción $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$

	[7]	[9]
Rayos gamma (keV)	1.330	1.420
N.º productos (yield)	1,83	1,56
Rayos X (keV)	12,77	32,28
N.º productos (yield)	0,84	0,32
Electrones IC (keV)	66,5	70,1
N.º productos (yield)	0,69	0,649
Electrones Auger (keV)	0,85	0,426
N.º productos (yield)	4,93	9,71

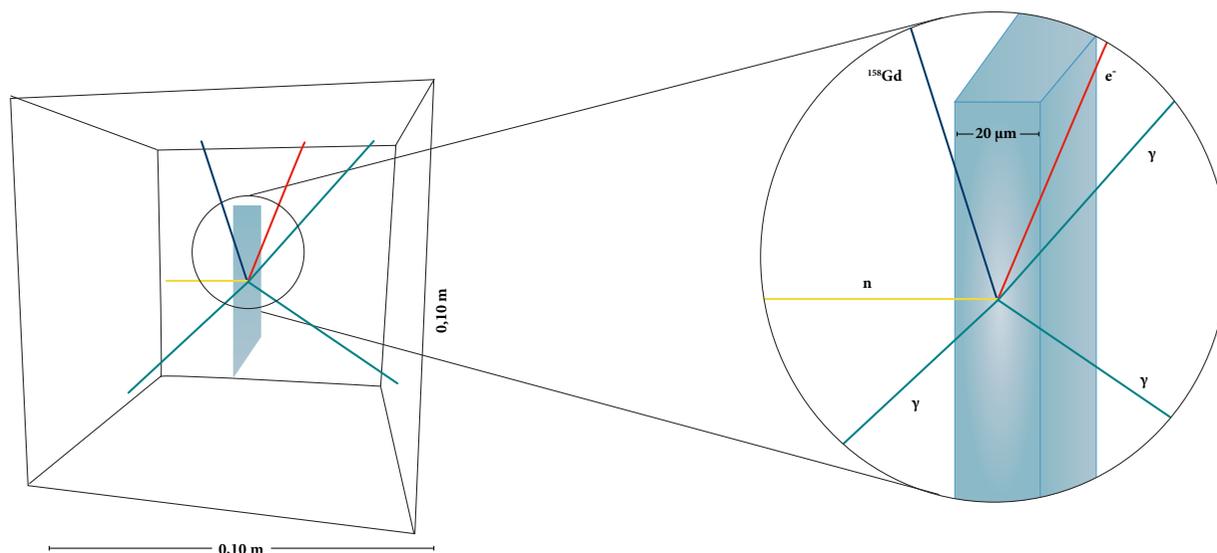
3. SIMULACIÓN CON GEANT4

3.1. Geometría y materiales

La simulación con Geant4 implementa una geometría específica formada por un cubo o volumen principal (*world volume*) de 0,10 m de lado. Dentro de este volumen se ubica el blanco de 0,01 m \times 0,01 m \times 20 μm con una de sus caras laterales ubicada en el origen del volumen principal (véase en la figura 2A el panel superior). El espesor del blanco (20 μm) se estableció con el fin de asegurar que ocurra la captura neutrónica en cada evento.

La selección de este valor se justifica con base en la máxima distancia recorrida (profundidad) por el neutrón incidente dentro del blanco antes de ser capturado (figura 2B).

A



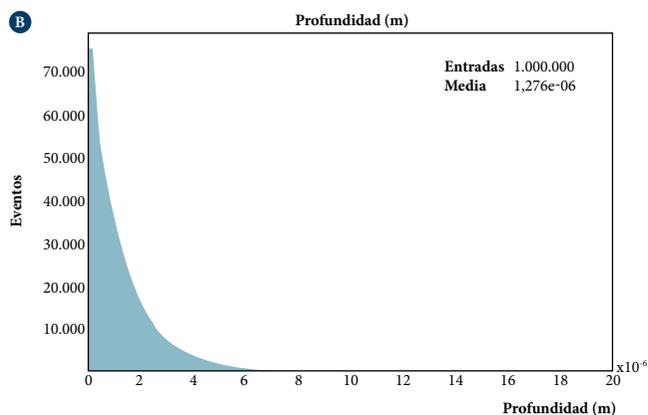


Figura 2. A: Visualización de la geometría de la simulación. El volumen principal corresponde a una caja de 0,10 m de lado hecha de vacío; el blanco, ubicado en el centro del volumen principal, tiene un espesor de 20 μm y está hecho de ^{157}Gd . El haz de neutrones (color amarillo) incide por la izquierda, perpendicularmente al blanco, y produce tres rayos γ (color verde), un electrón (color rojo) y el núcleo de ^{158}Gd en retroceso (color azul). B: Profundidad de penetración del haz de neutrones en el blanco. No se observa captura neutrónica más allá de los 20 μm .

3.2. HAZ DE NEUTRONES

El haz incidente corresponde a un haz de neutrones monoenergético de 0,025 eV¹ y unidireccional dirigido a lo largo del eje z.

3.3. Procesos físicos

Un correcto modelado de reacciones nucleares en simulaciones de Montecarlo requiere el uso de bases de datos especiales que contienen valores recomendados basados en resultados disponibles a nivel experimental y/o teórico para las cantidades físicas relevantes asociadas con la reacción nuclear específica. Para el caso de neutrones de baja energía ($E_n < 20$ MeV) estas bases de datos, llamadas *librerías* o *archivos de datos nucleares evaluados* (ENDF, por sus siglas en inglés), se implementan en Geant4 a partir del paquete G4NeutronHP [14]. Para habilitar el proceso de captura neutrónica, este paquete tiene disponibles librerías como G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP, G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP, G4HadronPhysicsQGSP_BERT_HP, entre otras. Comparaciones entre las tres librerías (con una misma versión de Geant4) no mostraron diferencias significativas en cuanto al número promedio de partícu-

las producidas por captura neutrónica y la correspondiente energía cinética promedio de cada una. Por tanto, en este trabajo se escogió de manera arbitraria la librería G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP.

Las librerías de captura neutrónica generan por defecto únicamente la parte del estado final relacionada con fotones y ^{158}Gd . Para generar electrones en la captura neutrónica de ^{157}Gd se definió la variable G4NEUTRONHP_USE_ONLY_PHOTONEVAPORATION = 1. Adicionalmente, el uso de la librería G4RadioactiveDecayPhysics permitió extender el rango de energía de los electrones hasta un valor mínimo de 29 keV. Se debe mencionar que las ENDF no satisfacen la conservación de momento y energía en algunas reacciones nucleares; por el contrario, estas librerías están construidas con el fin de preservar cantidades promedio generales como energía promedio liberada y número promedio de partículas secundarias, entre otras. Para evitar una conservación forzada de momento y energía a partir de la producción de rayos gamma artificiales se utilizó la variable G4NEUTRONHP_DO_NOT_ADJUST_FINAL_STATE = 1 [14].

4. RESULTADOS

Geant4 cuenta con la funcionalidad de “scorers” para extraer información sobre cantidades físicas. Esta funcionalidad está restringida a cantidades como longitud de trayectoria, energía y dosis depositadas, flujo y número de partículas secundarias. Para tener más independencia y control sobre la simulación y, al mismo tiempo, acceso completo a cualquier cantidad física, se utilizó en su lugar la clase G4UserSteppingAction. Además del número promedio de partículas y núcleos producidos, esta clase permite reconstruir a nivel del vértice primario de la reacción, la energía cinética y distribución angular de las partículas provenientes del estado final de la captura neutrónica por ^{157}Gd .

4.1. Número promedio de partículas y núcleos

La complejidad de la simulación del proceso de captura neutrónica usando ^{157}Gd se revela en el alto grado de variación de los resultados, según cuál sea la versión de Geant4 utilizada. Para cada núcleo y partícula presentes en el estado final (^{158}Gd , fotones y electrones) se hizo una comparación del número promedio producido por captura neutrónica con su respectiva energía promedio, usando las últimas seis ver-

¹ El valor de 0,025 eV corresponde a la energía más probable asociada con un conjunto de neutrones térmicos, que siguen una distribución tipo Maxwell-Boltzmann.

siones de Geant4 (tabla 2). En cada caso se ejecutó un total de dos millones de eventos. Los valores obtenidos difieren significativamente entre cada versión. La versión 10.01 no produjo resultados satisfactorios para el número promedio de electrones, por lo cual no se considera confiable. Se observa estabilidad en los resultados únicamente entre las versiones 10.03 y 10.04.

Según [12] y [15], en la reacción de captura neutrónica se libera, en promedio, un número de 3,29 rayos γ por captura en un rango amplio de energía, con una media de 2,39 MeV. En [7] se obtiene un número promedio de 1,83 rayos γ con energía promedio de 1,33 MeV, mientras que [9] establece 1,56 rayos γ por captura con energía promedio de 1,42 MeV. Las versiones 10.00 y 10.05 son las que producen resultados más cercanos a los reportados por [12] y [15]. No se observa, sin embargo, similitud en ninguna de las versiones con los resultados de [7] y [9].

En [15], el número promedio estimado de electrones IC por captura es de 0,73, con una energía promedio de 91,0 keV; los resultados en [7] y [9] indican un número promedio de electrones IC de 0,69 y 0,65, con energías promedio de 66,5 keV y 70,1 keV, respectivamente. En este caso, las versiones 10.02, 10.03 y 10.04 producen resultados consistentes con [7], [9] y [12]. El valor para el número promedio de electrones por captura obtenido en la versión 10.00 es consistente con el sugerido en [12], de 0,60. La versión 10.05 produce un número promedio muy por debajo de los obtenidos en los otros trabajos.

En general, no se observa uniformidad entre los resultados de los trabajos reportados previamente ni tampoco entre

los resultados de las simulaciones hechas en este trabajo con diferentes versiones de Geant4. Las versiones más consistentes con trabajos previos son 10.00, 10.03, 10.04 y 10.05. Dado que la versión 10.05 contiene los datos de librerías evaluadas más recientes, se usó esta versión como referencia para determinar el espectro de energías de fotones y electrones.

4.2. Multiplicidad y espectro de energía

Para estudiar la multiplicidad y el espectro de energía de la reacción nuclear de captura neutrónica $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ se generó un total de cinco millones de eventos usando la versión 10.05.p01 de Geant4. La figura 3 muestra la multiplicidad en el caso de los fotones y electrones producidos en el estado final de la captura neutrónica. Se observa una tendencia de producción de eventos con tres fotones; en los eventos que contienen electrones en el estado final (existen muchos eventos con ausencia de electrones) se producen primordialmente aquellos con un electrón.

En la figura 4 se observa el espectro continuo de energía en el núcleo de ^{158}Gd . La energía asociada con el retroceso de ^{158}Gd cubre un rango de 0,0017 a 242,88 eV, con un valor medio de 102,93 eV.

La figura 5 presenta el espectro discreto de energía de los fotones emitidos en la simulación. Se dividió el espectro en tres rangos, en los que se aprecian algunos de los picos característicos a 181, 1.187, 6.420, 6.750 y 7.937 keV, reportados en [16]. Si bien es cierto que aparecen la mayoría de los picos característicos, son opacados por otros de mayor intensidad que no aparecen de manera predominante en los datos experimentales.

Tabla 2. Valores para el número promedio por captura y energía promedio de los núcleos y partículas presentes en el estado final de la reacción $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ obtenidos en este trabajo usando las seis versiones de Geant4 más recientes (con la versión 10.06 liberada el 6 de diciembre de 2019 se obtuvieron resultados similares a los de la versión 10.05.p01)

	Geant4 10.00.p04	Geant4 10.01.p03	Geant4 10.02.p03	Geant4 10.03.p03	Geant4 10.04.p03	Geant4 10.05.p01	
^{158}Gd	Número promedio	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
	Energía promedio (eV)	74,454 ± 0,115	106,467 ± 0,072	210,737 ± 0,007	79,504 ± 0,040	79,623 ± 0,078	102,939 ± 0,017
Fotones	Número promedio	3,567 ± 0,002	2,511 ± 0,001	1,120 ± 0,001	3,999 ± 0,003	4,001 ± 0,001	2,938 ± 0,001
	Energía promedio (MeV)	2,212 ± 0,001	3,161 ± 0,002	7,036 ± 0,003	1,967 ± 0,001	1,966 ± 0,001	2,699 ± 0,001
Electrones	Número promedio	0,567 ± 0,001	< 0,0001	0,723 ± 0,001	0,749 ± 0,001	0,752 ± 0,001	0,105 ± 0,001
	Energía promedio (keV)	62,414 ± 0,099	77,793 ± 3,250	58,437 ± 0,060	73,992 ± 0,221	73,709 ± 0,070	84,602 ± 0,033

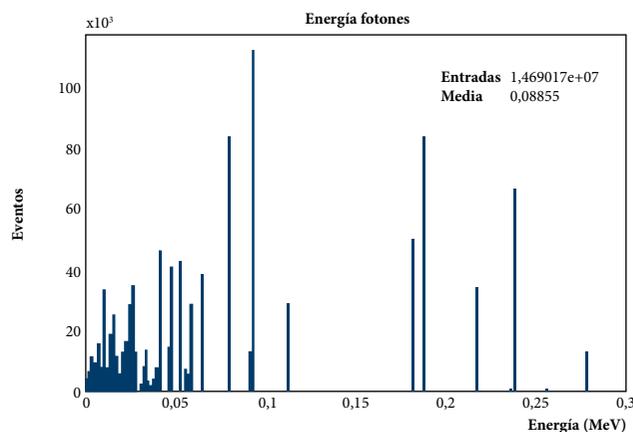
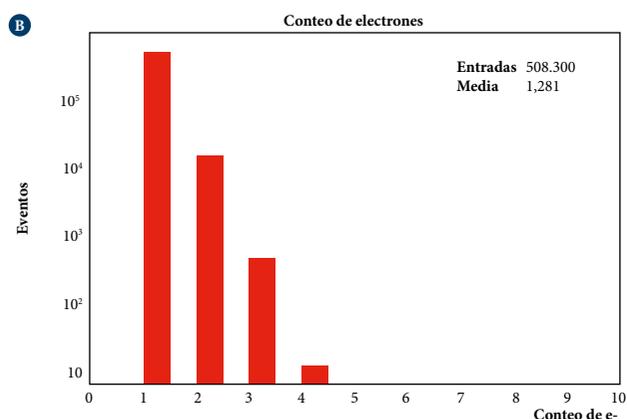
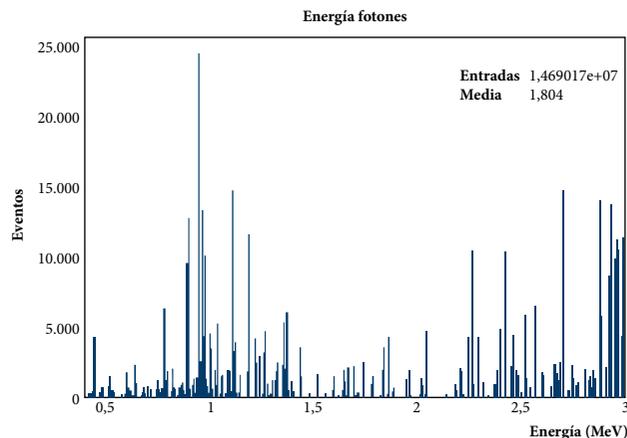
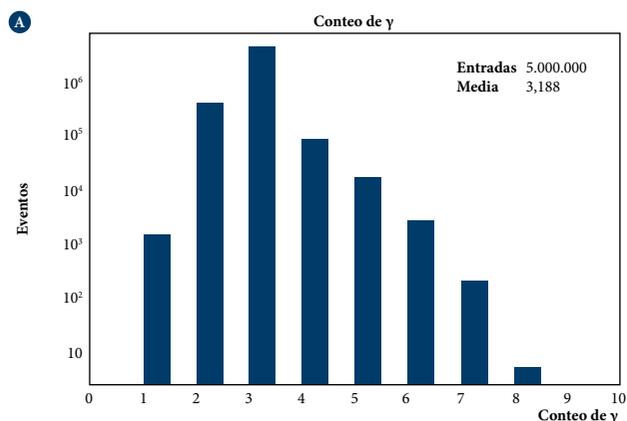


Figura 3. A: Número de fotones emitidos en cada reacción de captura neutrónica. B: Número de electrones emitidos en cada reacción de captura neutrónica. Número de electrones emitidos en cada reacción de captura neutrónica, obtenidos a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01. Nótese la escala logarítmica en el eje vertical de cada gráfica.

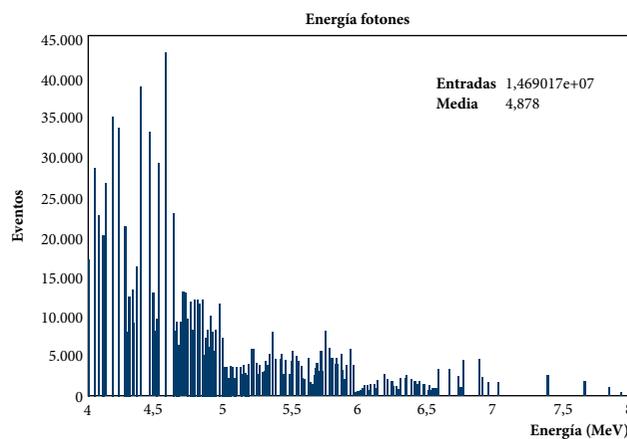
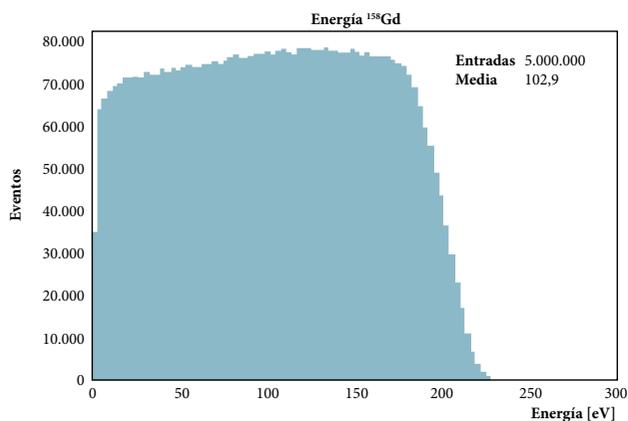


Figura 5. Espectro de energía correspondiente a los fotones emitidos en la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenido a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01. Arriba: Rango entre 0 y 300 keV. Medio: rango entre 400 keV y 3 MeV. Abajo: Rango entre 4 MeV y 8 MeV.

Figura 4. Espectro continuo de energía correspondiente al núcleo en retroceso de ^{158}Gd , producto de la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenido a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01.

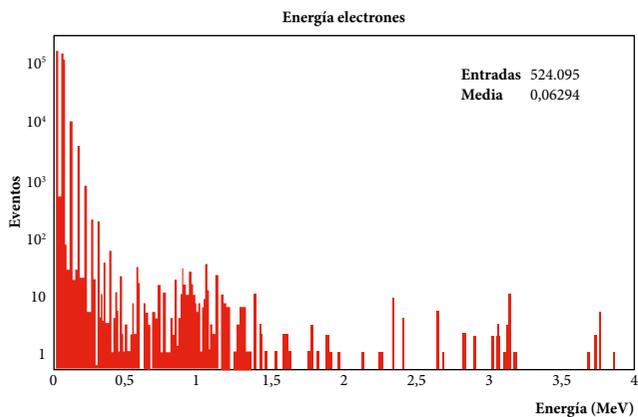


Figura 6. Espectro de energía correspondiente a los electrones emitidos en la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenido a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01. Nótese la escala logarítmica en el eje vertical.

Para el caso de los electrones, el espectro de energía se muestra en la figura 6. Se produce un rango amplio de electrones con energías entre 29,264 keV y 3,833 MeV con un valor medio de 62,21 keV. De igual manera, una inspección cercana al espectro muestra la presencia de los picos característicos reportados en [12]; entre ellos están 29, 71, 78, 131, 173 y 180 keV. Similar al caso de los fotones, los picos característicos aparecen, pero no coinciden en la intensidad reportada en la literatura, por lo cual se ven disminuidos por picos aparentemente no encontrados en los datos experimentales.

4.3. Distribución angular

Las distribuciones angulares (θ y ϕ) de los productos del estado final, generadas con un total de cinco millones de eventos y usando la versión 10.05.p01 de Geant4, se muestran en la figura 7 para ^{158}Gd , fotones y electrones, respectivamente. En los tres casos se aprecia que la distribución en el ángulo polar θ tiene un máximo en 1,57 radianes (90 grados). De igual forma, la distribución en el ángulo azimutal ϕ muestra un comportamiento uniforme en los tres casos. Estas distribuciones muestran que los ángulos de emisión de los fotones y electrones, al igual que el retroceso de ^{158}Gd son generados isotrópicamente en $\cos\theta$ y ϕ .

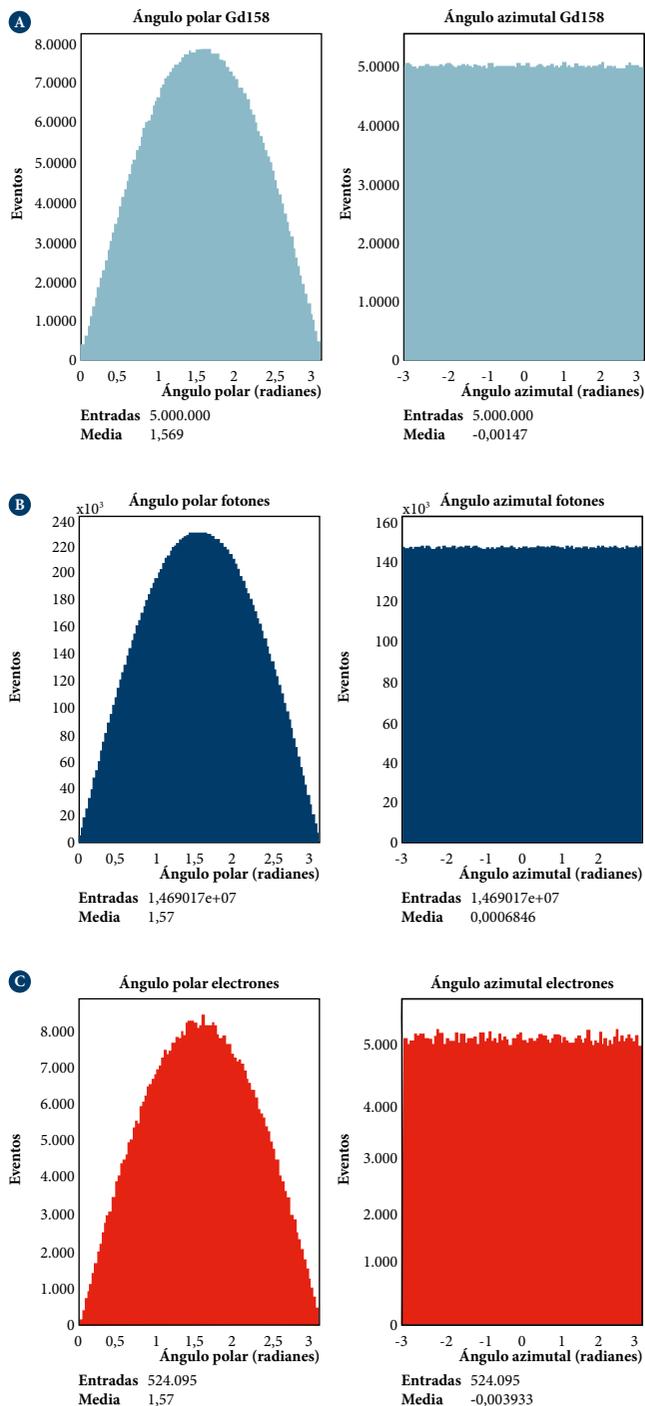


Figura 7. Distribución angular del ángulo polar θ (izquierda) y del ángulo azimutal ϕ (derecha) correspondiente al núcleo en retroceso de ^{158}Gd (A), los fotones emitidos (B) y los electrones emitidos (C) en la reacción nuclear de captura neutrónica por ^{157}Gd , obtenidas a partir de la simulación en Geant4 versión 10.05.p01.

5. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo la simulación de la reacción de captura neutrónica por ^{157}Gd usando la herramienta computacional Geant4. Esta herramienta permite simular el estado final de la captura neutrónica, que incluye ^{158}Gd , fotones y electrones. Aunque los resultados obtenidos con diferentes versiones de Geant4 no muestran en general consistencia entre sí, se observa que los espectros de energía obtenidos con fotones y electrones contienen la mayoría de picos representativos reportados en la bibliografía. Si bien este estudio representa un primer acercamiento a la simulación de esta reacción, los resultados hasta ahora obtenidos muestran que Geant4 es una herramienta viable para simular la captura neutrónica por ^{157}Gd .

Referencias

- [1] H. J. Taylor y M. Goldhaber, "Detection of nuclear disintegration in a photographic emulsion [2]", *Nature*, vol. 135, n.º 3409. Nature Publishing Group, p. 341, 1935. <https://doi.org/10.1038/135341a0>
- [2] G. Locher, "Biological effects and therapeutic possibilities", *The American Journal of Roentgenology*, vol. 36, pp. 1-13, 1936.
- [3] G. A. Miller Jr., N. E. Hertel, B. W. Wehring y J. L. Horton, "Gadolinium neutron capture therapy", *Nuclear Technology*, vol. 103, n.º 3, pp. 320-331, 1993. <https://doi.org/10.13182/NT93-A34855>
- [4] A. Deagostino *et al.*, "Insights into the use of gadolinium and gadolinium/boron-based agents in imaging-guided neutron capture therapy applications", *Future Medicinal Chemistry*, vol. 8, n.º 8, pp. 899-917, 2016. <https://doi.org/10.4155/fmc-2016-0022>
- [5] J. T. Masiakowski, J. L. Horton y L. J. Peters, "Gadolinium neutron capture therapy for brain tumors: A computer study", *Medical Physics*, vol. 19, n.º 5, pp. 1277-1284, 1992. <https://doi.org/10.1118/1.596761>
- [6] G. De Stasio *et al.*, "Gadolinium in human glioblastoma cells for gadolinium neutron capture therapy", *Cancer Research*, vol. 61, n.º 10, pp. 4272-4277, 2001.
- [7] T. Goorley y H. Nikjoo, "Electron and photon spectra for three gadolinium-based cancer therapy approaches", *Radiation Research*, vol. 154, n.º 5, pp. 556-563, 2000. [https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2000\)154\[0556:E-APSFT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2000)154[0556:E-APSFT]2.0.CO;2)
- [8] S. A. Enger, V. Giusti, M.-A. Fortin y H. Lundqvist, "Dosimetry for gadolinium neutron capture therapy (GdNCT)", *Radiation Measurements*, vol. 59, pp. 233-240, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2013.05.009>
- [9] J. Stepanek, "Emission spectra of gadolinium-158", *Medical Physics*, vol. 30, n.º 1, pp. 41-43, 2003. <https://doi.org/10.1118/1.1528176>
- [10] B. N. Fasni, Y. Sardjono y B. P. Lapanporo, "Dose analysis of gadolinium neutron capture therapy (GdNCT) on cancer using SHIELD-HIT12A", *ASEAN Journal on Science & Technology for Development*, vol. 35, n.º 3, pp. 209-212, 2018. <https://doi.org/10.29037/ajstd.543>
- [11] Y. Sakurai y T. Kobayashi, "Experimental verification of the nuclear data of gadolinium for neutron capture therapy", *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 39, n.º sup2, pp. 1294-1297, 2002. <https://doi.org/10.1080/00223131.2002.10875341>
- [12] P. Kandlakunta, L. Cao y P. Mulligan, "Measurement of internal conversion electrons from Gd neutron capture", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 705, pp. 36-41, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.077>
- [13] S. Agostinelli *et al.*, "Geant4: a simulation toolkit", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 506, n.º 3, pp. 250-303, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [14] GEANT4 Collaboration, *Book for application developers*, release 10.5 March 2019. Disponible en <http://geant4-userdoc.web.cern.ch/geant4-userdoc/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/BackupVersions/V10.5-2.0/fo/BookForApplicationDevelopers.pdf>
- [15] G. A. Miller Jr., N. E. Hertel, B. W. Wehring y J. L. Horton, "Gadolinium neutron capture therapy", *Nuclear Technology*, vol. 103, n.º 3, pp. 320-331, 1993. <https://doi.org/10.13182/NT93-A34855>
- [16] Iwa Ou *et al.*, "Measurement of the energy, multiplicity and angular correlation of γ -rays from the thermal neutron capture reaction $\text{Gd}(n,\gamma)$ using JPARC-ANNRI", *AIP Conference Proceedings* 1594, 351, 2014. <https://doi.org/10.1063/1.4874094>