



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
“Francisco García Salinas”

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada.

***Diseño de un espectrómetro de
cubos Bonner versátil para
neutrones***

Tesis

**Que en cumplimiento parcial de los
requerimientos para obtener el grado de
DOCTOR EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA**

Presenta

Antonio Baltazar Raigosa



Directores de Tesis

**Dr. Héctor René Vega Carrillo, Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez
Dr. Luis Octavio Solís Sánchez, Dr. Luis Hernández Adame**

Zacatecas, Zac., México. Agosto de 2018

Diseño de un espectrómetro de cubos Bonner versátil para neutrones

Derechos de autor

Todos los derechos reservados a

Antonio Baltazar Raigosa

Prohibida su reproducción parcial o total,
sin el consentimiento expreso del autor

México MMXVIII



Diseño de un espectrómetro de cubos Bonner versátil para neutrones

Aprobada por el jurado

Dr. Héctor René Vega Carrillo

Dr. José Manuel Ortiz Rodríguez

Dr. Luis Octavio Solís Sánchez

Dra. María del Rosario Martínez Blanco

Dr. Miguel Ángel Salas Luevano

Dr. Rodrigo Castañeda Miranda

Dedicatoria

A mis motorcitos y más grandes amores de mi vida mi Yolanda (Mamita), Ivonne (Hermana), José Antonio (Hijo-Sobrino) y Mía (Hija-Sobrina), quienes son mi admiración, soporte, respaldo, apoyo.

A mis amigas África, Naty, Mónica y Bárbara quienes creen y confían en mí y que me apoyaron a lo largo de este trayecto.

Al doctor H.R. Vega-Carrillo, más que mi asesor lo considero un amigo y persona exitosa, un ejemplo a seguir y de quien espero continuar aprendiendo y colaborando.

Agradecimientos

A la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, en particular al Centro de Investigación e Innovación Tecnológica Industrial (CIITI) por haberme acogido, permitiéndome continuar y concluir esta nueva etapa de mi vida.

Al Dr. Héctor René Vega Carrillo quién a lo largo de mi formación de licenciatura, maestría y esta etapa de doctorado que concluye hoy como tal, tuvo la paciencia, disposición y tiempo, para inculcar el amor por la verdadera investigación, líder mundial en su área y un ejemplo a seguir.

A los Doctores José Manuel Ortiz Rodríguez, Luis Octavio Solís Sánchez, Rodrigo Castañeda Miranda, María del Rosario Martínez Blanco y Héctor Alonso Guerrero Osuna, quien a través de sus enseñanzas y fondos de sus diversos proyectos de investigación me apoyaron para concluir los estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca parcial que me otorgó para realizar los estudios de doctorado.

Antonio Baltazar Raigosa
Zacatecas, Zac. México
10 de agosto de 2018

RESUMEN

En diversas áreas del conocimiento como investigación, desarrollo o aplicación, los neutrones se encuentran inmersos ya sea como producto secundario de otras reacciones o aplicados con un propósito en particular. El espectrómetro de esferas Bonner es actualmente el sistema más empleado para determinar la energía de los neutrones, usando detectores activos o pasivos, en diferentes ámbitos como la nucleoelectricidad, los rayos cósmicos y la física médica. El uso del código Monte Carlo en el transporte de la radiación nos permite estimar de forma precisa dosis, fluencias y espectros. El objetivo de este trabajo es diseñar un espectrómetro con moderadores cúbicos con la versatilidad de poder emplear tanto detectores pasivos como activos, usando el Código Monte Carlo para obtener las matrices de respuesta, se compararán los resultados con los obtenidos con el SEEB empleado por otros autores.

Palabras Clave: Esferas Bonner, Monte Carlo, Neutrones, Función Respuesta, Detector.

ABSTRACT

It is well to known that in different knowledge's areas as research, application and development neutrons are involved either, whether as a product of secondary reactions or applied it to a specific purpose. The Bonner Sphere Spectrometer actually is widely used to detect neutrons using active or passive detectors in health physics and research arenas. The Monte Carlo Code in radiation transport is an effective way to predict absorbed dose distributions and neutron spectra. The aim of this work is design and build a spectrometer as a cubic moderators with the versatility to use passive and active detectors, using Monte Carlo Code to obtain the response matrix, compare the results with SEEB used by others authors.

Keywords: Bonner Sphere Spectrometer, Monte Carlo, Neutrons, Response Function, Detector.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1.1 Justificación | 15 |
| 1.2 Problema científico | 15 |
| 1.3 Objetivo general | 16 |
| 1.3.1 Objetivos particulares | 16 |
| 2 REVISIÓN DE LITERATURA | 17 |
| 2.1 El neutrón..... | 17 |
| 2.1.1 La interacción de los neutrones con la materia | 19 |
| 2.2 Aplicaciones de los neutrones | 22 |
| 2.3 Detección de los neutrones | 23 |
| 2.3.1 Detectores pasivos y activos..... | 24 |
| 2.3.2 El detector ^3BF | 26 |
| 2.3.3 Los detectores forrados con boro..... | 30 |
| 2.3.4 Los detectores de ^6Li | 31 |
| 2.3.5 Los detectores ^3He | 32 |
| 2.3.6 Cámaras de fisión | 33 |
| 2.3.7 Detectores de neutrones a base de activación de laminillas | 35 |
| 2.3.8 Medición del espectro de energía de los neutrones por la dispersión de protones..... | 37 |
| 2.3.9 Los detectores proporcionales empleados como espectrómetros de neutrones rápidos. | 38 |
| 2.3.10 Centelladores orgánicos empleados para espectrometría de neutrones rápidos. 40 | |
| 2.3.11 Detección de neutrones rápidos mediante reacciones de activación de umbral. 41 | |
| 2.3.12 Medición de la energía del neutrón con un espectrómetro cristalino.42 | |
| 2.3.13 Detectores de neutrones autoalimentados..... | 42 |
| 2.3.14 Detección por el método tiempo de vuelo. | 44 |
| 2.4 Sistemas espectrométricos..... | 45 |
| 2.4.1 Sistema Espectrométrico de Esferas Bonner (SEEB). | 47 |
| 2.4.2 Espectrómetro pasivo multicapa para neutrones..... | 48 |
| 2.4.3 Espectrómetro para neutrones anidado (NNS) | 49 |
| 2.4.4 Espectrómetro cilíndrico (CYSP) | 49 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.5 | Métodos Monte Carlo | 51 |
| 2.5.1 | EGS..... | 55 |
| 2.5.2 | MCNP | 56 |
| 2.5.3 | PENELOPE..... | 57 |
| 2.5.4 | GEANT | 57 |
| 3 | MATERIALES Y MÉTODOS | 58 |
| 3.1 | Código MCNP y sus librerías..... | 58 |
| 3.2 | Detector puntual..... | 59 |
| 3.3 | Sistema Espectrométrico de Cubos Bonner pasivo (SECB pasivo)..... | 60 |
| 3.4 | Sistema Espectrométrico de Cubos Bonner activo (SECB activo)..... | 65 |
| 3.5 | Sistema de Espectrométrico de Cubos Bonner (SECB) | 68 |
| 3.6 | Monitor de área pasivo..... | 72 |
| 4 | RESULTADOS | 73 |
| 4.1 | Detector puntual | 73 |
| 4.2 | Detector pasivo | 74 |
| 4.2.1 | Fluencia de los neutrones..... | 74 |
| 4.2.2 | Reacciones de absorción en el detector | 79 |
| 4.2.3 | Reacciones de dispersión elástica en el detector | 84 |
| 4.2.4 | Producción de fotones en el detector..... | 89 |
| 4.2.5 | Reacciones totales en el detector..... | 94 |
| 4.3 | Detector activo | 101 |
| 4.3.1 | Fluencia de los neutrones en los detector pasivo, activo y puntual.. | 111 |
| 4.4 | Monitor de área pasivo | 117 |
| 5 | DISCUSIÓN..... | 118 |
| 5.1 | Fluencia de los neutrones | 118 |
| 5.2 | SECB pasivo | 118 |
| 5.3 | SECB activo | 128 |
| 5.4 | Monitor de área pasivo | 132 |
| 6 | CONCLUSIONES..... | 134 |

| | |
|--------------------------|------------|
| REFERENCIAS | 137 |
| APÉNDICE | 150 |
| CURRICULUM..... | 151 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Detector forrado con ^{10}B en sus paredes | 30 |
| Figura 2. Detector de fisión..... | 34 |
| Figura 3. 1. Neutrones moderados y detectados, 2. Neutrones moderados que escapan del moderador, 3. Neutrones que atraviesan siendo invisible el sistema de moderación para ellos y 4. Neutrones que sufren captura parásita dentro del material. | 47 |
| Figura 4. Componentes de la simulación del MCNP | 56 |
| Figura 5. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector puntual..... | 60 |
| Figura 6. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector pasivo de laminillas de oro en posición vertical. | 61 |
| Figura 7. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector pasivo de laminillas de oro en posición horizontal. | 62 |
| Figura 8. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector Activo de ^3He | 66 |
| Figura 9. Esquema de anidación y diseño del sistema de moderación de neutrones. ... | 70 |
| Figura 10. Esquema del SECB en modo pasivo..... | 71 |
| Figura 11. Esquema del SECB en modo activo..... | 71 |
| Figura 12. Monitor de área Pasivo SECB. | 72 |
| Figura 13. Fluencia de los neutrones bajo los diferentes espesores de moderación del SECB..... | 73 |
| Figura 14. Fluencia de neutrones en el detector desnudo de Au en posición vertical y horizontal | 75 |
| Figura 15. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 2"..... | 75 |
| Figura 16. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 3"..... | 76 |
| Figura 17. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 5"..... | 76 |
| Figura 18. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 8"..... | 77 |
| Figura 19. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 10". | 77 |
| Figura 20. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 12". | 78 |
| Figura 21. Matriz de fluencia de neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal | 78 |
| Figura 22. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector desnudo de Au colocado en forma vertical y horizontal. | 79 |
| Figura 23. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador de 2"..... | 80 |
| Figura 24. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 3"..... | 80 |
| Figura 25. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 5"..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 26. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 8" | 81 |
| Figura 27. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 10" | 82 |
| Figura 28. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 12" | 82 |
| Figura 29. Matriz de reacciones de absorción en el detector (Au) en posición vertical y horizontal generadas por los neutrones..... | 83 |
| Figura 30. Reacciones elásticas en el detector (Au) desnudo producidas por los neutrones colocado en forma vertical y horizontal..... | 84 |
| Figura 31. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 2" | 85 |
| Figura 32. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 3" | 85 |
| Figura 33. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 5" | 86 |
| Figura 34. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de | 86 |
| Figura 35. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 10" | 87 |
| Figura 36. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 12" | 87 |
| Figura 37. Matriz de las reacciones elásticas producidas por los neutrones en el detector (Au) en posición vertical y horizontal. | 88 |
| Figura 38. Producción de fotones en el detector (Au) por la interacción de los neutrones en posición vertical y horizontal..... | 89 |
| Figura 39. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 2" | 90 |
| Figura 40. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 3" | 90 |
| Figura 41. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 5" | 91 |
| Figura 42. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 8" | 91 |
| Figura 43. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 10" | 92 |
| Figura 44. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 12" | 92 |
| Figura 45. Matriz de la producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones..... | 93 |
| Figura 46. Reacciones totales en el detector (Au) desnudo en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones..... | 94 |
| Figura 47. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 2" | 95 |
| Figura 48. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 3" | 95 |
| Figura 49. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 5" | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figura 50. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 8"..... | 96 |
| Figura 51. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 10"..... | 97 |
| Figura 52. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 12"..... | 97 |
| Figura 53. Matriz de las reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal en cada moderador..... | 98 |
| Figura 54. Fluencia de neutrones en el detector ³ He con los diferentes espesores de moderación..... | 101 |
| Figura 55. Reacciones (n,gamma) por unidad de volumen en el detector ³ He por la interacción de los neutrones con los diferentes espesores de moderación..... | 102 |
| Figura 56. Reacciones (n,p) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ³ He con los diferentes espesores de moderación..... | 103 |
| Figura 57. Reacciones (n,d) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ³ He con los diferentes espesores de moderación..... | 104 |
| Figura 58. Reacciones (n,t) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ³ He con los diferentes espesores de moderación..... | 105 |
| Figura 59. Reacciones (n,alpha) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ³ He con los diferentes espesores de moderación..... | 106 |
| Figura 60. Reacciones totales por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ³ He con los diferentes espesores de moderación..... | 107 |
| Figura 61. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³ He y Au con un moderador de 2"..... | 111 |
| Figura 62. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³ He y Au con un moderador de 3"..... | 112 |
| Figura 63. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³ He y Au con un moderador de 5"..... | 113 |
| Figura 64. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³ He y Au con un moderador de 8"..... | 114 |
| Figura 65. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³ He y Au con un moderador de 10"..... | 115 |
| Figura 66. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³ He y Au con un moderador de 12"..... | 116 |
| Figura 79. H*(10) calculada para el SECB de 5 ", 8" y 10"..... | 117 |
| Figura 67. Matriz respuesta para SECB/Au..... | 121 |
| Figura 68. Matriz respuesta para SECB/Au..... | 122 |
| Figura 69. Matriz respuesta para SEEB con laminillas de oro como detector térmico para neutrones..... | 122 |
| Figura 70. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 2" de arista y las obtenidas por Bedogni <i>et al.</i> 2011 con la esfera de 2" de diámetro..... | 123 |
| Figura 71. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 3" de arista y las obtenidas por Bedogni <i>et al.</i> , 2011; Amgarou <i>et al.</i> , 2009 & Fernández <i>et al.</i> , 2007, con la esfera de 3" de diámetro..... | 124 |
| Figura 72. Función respuesta calculada en este trabajo con el cubo de 5" de arista y las obtenidas por Mohammadi <i>et al.</i> , 2015; Bedogni <i>et al.</i> , 2011; Amgarou <i>et al.</i> , 2009 & Fernández <i>et al.</i> , 2007, con la esfera de 5" de diámetro..... | 125 |

| | |
|--|-----|
| Figura 73. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 8" de arista y las obtenidas por Mohammadi <i>et al.</i> , 2015; Bedogni <i>et al.</i> , 2011; Amgarou <i>et al.</i> , 2009 & Fernández <i>et al.</i> , 2007, con la esfera de 8" de diámetro. | 126 |
| Figura 74. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 10" de arista y las obtenidas por Mohammadi <i>et al.</i> , 2015; Bedogni <i>et al.</i> , 2011; Amgarou <i>et al.</i> , 2009 & Fernández <i>et al.</i> , 2007, con la esfera de 10" de diámetro. | 127 |
| Figura 75. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 12" de arista y las obtenidas por Mohammadi <i>et al.</i> , 2015; Bedogni <i>et al.</i> , 2011; Amgarou <i>et al.</i> , 2009 & Fernández <i>et al.</i> , 2007, con la esfera de 12" de diámetro. | 128 |
| Figura 76. Matriz respuesta para SEEB con un detector de ³ He esférico (Vega-Carrillo <i>et al.</i> , 2004). | 129 |
| Figura 77. Matriz respuesta para SECB con un detector de ³ He. | 130 |
| Figura 78. Volúmenes moderadores de la Esfera Vs Cubo. | 131 |
| Figura 80. Espectro de fotoneutrones en los LINAC's y la respuesta de SECB pasivo de 5" | 132 |
| Figura 81. H*(10) Calculada por el SECB pasivo de 5" como monitor de área y el monitor de área Berthold LB6411. | 133 |

1 INTRODUCCIÓN

A partir de que se tuvo conocimiento de la radiación ionizante existente en el entorno y la dificultad que se tiene para ser detectada puesto que resulta imperceptible para nuestros sentidos, los detectores de la radiación ionizante empezaron a jugar y tener un papel muy importante en diversas áreas como la medicina, biología, ciencia de los materiales, física de altas energía, así como en aplicaciones de monitoreo y reconstrucción de imágenes [Shaikh 2008].

A lo largo de la historia se han ido desarrollado diferentes tipos de detectores como los detectores gaseosos, detectores semiconductores y detectores de centelleo, cada uno de ellos se emplean de forma muy específica de acuerdo al tipo de la radiación que se desee medir, teniendo sus ventajas y desventajas muy particulares cada uno de ellos según sea el tipo y energía del campo de radiación en cuestión [Shaikh 2008], así mismo diversos métodos y técnicas.

Sin embargo en los campos de radiación en donde se busca implementar los detectores antes mencionados, se encuentran campos de radiación mixta y condiciones que pueden alterar las mediciones y lecturas de los sistemas de detección, por tal motivo es importante determinar el uso de ellos tomando en cuenta estos factores y condiciones para elegir el detector más adecuado para emplearlo [Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015].

Así mismo los detectores de la radiación de acuerdo a su principio de operación, los elementos que lo integran y la forma de presentarnos la información se les denomina activos y/o pasivos y según sean las condiciones y naturaleza del campo de radiación a ser medido se determina el uso de cada uno de ellos [Maglieri *et al.*, 2015; Maciak 2015; Wiegel *et al.*, 2012].

Debido al tiempo muerto y al apilamiento de pulsos como consecuencia en los detectores activos cuando llegan a ser usados en áreas como las salas de tratamiento de radio terapia donde se presentan campos electromagnéticos de altas frecuencias [Kry *et al.*, 2011], afectando la electrónica contenida en este tipo de detectores o la dificultad que se tiene para distinguir la componente neutrónica dentro de un campo mixto de radiación se emplean los detectores pasivos [Maglieri *et al.*, 2015; Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015; Benites-Rengifo, Vega-Carrillo y Velazquez-Fernandez 2014].

Ya sea en investigación, desarrollo o implementación en particular los neutrones desde su descubrimiento por Chadwick en 1932 [Vega-Carrillo *et al.*, 2007] han sido empleados o detectados en diversas áreas del conocimiento como lo es la protección radiológica, haces de dosimetría, radiografías en base a neutrones, análisis por activación neutrónica [Vega-Carrillo *et al.*, 2014; Patil *et al.*, 2012], instalaciones médicas y nucleares, aceleradores lineales médicos (LINAC's) e industriales, ciclotrones, generadores de neutrones, fuentes de emisoras de neutrones para calibración, radiografía, incluso en el ambiente por mencionar algunos ejemplos [Maciak *et al.*, 2015; Zat'ko *et al.*, 2011; Shaik 2008].

Cabe destacar que sin importar si los neutrones detectados en un área de interés se encuentran presentes de forma antropogénica (producidos directa o indirectamente como partículas secundarias de un proceso) [Marafini *et al.*, 2016; Polaczek-Grelik *et al.*, 2010] o natural [Vega-Carrillo *et al.*, 2014; Pioch *et al.*, 2011; Vukovic *et al.*, 2010] es de vital importancia determinar su espectro con la finalidad de desarrollar y mejorar las medidas de protección radiológica logrando salvaguardar la salud del personal ocupacionalmente expuesto o que se encuentra en la vecindad de dichos espacios evitando la posibilidad de desarrollar neoplasias consecuencia de las dosis recibidas por los neutrones presentes [Mohammadi *et al.*, 2016; Jahangiri *et al.*, 2015; Benites-Rengifo, Vega-Carrillo y Velazquez-Fernandez 2014] o si se trata de pacientes determinar la posibilidad de inducir un cáncer secundario, como lo menciona Maglieri *et al.*, (2015); Atarod *et al.*, (2013), debido a que se puede causar daño a nivel celular o del ADN [Newhauser & Durante, 2011; Allan, 2008; Xu *et al.*, 2008], cuando los LINAC's operan con fotones de energía superior a 8 MeV al interactuar con los núcleos de los materiales al interior de la sala de radioterapia principalmente con los materiales del cabezal del LINAC [Konefal *et al.*, 2008], y en menor grado el cuerpo del paciente se producen neutrones al interior de la sala de tratamiento [Vega-Carrillo *et al.*, 2010a].

Así mismo los campos de neutrones presentes pueden generar la activación de algunos radionúclidos de los diversos materiales que se encuentran al interior de la sala convirtiéndose en fuentes emisoras de radiación desde algunos segundos hasta días [Mohammadi *et al.*, 2016; Konefal *et al.*, 2012; Polaczek-Grelik *et al.*, 2012], incluso estudios han demostrado que el argón presente en el aire también sufre activación [Vega-Carrillo *et al.*, 2010b].

Debido a la complejidad de las interacciones del neutrón con el ambiente y la materia resulta complicado determinar la energía de los ellos y establecer el espectro neutrónico en un área o campo de radiación de interés [Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015] por tal motivo es de gran importancia desarrollar más y mejores herramientas para determinar su espectro y tasas de conteo.

Actualmente el sistema empleado para medir el espectro de neutrones es el Sistema Espectrométrico de Esferas Bonner (SEEB), el cual se emplea desde 1960, con la capacidad de utilizarlo con detectores pasivos y/o activos [Mohammadi *et al.*, 2016; Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015; Lee and Sheu 2015; Xin *et al.*, 2014].

El conocimiento del espectro neutrónico aparte de establecer protocolos de protección radiológica adecuados, nos permite diseñar espacios más seguros y libres de contaminación consecuencia de los neutrones o por lo menos por debajo de los estándares de riesgo establecidos [Maglieri *et al.*, 2015; Benites-Rengifo, Vega-Carrillo y Velazquez-Fernandez 2014; Vega-Carrillo *et al.*, 2010a; Vega-Carrillo *et al.*, 2010b].

1.1 Justificación

Con la finalidad de ofrecer una herramienta más de detección para determinar el espectro de neutrones de cualquier energía en ciertas áreas en donde existen campos de radiación para ser caracterizados, con un diseño propio y más accesible a nuestra tecnología para ser construido, con la versatilidad de que pueda operar tanto con detectores activos y pasivos haciendo un mínimo arreglo, el cual sea original puesto que se busca generar conocimiento y tecnología, y al mismo tiempo innovar, se calcularon las funciones respuesta para obtener posteriormente la matriz de respuesta para el detector pasivo de laminillas de oro y las respectivas funciones y matriz para el detector activo ^3He , mediante el código Monte Carlo MCNP5, posteriormente realizó la comparación con los resultados obtenidos por otros autores mediante el Sistema Espectrométrico de Esferas Bonner.

Con base en los hechos señalados, el problema científico de esta investigación es el siguiente.

1.2 Problema científico

Diseñar un sistema espectrométrico para neutrones con moderadores cúbicos de polietileno con la versatilidad de usar un detector pasivo y un detector activo.

Para resolver este problema el objetivo general de este estudio es el siguiente.

1.3 Objetivo general

Diseñar y comparar un sistema espectrométrico de Cubos Bonner capaz de usar un detector activo (^3He) o un detector pasivo (laminilla de Au).

1.3.1 Objetivos particulares

- Calcular el espectro de neutrones para 23 fuentes monoenergéticas sin detector.
- Calcular el espectro de neutrones para 60 fuentes monoenergéticas con el detector pasivo de laminillas de Au.
 - En posición Vertical.
 - En posición horizontal.
- Calcular el espectro de neutrones para 60 fuentes monoenergéticas con el detector activo de ^3He .
- Comparar los resultados del Espectrómetro de Cubos Bonner y con los obtenidos por otros autores con el SEEB.
- Mediante los coeficientes de conversión de fluencia a $\text{H}^*(10)$, se tomara el moderador que tenga una mejor respuesta para usarse como monitor de área en los LINAC's y comparar la respuesta con un sistema comercial para observar el comportamiento del SECB vs Berthold LB6411.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El neutrón

Ernest Rutherford fue el primero en proponer la existencia del neutrón en 1920, el intentaba explicar que los núcleos no se desintegran por la repulsión electromagnética de los protones. Sin embargo el primero en introducir el término neutrón fue William Draper Harkins en 1921 quien lo representaba como un electrón negativo y un núcleo de hidrógeno [Peake 1989].

No fue sino hasta diez años después en 1930 que se le dio al neutrón el sentido que conocemos de partícula fundamental cuando los físicos alemanes Bothe y Becker reportaron que la exposición de elementos ligeros como boro, litio y en particular berilio a radiación alfa proveniente de un isótopo del polonio daba como resultado a una radiación altamente penetrante capaz de atravesar espesores gruesos de elementos pesados sin ser absorbida de manera significativa [Peake 1989].

En los años de 1931 y 1932, en el Instituto del Radio en París, los científicos franceses, Frédéric e Irène Joliot-Curie, se interesaron por estudiar la radiación encontrada por Bothe y Becker, observaron que cuando ésta radiación se hacía incidir en materiales altamente hidrogenados como el agua y la parafina se exponían era absorbida, pero esta interacción daba lugar a la eyección de protones a altas velocidades [Peake 1989].

Al mismo tiempo, Chadwick interpretó los resultados encontrados por Frédéric e Irène Joliot-Curie ya que presentaban algunas inconsistencias, pues se daba la explicación de que la eyección de protones era consecuencia a fotones de altas energías, lo cual no concordaba con la capacidad de atenuación de los materiales hidrogenados. Al reproducir el experimento de Frédéric e Irène Joliot-Curie, Chadwick explicó que la radiación encontrada estaba formada por partículas con masa cercana a la del protón pero sin carga lo cual le permite tener una gran penetrabilidad en materiales, de esta manera encontró la relación con el tipo de neutrones del primer postulado de Rutherford, al descartar que la radiación encontrada por Bothe fuese radiación gamma [Peake 1989].

Los neutrones son un tipo de radiación que maneja diferentes niveles de energía, en la literatura se les ha categorizado en tres grupos principalmente, se denominan neutrones térmicos a los que tienen energías $E_n < 1$ eV, otra clase son los neutrones epitérmicos con energías en el intervalo $1 \text{ eV} < E_n < 100 \text{ keV}$ y por último, encontramos a los neutrones rápidos con energías de $E_n > 100 \text{ keV}$ [Mohammadi, *et al.*, 2016; Lee, and Sheu 2015; Gómez, Iglesias y Sánchez-Doblado 2010; Bedogni, *et al.*, 2011].

El neutrón es una partícula subatómica que no tiene carga eléctrica y tiene una masa de 1.6749×10^{-27} kg que equivale a $939.573 \text{ MeV}/c^2$. Es estable cuando se encuentra dentro del núcleo atómico y se cambia a inestable, cuando se encuentra fuera de éste, decayendo con una vida media de 886 segundos, a un protón, un negatrón β^- y un antineutrino $\bar{\nu}$.

2.1.1 La interacción de los neutrones con la materia

Al momento que la radiación incide sobre un material se producen diferentes fenómenos los cuales dependen de diversos factores como son: el tipo de radiación incidente (fotones, electrones, neutrones, etc.), la energía de dicha radiación, así como del tipo de material sobre el que incide y de su estado físico [ARNA 2007].

Si la energía de la radiación incidente es lo suficientemente alta producirá ionización en el material, es decir, dicha radiación será capaz de arrancar electrones de los átomos, los cuales a su vez pueden o no seguir causando ionización en el medio. A esta radiación incidente se le conoce como radiación primaria y a los electrones arrancados se les conoce como radiación secundaria, la cual es la principal causa de los efectos (ionización, excitación, disociación de moléculas,...) que se provocan debido a la radiación ionizante [ARNA 2007].

Los tipos de radiación ionizante son: la radiación electromagnética en donde caen los rayos X y los gamma, este tipo de radiación carece de masa y de carga eléctrica, también, se encuentra la radiación beta (electrones negativos y positivos) y partículas pesadas (protones, deuterones, partículas alfa y otros iones pesados), las cuales cuentan con masa y con carga eléctrica y por último, la radiación de nuestro interés, los neutrones, los cuales tienen una masa diferente de cero pero si carecen de carga eléctrica [ARNA 2007].

La interacción de los neutrones con la materia se presenta de diferente forma que la de las partículas cargadas y a los rayos gamma. Al carecer de carga eléctrica las

interacciones de los neutrones se producen por colisiones directas en las que solo actúan fuerzas nucleares de corto alcance [ARNA 2007].

Para cuantificar cuanto disminuye la intensidad de un haz de neutrones al atravesar algún medio absorbente, es decir la cantidad de radiación que logra atravesar un material, se emplea la siguiente expresión:

$$I(x) = I_0 e^{(-N \sigma x)} \quad (1)$$

En donde x es el espesor, N es el número de átomos por unidad de volumen y σ es la sección eficaz microscópica del medio o material absorbente.

De acuerdo con la Agencia de Regulación Nuclear de Argentina (2007), otro parámetro de interés en la interacción de los neutrones con la materia, es el denominado camino libre medio (λ), el cual corresponde a la distancia promedio que recorre un neutrón entre dos colisiones sucesivas y se calcula con la expresión 2:

$$\lambda = 1/\Sigma \quad (2)$$

En donde a Σ se le denomina como la sección eficaz macroscópica

La experimentación y observación de la interacción del neutrón con la materia, ha permitido clasificar este fenómeno principalmente en dos procesos, (a) la dispersión cuando el neutrón es desviado de su trayectoria y (b) la absorción, cuando es incorporado al núcleo dando lugar a otras partículas energéticas [Hema 2014]. En el proceso de dispersión, se puede presentar de forma elástica en donde el neutrón es dispersado por el núcleo, éste recibe a su vez una pequeña cantidad de energía que se manifiesta a manera de movimiento, por otro lado encontramos la dispersión inelástica en donde el neutrón entrega una cantidad de energía al núcleo dejándolo en

estado excitado y con movimiento, dicho núcleo regresa a su estado fundamental emitiendo radiación gamma. También, el proceso de absorción se encuentra clasificado en tres categorías, la primera es la captura radiactiva, que ocurre cuando el neutrón es capturado por el núcleo y se emite un fotón gamma [ARNA 2007; Bolivar, Cristancho y Castellanos 2003]; la segunda categoría es cuando el neutrón es capturado y el núcleo emite partículas cargadas en reacciones del tipo (n, p) , (n, α) . Si la energía del neutrón es grande el tipo de reacciones que se presentan son (n, np) , $(n, 2n)$ y $(n, 3n)$; y la tercera categoría dentro del proceso de absorción es la fisión nuclear que ocurre cuando el neutrón es capturado por ciertos núcleos pesados como el Uranio o el Plutonio [ARNA 2007; Konefal *et al.*, 2001].

La interacción con la materia de la radiación de neutrones está directamente ligada por las secciones eficaces. La sección eficaz es una métrica de la probabilidad de que se presente alguno de los tipos de interacción mencionados anteriormente y depende de la del tipo de núcleo con el que se interacciona y de la energía de los neutrones incidentes [Bolivar, Cristancho y Castellanos 2003].

El gran poder de penetración que tienen los neutrones en la materia es gracias a que no tienen carga eléctrica, por lo tanto en su recorrido no experimentan fuerzas de atracción Coulombianas. Cuando los neutrones tiene poca energía y está en equilibrio con la temperatura del entorno la sección eficaz de activación es muy grande, la reacción nuclear con estos neutrones provoca un fenómeno conocido como la activación de los núcleos haciendo que se vuelvan radiactivos los materiales [Konefal *et al.*, 2012]. Conocer el efecto de los neutrones sobre la materia viva es de gran importancia, ya que producen más de 20 veces el daño que provocan los fotones de la misma energía [ARNA 2007].

2.2 Aplicaciones de los neutrones

En la actualidad los neutrones se ha demostrado que se encuentran en nuestra vida diaria, ya sea de forma natural por la interacción de las partículas de los rayos cósmicos con los núcleos de la atmosfera de nuestro planeta y por las reacciones nucleares entre las partículas alfa y los núcleos de la tierra [Vega-Carrillo *et al.* 2014], y también de forma antropogénica en diversas áreas del conocimiento como en protección radiológica, reactores nucleares, aceleradores lineales de uso médico e industrial, ciclotrones, generadores de neutrones, fuentes de irradiación o calibración, laboratorios de investigación y desarrollo donde fuentes de neutrones son usadas, haces de dosimetría, radiografía por neutrones y análisis por activación neutrónica [Maciak, *et al.* 2015], por mencionar algunas de sus aplicaciones o las de más auge en la actualidad [Patil *et al.*, 2012].

El uso de los equipos que emplean los neutrones o las radiaciones ionizantes en general las cuales producen neutrones de forma secundaria se ha ido incrementando de forma exponencial en los últimos años [Turner 2004] ya sea en aplicaciones médicas e industriales. [Mesbahi *et al.*, 2010; Patil *et al.*, 2010; Ongaro *et al.*, 2000], y el ejemplo más palpable de ello es el uso de radiaciones ionizantes como en los LINAC's para tratamientos oncológicos en conjunto con otras técnicas como la quimio terapia y la cirugía, [Travis *et al.*, 2014; Vega-Carrillo *et al.*, 2012; Rebello *et al.*, 2008] los LINAC'S usan electrones o fotones para entregar una dosis conformal y controlada al tumor en el paciente, sin embargo en este proceso se generan los tan mencionados neutrones indeseados al interior de la sala de tratamiento [Maciak *et al.*, 2015; Romero-Exposito *et al.*, 2015]. De igual forma la terapia por captura neutrónica es una de las técnicas más novedosas dentro del área de física médica y en la cual se están enfocando gran parte de estudios e investigaciones [Lin *et al.*, 2016].

2.3 Detección de los neutrones

Debido a la complejidad de las interacciones de los neutrones con el ambiente y la dificultad que se tiene para determinar su energía [Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015], se han ido desarrollando diferentes técnicas, métodos y detectores para poder determinar sus espectros de energía y poder contabilizarlos a lo largo de la historia.

Resulta de vital importancia el uso de los detectores de la radiación en diversas áreas del conocimiento como lo es en la medicina, biología, ciencia de los materiales y física de altas energías para aplicaciones de monitoreo e imagenología [Shaikh 2008].

La dificultad de poder detectar los neutrones a diferencia de las partículas cargadas como los rayos gamma, los neutrones no cuentan con carga eléctrica y por tal motivo no pueden interactuar con la materia a través de las fuerzas coulombianas las cuales son el principal mecanismo de interacción de las partículas cargadas y por dicha interacción las partículas pierden su energía, por tal motivo las partículas sin carga no ionizan directamente a los átomos [Knoll 2000]. Estas partículas son detectadas indirectamente a través de las partículas cargadas o fotones que se producen como consecuencia de la interacción de los neutrones con los núcleos de algunos materiales [Tsoufanidis 2010; Shaikh 2008]. Los neutrones pueden atravesar por muchos centímetros dentro de la materia sin tener algún tipo de interacción pudiendo ser invisible la materia para ellos [Maciak 2015].

Existen detectores rellenos de gas, detectores de semiconductor y detectores de centelleo son ampliamente utilizados para medir flujo de radiación, monitorear áreas y experimentos de dispersión. Cada uno de ellos teniendo sus propias ventajas y limitaciones [Shaikh 2008].

Cuando un neutrón interactúa con los núcleos de los átomos y el mecanismo de interacción es conocido la caracterización de los neutrones puede ser determinada estudiando los productos de la reacción. Algunos tipos de interacción son las de absorción y las reacciones de dispersión [Hema 2014; Tsoulfanidis 2010].

Los detectores de la radiación se categorizan de diferente forma, según sea su principio de operación, el material de construcción, el método para detectar, de la forma y colecta de los datos, cada uno de ellos presenta ciertas ventajas y desventajas y el elegir cada uno de ellos depende en gran medida de las condiciones de medición del campo de radiación en cuestión [Maciak 2015].

2.3.1 Detectores pasivos y activos.

La principal diferencia entre un detector pasivo y uno activo es que la recolecta de los datos se hace en tiempo real en el caso de los activos y en el caso de los pasivos los datos se obtienen posteriores a cuando se realizó la exposición de los detectores al flujo de radiación [Maciak 2015; Romero-Expósito *et al.* 2015].

Cuando se encuentran presentes campos de radiación pulsada o de una gran intensidad en los detectores activos se presentan dos problemas, que afectan la recolección de los datos, uno es el tiempo muerto y otro es el apilamiento de pulsos, que son consecuencia del campo magnético que está presente afectando la electrónica contenida en este tipo de detectores, por tal motivo en campos de radiación generados bajo estas condiciones se emplean los detectores pasivos los cuales al no tener una electrónica adicional no se ven afectados por el campo magnético [Aza, *et al* 2016; Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015; Garny *et al.* 2009; Attix 1986], como lo son los detectores de trazas, TLDs, activación de laminillas, por mencionar algunos, los cuales se usan principalmente con sistemas de moderación [Benites-Rengifo, Vega-Carrillo y Velazquez-Fernández 2014 Konefal *et al.*, 2005].

Sin embargo ya sean activos o pasivos existe una gran variedad de detectores ya sean los llenos de gas, de semiconductor y los detectores de centelleo [Shaikh 2008].

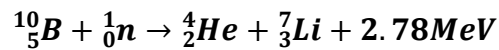
Los detectores llenos de gas son ampliamente empleados para medir la dispersión de neutrones, dentro de los cuales se encuentran principalmente los llenos de ^3He y ^3BF [Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015], estos detectores se pueden fabricar de un gran tamaño y con una alta eficiencia de detección, sus principales ventajas radican en una baja sensibilidad a radiación gamma, alta eficiencia para los neutrones, una muy buena amplificación libre de interferencia, no se dañan al exponerse a la radiación, se dispone de ellos en una gama amplia de tamaños. Son empleados en aplicaciones tales como flujo y monitoreo de áreas, mediciones en la actividad de combustible gastado, estudio de reacciones nucleares, medición de actividad residual en residuos nucleares, medición de la radiación cósmica y en estudios que emplean la dispersión neutrónica [Shaikh 2008].

2.3.2 El detector BF₃

La reacción (n,α) con el $^{10}_5\text{B}$ es probablemente la reacción más empleada para la detección de neutrones térmicos a través de partículas detectables por las siguientes razones:

- Tiene una sección eficaz amplia.
- La energía de dependencia de la sección eficaz es del tipo $1/v$.
- El $^{10}_5\text{B}$ es el elemento constituyente del compuesto **BF₃**, el cual puede ser usado como el gas de un detector proporcional gaseoso.

El detector **BF₃**, es un detector proporcional gaseoso lleno con gas **BF₃**, regularmente enriquecido en un 90% con ^{10}B . El detector **BF₃** detecta las partículas alfas y partículas de litio producidas en la reacción [Tsoulfanidis 2010; Knoll 2000].



Los neutrones térmicos dejan en un estado excitado a los núcleos de ^7Li el 96% del tiempo [Tsoulfanidis 2010; Knoll 2000]. En este caso el valor Q de la reacción es 2.30 MeV y el núcleo de ^7Li regresa a su estado base emitiendo una gamma con energía igual a $7.78 - 2.30 = 0.480\text{MeV}$. Este fotón es usado para la detección de los neutrones.

La relación entre las tasas de conteo y el flujo de neutrones

$$n(E)dE = \# \text{ de neutrones} / m^3 \text{ con energía cinética de } E \text{ entre } E + dE$$

$$\phi(E) dE = v(E)n(E) dE \text{ Flujo de neutrones con energías cinéticas entre } E \text{ y } E + dE.$$

$$v(E) = \text{Velocidad del neutrón con energía } E (m/s).$$

$$Em = \text{Límite superior de energía del neutrón considerado.}$$

N = Numero de átomos de ^{10}B por unidad de volumen.

V = Volumen del detector.

$\sigma(E) = \sigma(v)$ = Sección eficaz de la reacción (n, α) para la energía del neutrón E .

Asumiendo que el flujo del neutrón es uniforme sobre el volumen del detector, la tasa de reacción R está dada por R .

$$R(\text{reactions/s}) = VN \int_0^{E_m} \sigma(E)\phi(E)dE$$

La sección eficaz de ^{10}B tiene una $1/v$ de dependencia sobre un amplio rango de energías del neutrón.

Los detectores BF_3 son usados frecuentemente para la detección de neutrones térmicos, para los cuales puede calcularse un promedio de la velocidad del neutrón \bar{v} con la siguiente razón.

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{E_m} v(E)n(E)dE}{\int_0^{E_m} n(E)dE}$$

Y el flujo total ϕ lo podemos obtener con:

$$\phi = \int_0^{E_m} \phi(E)dE = \int_0^{E_m} v(E)n(E)dE$$

Las especificaciones de los detectores comerciales de BF_3 que deben ser tomadas en cuenta al momento de adquirirlos son la sensibilidad, dimensiones, composición del gas de relleno, voltaje de operación y temperatura máxima de operación [Tsoufanidis 2010].

La sensibilidad S se define como la proporción

$$S = \frac{\text{taza de conteo neta real}}{\text{flujo de neutrones}} = \frac{r}{\phi}$$

La cual se expresa en conteos / segundo por neutrón / ($\text{m}^2 \text{s}$). Los parámetros que afectan la sensibilidad pueden ser reportados por:

$$r = \epsilon_p R = g - b$$

Donde ϵ_p es la eficiencia del detector para la detección de las partículas cargadas producidas.

b = Es la tasa de conteo de fondo

g = Tasa de conteo de sobrefondo.

R = Tasa de reacción. La cual está dada como se muestra en la siguiente Ec.

$$R = NV\sigma_0 \frac{v_0}{\bar{v}} \phi$$

Desde que las partículas cargadas son generadas al interior del volumen del detector, la eficiencia ϵ_p es prácticamente igual a uno. Así mismo la tasa del conteo de fondo puede ser despreciada debido a que los pulsos de las partículas cargadas están muy por encima del ruido electrónico. Por lo tanto el propio nivel del discriminador puede ser puesto para eliminar casi todo el fondo. Entonces bajo estas condiciones $R = g$ y la ecuación para la sensibilidad se convierte en:

$$S = \frac{R}{\phi} = NV\sigma_0 \frac{v_0}{\bar{v}}$$

Como nos podemos dar cuenta, la ecuación nos indica que para un cierto espectro de neutrones, la sensibilidad es proporcional a la densidad del boro y el volumen del detector [Tsoulfanidis 2010].

El número de átomos decrece con la exposición a la radiación y también lo hace la sensibilidad. Este decremento se expresa mediante el siguiente factor.

$$\exp(-\sigma_a \phi t)$$

donde ϕt son neutrones / m² es la fluencia la cual el detector fue expuesto. Ya que el valor promedio de σ_a para neutrones térmicos reaccionando con el ¹⁰B es del orden de 10⁻²³ m² (1000 b), la fluencia necesaria para causar una apreciable carga en la sensibilidad de un orden de 10²⁵ neutrones/m² [Tsoulfanidis 2010].

Las especificaciones comunes de los detectores comerciales son las siguientes:

Sensibilidad: 5 cuentas por segundo por $n/(\text{cm}^2 \text{ s})$.

Dimensiones: Casi cualquier dimensión.

Presión de BF₃: A partir de un poco menos de 1atm a alrededor de las 2 atm (202 kPa). Un incremento en la presión requiere de un incremento en el voltaje de operación pero tiene como efecto negativo un desempeño pobre en altas temperaturas [Knoll 2000].

Voltaje de Operación: Los detectores de **BF₃** muestran una meseta casi plan que se extiende por encima de los 1000 V o más. Los voltajes típicos de operación oscilan entre los 1000 y los 3000 V [Knoll 2000].

Temperatura: La máxima temperatura de operación es cerca de los 100 °C. [Knoll 2000].

El Efecto de Pared.- Cuando se producen las partículas alfas cercanas a las paredes del detector y chocan con las paredes del detector se generan pequeños pulsos [Tsoulfanidis 2010].

2.3.3 Los detectores forrados con boro.

Los detectores forrados de boro son detectores proporcionales llenos de gas que emplean la misma reacción como los detectores BF_3 , con la diferencia que el ^{10}B es colocado en las paredes del detector. Entonces la reacción (n, α) se presenta en una capa delgada cerca de la pared, solo una de las dos partículas tiene oportunidad de entrar en el volumen sensible del contador y producir un pulso, la otra se detiene en las paredes. La sensibilidad del detector se incrementa con el grosor del ^{10}B colocado. Un ejemplo del detector forrado en las paredes con boro es el que se muestra en la Figura 1. [Tsoulfanidis 2010]

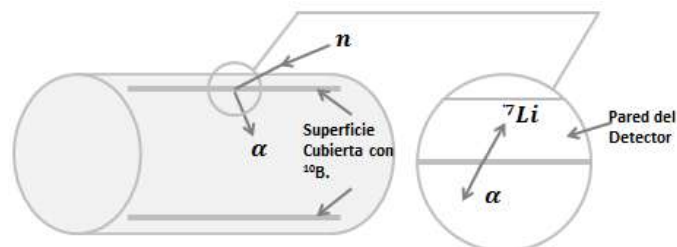


Figura 1. Detector forrado con ^{10}B en sus paredes

El grosor de la cubierta de ^{10}B no debe exceder el rango de las alfas producidas ya que estas no serían detectadas. Las ventajas de detectores forrados con Boro sobre los detectores BF_3 es la flexibilidad de usar un gas más apropiado que el BF_3 . Entonces el voltaje de operación es menor y el contador es menos sensible para los rayos gamma. Por esta razón los detectores cubiertos con Boro pueden ser usados en la detección de neutrones en campos intensos de gammas [Tsoulfanidis 2010].

Ambos detectores lo de BF_3 y los cubiertos con Boro son los principalmente usados en la detección de la cantidad de neutrones térmicos en el área de interés, mas no se detecta su energía [Tsoulfanidis 2010].

2.3.4 Los detectores de ${}^6\text{Li}$.

La detección de neutrones mediante ${}^6\text{Li}$ es otra de las reacciones más empleada para la detección de neutrones lentos y se basa en la reacción.



La sección eficaz para este tipo de reacción es de $1/\nu$ para energías arriba de 10 keV, con un valor de 937 b a 0.025 eV. El Litio se usa ya sea como LiF o como el componente de un centellador [Tsoulfanidis 2010].

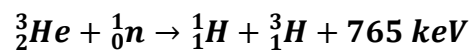
Un espectrómetro de neutrones basado en LiF consiste de una rebanada delgada de ${}^6\text{LiF}$ intercalada entre dos superficies detectoras de silicio. Cuando los neutrones golpean el LiF, pares de partículas cargadas (${}^4\text{He}$ - ${}^3\text{H}$) son producidas y detectadas simultáneamente por los dos detectores. Los pulsos de los detectores son amplificados y se suman para producir un único pulso, el cual es proporcional a la energía del neutrón más el valor Q de la reacción [Tsoulfanidis 2010].

Actualmente hay diversos centelladores inorgánicos hechos a base de Litio. El ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ ha sido usado para medir neutrones con energías de ente 1 y 14 MeV con un 10% de resolución de energía. Este tiene una muy buena eficiencia para neutrones de baja

energía, pero la activación del yodo genera algunos problemas. La proporción del activador de cerio afecta la eficiencia de la luminiscencia. [Tsoulfanidis 2010].

2.3.5 Los detectores ^3He .

La detección de neutrones por gas de ^3He se basa en la reacción.



La sección eficaz para esta reacción es muy grande para neutrones térmicos (5400 b a 0.025 eV) y varía en función de $1/v$ de 0.001 eV a 0.04 eV.

Este tipo de detectores proporcionales para neutrones consiste de dos superficies detectoras de silicio una frente a la otra, con el espacio entre ellas lleno de helio a presión de unas cuantas atmosferas [Tsoulfanidis 2010].

Los detectores proporcionales llenos con ^3He son ampliamente usados, especialmente en mediciones de tiempo de vuelo. La eficiencia del contador puede ser incrementada, aumentando la presión del gas al interior del detector. Uno de los problemas de los detectores de ^3He es el efecto de pared. Si la reacción se lleva a cabo cerca de la pared del detector, existe una alta probabilidad de que solo una fracción de la energía de las partículas cargadas sea depositada en el detector. Como resultado, pequeños pulsos son producidos los cuales no están contemplados dentro del pulso principal. Existen dos formas de superar este efecto. Una es utilizar un diámetro de detección más grande en el cual la fracción de las reacciones que ocurren cerca de las paredes será más pequeña. Otra forma es incrementar el poder de frenado del gas. Incrementar el

poder de frenado se logra aumentando la presión del gas o agregando una pequeña fracción de gas de otro elemento, tal como el criptón, con un más alto poder de frenado. Incrementar el poder de frenado está acompañado sin embargo un incremento en la sensibilidad gamma y un decremento en el tiempo del pulso de subida. Un tiempo rápido del pulso de subida es importante para mediciones a través del método de tiempo de vuelo. [Tsoulfanidis 2010].

La presión del gas y el voltaje de operación son más grandes en los detectores ^3He que en los detectores ^3BF . La presión de los detectores ^3He se encuentra usualmente entre los 404 y los 1010 kPa (4 – 10 atm) y el voltaje de operación es entre 3000 y 5000 V. [Tsoulfanidis 2010].

2.3.6 Cámaras de fisión

Las cámaras de fisión son detectores gaseosos que detectan fragmentos producto de fisión. Los fragmentos de fisión son principalmente partículas cargadas con $Z= +20e$ y energía cinética entre 60 – 100 MeV, los cuales tiene un rango pequeño aún en gas. Dichas cámaras de fisión producen una ionización tan intensa que no se necesita de un gas multiplicador. Las cámaras de fisión operan en la región de ionización.

En los detectores más comunes de los tipos de fisión, la superficie interior del detector tiene un recubrimiento de un isótopo físil como se muestra en la Figura 2. Cuando la fisión se presenta uno de los fragmentos de fisión es emitido hacia el centro de la cámara y es detectado. El otro fragmento de fisión secundario es retenido en el depósito de fisión o en la pared del detector. La tasa de conteo de un detector de fisión

es proporcional a la tasa de fisión, que a su vez es proporcional al flujo de neutrones. La relación entre dichas tasas es similar a las aplicadas en los detectores **BF₃**.

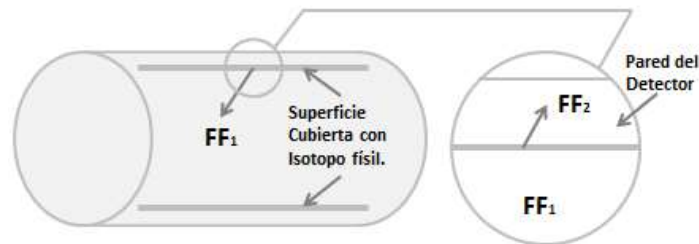


Figura 2. Detector de fisión

Los detectores de fisión pueden ser empleados para la detección de neutrones tanto térmicos como rápidos. Si las paredes del detector se cubren con ^{235}U , esencialmente solo los neutrones térmicos serán detectados debido a que la sección eficaz del ^{235}U para neutrones térmicos es 500 veces más grande que para neutrones rápidos. Si el detector es cubierto con ^{238}U o ^{232}Th , solo neutrones rápidos con energía mayor a 1 MeV son detectados gracias a que la sección eficaz para estos isotopos tiene ese límite de energía [Tsoulfanidis 2010].

Los detectores de fisión son empleados para detectar la cantidad de neutrones más no su energía. Sin embargo se pueden emplear en diferenciar flujo de neutrones térmicos y/o rápidos empleando un recubrimiento en los detectores a base de ^{235}U - ^{238}U [Tsoulfanidis 2010].

La sensibilidad de los detectores de fisión decrece con la exposición debido al empobrecimiento del isotopo físil. El decrecimiento en la sensibilidad puede ser subsanado hasta un cierto punto si las paredes del detector se cubren con una mezcla de materiales fértiles y fíviles. Una de estas combinaciones es el 90% de ^{234}U y 10 % de

^{235}U . El ^{235}U es parcialmente repuesto con nuevos átomos producidos por la captura neutrónica en el ^{234}U . Una combinación de ^{235}U - ^{238}U tiene un efecto similar gracias al ^{239}Pu producido como resultado de la captura neutrónica en el ^{238}U . [Tsoulfanidis 2010].

Los detectores de fisión son ampliamente usados tanto en mediciones de flujo de neutrones en dentro y fuera del núcleo en los reactores nucleares. En casos fuera del núcleo del reactor se monitorea la población de neutrones durante las etapas tempranas de poder cuando el nivel del flujo de neutrones es muy bajo. Para mediciones dentro del núcleo del reactor los detectores de fisión son usados para un mapeo del flujo. Estos detectores son fabricados como una sonda cilíndrica larga y delgada que puede ser manipulada dentro y fuera del núcleo del reactor en operación. Los detectores de fisión comerciales que se emplean dentro del núcleo del reactor tienen diámetros de 1.5 mm y emplean uranio enriquecido al menos al 90% de ^{235}U como el material sensible y pueden ser usados para medir flujo de neutrones arriba de 10^{18} neutrones/($\text{m}^2 \text{ s}$) [Tsoulfanidis 2010].

2.3.7 Detectores de neutrones a base de activación de laminillas.

La detección de neutrones por activación de laminillas se basa en la creación de un radioisótopo por captura neutrónica. El cual consecuentemente continúa emitiendo radiación. La activación de laminillas se emplea no solo para medir el flujo de neutrones sino también para hacer análisis por activación neutrónica dentro de las cuales se encuentran principalmente las laminillas de Disproscio y las de oro [Bedogni *et al.*, 2015; Hema 2014].

Si se considera un blanco irradiado con un flujo de neutrones $\phi(E)$, donde se tiene:

$\sigma_i(E)$ = Sección eficaz neutrónica del isótopo A_i a una energía de neutrón E .

λ_{i+1} = Constante de decaimiento del isótopo con número atómico $A_i + 1$ (A_{i+1}).

$\sigma_{i+1}(E)$ = Sección eficaz de absorción del isótopo A_{i+1} para neutrones con energía E .

$N_i(t)$ = Número de átomos del núclido con número de masa atómico A_i presente en un tiempo.

m = Masa del blanco.

Como resultado de la absorción del neutrón, el siguiente proceso tiene lugar:

1. Los átomos del blanco con número de masa atómica A_i son destruidos.
2. Átomos con número de masa atómico A_{i+1} son producidos.
3. Átomos del tipo A_{i+1} decaen.
4. Átomos del tipo A_{i+1} posiblemente sean destruidos por absorción de un neutrón.

Para el isótopo blanco ${}_{Z_i}^{A_i}X + n \rightarrow {}_{Z_i}^{A_{i+1}}X$ [Hema 2014]

Este tipo de detectores se presentan en forma de laminilla del orden de 1mm de grosor o menos. Y la masa de la laminilla es de unos pocos miligramos, las cuales se usan debido a que:

- Una muestra de un espesor considerable absorberá tantos neutrones del campo de radiación que este será perturbado y las mediciones no darán el flujo correcto de neutrones.

- Una muestra en su interior causará una depresión del flujo en su interior. En tal caso los factores de corrección tendrán que ser aplicados a todas las ecuaciones en las que se involucre el flujo ϕ .
- Si el radioisótopo emite partículas β , y se incrementa el grosor no necesariamente se incrementará la tasa de conteo, debido a que solo las partículas emitidas cerca de la superficie dentro de un menor grosor que el rango saldrán del blanco y podrán ser grabadas.
- No hay interés en producir más actividad que la necesaria.

La activación de laminillas se emplea tanto en la detección de neutrones tanto rápidos como térmicos [Tsoulfanidis 2010].

2.3.8 Medición del espectro de energía de los neutrones por la dispersión de protones.

La detección de neutrones se basa en la colisión de los neutrones con los protones y posteriormente se detecta el protón en movimiento. Los protones y los neutrones tienen aproximadamente la misma masa, por lo tanto posiblemente un neutrón en la colisión puede transferir toda su energía cinética al protón. Sin embargo hay una posibilidad de que el protón golpeado pueda tener una energía entre cero y el máximo posible. [Tsoulfanidis 2010].

Considerando el caso de un neutrón con energía cinética E_n colisiona con un protón en reposo. Para calcular la energía cinética del protón, se deberá aplicar la ecuación de

conservación de la energía y momento lineal usando $Q = 0$ y $M_n = M_p$. El resultado para E_p . La energía cinética del protón como función del ángulo de deflexión θ es:

$$E_p = E_n \cos^2 \theta$$

En una colisión protón-neutrón, el valor máximo del ángulo θ es 90° y el mínimo 0° así mismo los límites de energía para el protón es $0 \leq E_p \leq E_n$. Para energías del neutrón arriba de 14 Mev, la colisión es isotrópica en el centro de masa del sistema. Como consecuencia hay una probabilidad para que la energía del protón se encuentre entre cero y E_n . Es decir si la probabilidad de que la energía del protón este entre E y E + dE, después de la colisión [Tsoulfanidis 2010].

2.3.9 Los detectores proporcionales empleados como espectrómetros de neutrones rápidos.

Los detectores proporcionales llenos de hidrógeno y metano son empleados para medir espectros de neutrones en el rango de energías de $1keV < E_n < 2MeV$. Ni el hidrógeno ni el metano se emplean de la misma forma. Detectores rellenos con hidrógeno son usados para energías de neutrón. $E_n < 100keV$, para rangos de energía mayores, es necesario tener un poder de frenado mayor y en estos casos el metano es usado en lugar del hidrógeno [Tsoulfanidis 2010].

La eficiencia de los contadores proporcionales así como de cualquier otro detector gaseoso depende de su tamaño, de la composición y presión del gas y de la energía de los neutrones incidentes.

Algunas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta en los detectores proporcionales son:

El Efecto de pared.- El camino de los protones generados cercanos a la pared o al final del detector tienen una alta probabilidad de depositar de forma incompleta la energía o una colecta incompleta. El recorrido del protón dispersado cerca de las paredes es truncado por las colisiones cerca de la pared con el material de la pared antes de que el protón sea golpeado y deposite toda su energía en el detector. Los protones producidos cercanos al final del detector desplazándose hacia los extremos del detector entran en una región de bajo campo eléctrico donde la concentración de gas multiplicador es pequeña y por consiguiente la colecta de la carga producida será incompleta [Tsoulfanidis 2010].

Como resultado del efecto pared, pulsos de pequeña energía son generados que tienden a incrementar la función respuesta hacia bajas energías. El efecto pared y de fin de detector se incrementa cuando el tamaño del detector decrece. La distorsión de estos efectos llega a ser insignificante cuando el límite superior se establece aproximadamente a 2 MeV para usarlo como un espectrómetro proporcional.

Distorsión del Campo eléctrico.- El gas multiplicador en un detector proporcional depende intensamente del campo eléctrico. Cerca de los extremos del detector cilíndrico la fuerza del campo eléctrico llega a ser gradualmente menos intenso que en la mayor parte del volumen del detector. Este efecto produce pequeños pulsos del protón dispersado los cuales terminan en el detector. Los detectores con una longitud mayor en proporción son afectados en menor grado por este problema. [Tsoulfanidis 2010].

Efectos del carbono dispersado.- Los neutrones son detectados por detectores llenos de metano colisionando no solo con los núcleos de hidrógeno sino también con los átomos de carbono. La ionización que se produce por los átomos de carbono dispersado es indistinguible del producido por los protones [Tsoulfanidis 2010].

2.3.10 Centelladores orgánicos empleados para espectrometría de neutrones rápidos.

Los centelladores orgánicos son excelentes para la detección de neutrones rápidos debido a que tienen una alta eficiencia, la cual se debe a su contenido de hidrógeno por su alta sección eficaz y la capacidad de hacerlos y emplearlos de un tamaño considerable. Los centelladores orgánicos son los principales detectores usados en la espectroscopia de neutrones en un rango de energías de 10 keV a 200MeV. Los centelladores orgánicos tienen una gran proporción de hidrogeno/carbono, los neutrones incidentes pueden ser de diferentes direcciones en comparación al enrejado de los centelladores cristalinos y la producción de luz producto de los protones dispersados también es menor que en los centelladores cristalinos. Los centelladores líquidos orgánicos son exclusivamente empleados para detectar neutrones rápidos [Tsoulfanidis 2010].

2.3.11 Detección de neutrones rápidos mediante reacciones de activación de umbral.

La detección de neutrones por reacciones de activación de umbral está basada en la existencia de una energía de para ciertas reacciones de los neutrones con el núcleo. Por lo tanto si se activa una laminilla hecha de tal núcleo, la actividad de la laminilla proporcionará una medición del flujo de electrones por encima del límite [Tsoulfanidis 2010].

Las principales ventajas de esta técnica sobre otros espectrómetros son las siguientes:

- Las laminillas tienen un pequeño volumen y una sección eficaz pequeña, sin embargo no distorsionan el campo eléctrico.
- Las laminillas son menos sensibles a los rayos gama.
- Su tamaño relativamente pequeño las hace ideales para ser colocadas en cavidades en las cuales algún otro espectrómetro no podría ser empleado.

El equipo de conteo no se necesita ser llevado al área de radiación para ser medida, es independiente [Tsoulfanidis 2010].

Sin embargo existen criterios que hacen que ciertas laminillas y reacciones sean más deseables unas que otras como lo son:

- La sección eficaz para la reacción deberá ser bien conocida como función de energía.
- El tipo, la energía y la intensidad relativa de las radiaciones del producto de la reacción debe ser bien conocido.
- La vida media del radionúclido producido debe ser bien conocida y deberá ser de algunos minutos de duración por lo menos.

- El material de la laminilla debe ser disponible en alta pureza, para evitar la interferencia de las reacciones causadas por las impurezas. [Tsoulfanidis 2010].

2.3.12 Medición de la energía del neutrón con un espectrómetro cristalino.

La espectrometría de neutrones por cristales es empleada para analizar fuentes de neutrones poli-energéticas o mono-energéticas.

2.3.13 Detectores de neutrones autoalimentados

Los detectores autoalimentados como su nombre nos lo indican, operan sin un voltaje externo aplicado. La radiación incidente genera una señal en forma de corriente proporcional al flujo de bombardeo. Los detectores son usualmente construidos en configuración coaxial. El conductor central es llamado emisor y es el material responsable de la generación de la señal. El conductor externo es llamado colector, ambos se encuentran separados por un aislante. El colector está fabricado de una aleación y tiene la forma de una vaina metálica encamisando el aislante y el emisor [Tsoulfanidis 2010].

El principio de generación de señal en un detector autoalimentado es simple. Como resultado de la radiación incidente, el emisor transfiere los electrones que escapan al aislante los cuales salen y el emisor queda cargado positivamente. Si el emisor es

conectado al colector a través de una resistencia, se presenta un lujo de corriente, el cual cuando es medido da un estimado del flujo incidente [Tsoulfanidis 2010].

Debido a que los detectores han sido desarrollados para ser empleados al interior del núcleo del reactor, se diseñan de un tamaño relativamente pequeño, son capaces de operar por largos periodos de tiempo sometidos a un intenso campo de radiación en el núcleo del reactor sin verse afectado su desempeño y finalmente funcionar sin una fuente de poder externa [Tsoulfanidis 2010].

Algunos elementos deben ser tomados en cuenta para considerar que un emisor es lo más ideal.

1. Alta Sensibilidad
2. Baja tasa de
3. Respuesta pronta
4. Que sea sensible únicamente para neutrones.

El aislante debe tener una resistencia de aproximadamente 10^{12} ohms a temperatura ambiente y 10^9 ohms a temperatura de operación del reactor. Los dos aislantes comúnmente empleados son el óxido de magnesio y el óxido de aluminio. Los experimentos demuestran que la resistencia del óxido de magnesio decrece al momento de ser expuesto a la radiación mientras que la resistencia del óxido de aluminio no cambia, por tal motivo los segundos están tendiendo a desplazar a los primeros [Tsoulfanidis 2010].

Dentro de los detectores de neutrones autoalimentados se dividen en dos ramas, en los que tienen una respuesta retardada y los de pronta respuesta [Tsoulfanidis 2010].

2.3.13.1 Detectores de neutrones autoalimentados con respuesta retardada.

Están elaborados de Rodio, Vanadio, cobalto y molibdeno para fabricar el emisor. Son los principales instrumentos de detección empleados dentro del núcleo de los reactores para la determinación de la distribución de energía. La señal es producto de la activación del emisor por la incidencia de los neutrones y subsecuentemente el decaimiento del isótopo [Tsoulfanidis 2010].

2.3.13.2 Detectores de neutrones autoalimentados con respuesta pronta.

Este tipo de detectores de respuesta rápida operan bajo diferente principio que los de respuesta retardada. El emisor en este caso absorbe un neutrón y emite gammas al momento de la captura. En este caso las gammas son las responsables de la señal. Y ya que solo son emitidas al momento de la captura neutrónica la respuesta del detector es instantánea. Cobalto y molibdeno son los principales elementos de los que se fabrican los emisores [Tsoulfanidis 2010].

2.3.14 Detección por el método tiempo de vuelo.

El método tiempo de vuelo determina la energía del neutrón con una resolución mejor que cualquier otro detector. El diseño consiste de un sándwich de múltiples laminillas de aluminio y cadmio ajustadas dentro de un cilindro de acero de 38 mm de diámetro.

El cilindro rota a una velocidad a las 15,000 r/min, de esta forma las ráfagas de neutrones pasan a través de los canales de aluminio siendo detectados del otro lado, el cilindro estriado es censado con dos fotoceldas, una que nos transfiere la medición directa de la rotación y la otra envía al detector del neutrón una señal empleada para medir el tiempo de vuelo de los neutrones transmitidos [Tsoulfanidis 2010].

Las características más importantes es el ancho de la ráfaga de neutrones. La forma del pulso es esencialmente triangular con la base del triángulo siendo inversamente proporcional a la velocidad de rotación del obturador. La forma del pulso puede cambiar ligeramente con la velocidad de los neutrones y la forma del canal. El ancho del canal afecta el pulso, es un resultado entre el tiempo de resolución y una tasa de conteo adecuada. Según sea el interés y las energías de los neutrones a ser medidos se diseñan diferentes tipos de reguiletes jugando con el largo y ancho de los canales de aluminio [Tsoulfanidis 2010].

2.4 Sistemas espectrométricos

A lo largo de la historia y desde el descubrimiento del neutrón por Chadwick en 1932 se han ido desarrollando diversos Sistemas Espectrométricos para determinar el espectro de los neutrones en ciertas áreas de interés y con características muy particulares cada uno de ellos [Thomas and Alevra 2003].

Sin embargo el proceso de detección va muy ligado a la moderación de los neutrones para poder realizar la medición de los mismos [Garny *et al.* 2009], es decir la gran mayoría de los espectrómetros que se emplean en la actualidad se basan en la termalización de estas partículas [Maciak *et al.*, 2015; Hema 2014].

Un buen moderador para los neutrones debe tener un peso atómico bajo y una baja o prácticamente nula tendencia a la absorción de estas partículas, los materiales principalmente empleados con este fin son hidrógeno, deuterio, berilio y carbón. Sin embargo los más empleados son los materiales altamente hidrogenados como la parafina o el polietileno debido a que su masa es muy cercana a la masa del neutrón aproximadamente en una proporción de 0.9986 [Maciak *et al.*, 2015; Hema 2014].

Los neutrones de todas las energías al interactuar con los materiales altamente hidrogenados pierden una significativa fracción de su energía transfiriéndola al moderador a través de la interacción de dispersión elástica, de esta forma se termalizan o reducen su energía y son medidos mediante los detectores pasivos o activos que se empleen [Maciak *et al.*, 2015; Hema 2014]. Con la finalidad de tener una mejor detección de los neutrones y puesto que en las áreas de interés se encuentran los mismos en un rango de energía, algunos espectrómetros principalmente el BSS [Maciak *et al.*, 2015] varían sus espesores de moderación para tener una medición más exacta del espectro neutrónico presente [Garny *et al.* 2009]. Las interacciones de los neutrones al atravesar los materiales y espesores de moderación se puede presentar como se muestra en la Figura 3.

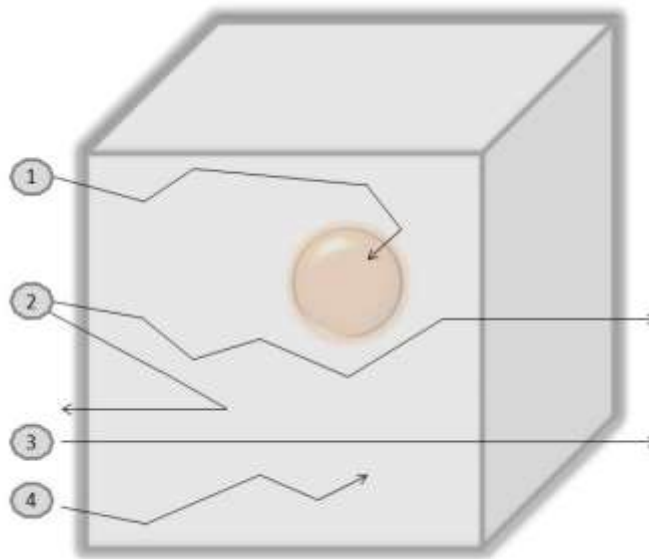


Figura 3. 1. Neutrones moderados y detectados, 2. Neutrones moderados que escapan del moderador, 3. Neutrones que atraviesan siendo invisible el sistema de moderación para ellos y 4. Neutrones que sufren captura parásita dentro del material.

2.4.1 Sistema Espectrométrico de Esferas Bonner (SEEB).

Sin duda el primer y principal sistema espectrométrico es el SEEB, el cual desde su invención en 1960 [Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015; Santos *et al.*, 2012; Domingo *et al.*, 2010;] hasta la actualidad es el más empleado para determinar el espectro de neutrones en ciertas áreas de interés como alrededor de aceleradores de partículas de altas energías, en montañas de gran altitud y en vuelos de grandes altitudes [Bedogni *et al.*, 2009], este sistema consta de un conjunto de ocho esferas de polietileno con densidades de 0.95 gr/cm^3 y diámetros de 0, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12 pulgadas de diámetro, [Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015; Maglieri *et al.*, 2015; Mirzajani *et al.*, 2014; Wang 2008] aunque el número de las mismas puede variar, el SEEB este sistema nos permite medir espectros de neutrones en un amplio

rango de energías, desde neutrones térmicos hasta al menos 20 MeV [Králík *et al.*, 2015; Kuo-Wei *et al.*, 2014, Mohammadi *et al.*, 2014; Burgett, Hertel y Howell 2009].

Si se agregan capas de materiales moderadores con alto número másico intermedias al SEEB convencional como el cobre y plomo puede operar arriba de unos pocos GeV, al cual le denominan SEEB Extendido [Chu *et al.*, 2016; Birattari *et al.*, 2010; Garny *et al.*, 2009; Reginatto 2009]. Al centro de las esferas moderadoras se coloca un detector térmico de neutrones el cual puede ser activo o pasivo [Vega-Carrillo *et al.*, 2012; Wiegel *et al.*, 2009]. Los neutrones rápidos que inciden sobre cada esfera son moderados y transportados al interior del polietileno llegando al centro de cada esfera como neutrones térmicos y son medidos por el detector central [Vega-Carrillo *et al.*, 2005; Alevra y Thomas 2003]. Sin embargo su resolución es limitada [Bedogni *et al.*, 2016; Bedogni *et al.*, 2015].

2.4.2 Espectrómetro pasivo multicapa para neutrones

El espectrómetro pasivo multicapa para neutrones es similar a una esfera Bonner construido de polietileno. El tamaño es de 12 pulgadas de diámetro, este espectrómetro trabaja únicamente con TLD (Detectores pasivos) cuenta con 18 perforaciones en la esfera a lo largo de tres diferentes radios concéntricos de la misma, cada 60 grados se encuentran distribuidas perforaciones para introducir cada soporte con los TLD's, los primeros 6 orificios se encuentran en un círculo de 5.5 pulgadas de diámetro, separados uno de otro cada 60 grados, el segundo grupo de seis orificios se encuentra a un diámetro de 8 pulgadas de diámetro y el último grupo de 6 orificios se encuentran colocados a un diámetro de 10.5 pulgadas, su limitante es que únicamente opera con detectores pasivos del tipo TLD [Maciak *et al.*, 2015].

2.4.3 Espectrómetro para neutrones anidado (NNS)

El Espectrómetro de Neutrones Nested es un sistema que emplea un detector activo de ^3He únicamente y funciona bajo el mismo principio del SEEB, sobre la moderación y/o termalización de los neutrones con un material moderador [Kuo-Wei *et al.*, 2014], con la variante de que el NNS consiste de un juego de 7 cilindros de polietileno de alta densidad, los cuales para incrementar el espesor de moderación se introduce un cilindro dentro de otro y así sucesivamente, el cilindro más pequeño tiene en su parte central el detector activo de ^3He centrado longitudinalmente y transversalmente al cilindro. El rango de los diámetros de moderación de los cilindros va desde 6 cm hasta 22 cm [Maglieri *et al.*, 2015].

2.4.4 Espectrómetro cilíndrico (CYSP)

El espectrómetro cilíndrico de neutrones es un prototipo el cual opera con siete detectores activos, los cuales se introducen en una estructura cilíndrica de polietileno con una cascara interna de plomo de 1 cm de espesor, [Bedogni, *et al.*, 2015], con la diferencia de los otros sistemas que se obtienen funciones respuestas provenientes de flujos isotrópicos, este espectrómetro se enfoca principalmente en obtener una respuesta direccional procedente de un flujo de neutrones y poder caracterizar distribuciones angulares [Gómez-Ros *et al.*, 2015]. El CYSP consiste de un cilindro de 65 cm de largo por 50 cm de diámetro el cual consta de dos partes principales, el colimador tiene 30 cm de largo con un diámetro de 15 cm dicho colimador está cubierto con una tapa de plástico borado, los detectores están situados a lo largo del eje principal del cilindro a distancias de 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 21 cm referenciados a partir del colimador. Cuenta con un disco de plomo de 1cm de espesor colocado a 17

cm de la base del cilindro, el pequeño volumen cilíndrico que contiene las cavidades para colocar los detectores, los canales de aire y el disco de plomo también se encuentran rodeados por una capa de plástico borado de 5 mm de espesor [Bedogni, *et al.*, 2015, Gómez-Ros, *et al.*, 2015].

2.5 Métodos Monte Carlo

Monte Carlo es un método numérico, el cual nos permite simular el comportamiento de diversos fenómenos físicos y sistemas matemáticos [Çeçen 2013].

Los métodos Monte Carlo han sido usados desde mucho tiempo atrás, el nombre Monte Carlo fue acuñado por científicos trabajando en el desarrollo de las armas nucleares en el laboratorio Nacional de Los Álamos en 1940 [Verhaegen y Seuntjens 2003; Mohazzabi 1998].

En la actualidad las aplicaciones del método Monte Carlo incluye el diseño de reactores, terapia en base a radiaciones, flujo de tráfico, predicciones en la bolsa, pronostico del tiempo, comportamiento de nanoestructuras y polímeros, exploración de pozos petroleros por mencionar algunas de las aplicaciones principales. Sin embargo en una de las principales áreas en la cual ha tenido un gran crecimiento su uso, es en la medicina nuclear, radioterapia y diagnostico por rayos X [Çeçen 2013; Hugtenburg, 2012; Rogers 2006; Buvat y Castiglioni 2002].

De acuerdo a Vaz (2010) los principales componentes del Monte Carlo, aplicado al desarrollo de la física de radiaciones y la simulación del transporte de partículas, son los siguientes:

- a) Funciones de distribución de probabilidad.- Las secciones eficaces y el tipo de interacción de cada componente del modelo físico debe describirse por una función de distribución de probabilidad.

- b) Generadores de números aleatorios.- Se debe contar con una fuente de números pseudoaleatorios confiable.
- c) Reglas de muestreo.- Se deben definir un conjunto de reglas para muestrear las funciones de distribución de probabilidad.
- d) Estimadores o *tallies*.- Las salidas deben ser acumuladas en estimadores totales para las cantidades de interés.
- e) Estimación del error.- Valoración del error estadístico o varianza como función del número de ensayos y otras cantidades.
- f) Técnicas de reducción de varianza.- Se deben utilizar técnicas de reducción de varianza para reducir los tiempos de cómputo.
- g) Paralelización y Vectorización.- Los algoritmos se deben diseñar para que sean compatibles en arquitecturas avanzadas de cómputo y obtener resultados en forma rápida.

Existen varios códigos Monte Carlo que se usan en la física de radiaciones que son del dominio público. Existen dos tipos de códigos Monte Carlo, los de propósito general para investigación en física de altas energías o aplicaciones en física médica en general y los que se diseñan para aplicaciones específicas como el caso de la radiología [Pena *et al.*, 2005]. Estas son herramientas sofisticadas que requieren habilidades computacionales avanzadas y que el usuario esté familiarizado con las teorías del transporte de la radiación [Zaidi y Xu 2007; Buvat y Castiglioni 2002; Sánchez-Reyes *et al.*, 2001].

En los últimos años, se ha observado un incremento en el uso de los métodos Monte Carlo en aplicaciones médicas [Vaz 2010; Mesbahi 2009; Rogers 2006], con diversos propósitos como el diseño de instrumentación, la espectrometría y la dosimetría durante el diagnóstico y tratamiento con radiación [Zaidi y Xu 2007].

El modelado anatómico del paciente y/o características del problema real, es fundamental para el desarrollo acertado y eficiente de la dosimetría por fotones y electrones por medio de las simulaciones computacionales. El proceso de modelado consiste de una descripción de la geometría y características del material para un objeto [Ghiasi y Mesbahi, 2010]. Las características de interés del material incluyen composición, densidad, y energía dependiente de las secciones eficaces. La simulación de sistemas de imagen médica usando métodos determinísticos y aproximaciones de simplificación, ha sido desarrollada para mejorar las velocidades de operación [Juste 2010; Zaidi y Xu 2007]. Mientras que el modelado 3D sea lo más parecido al objeto o sistema real y detallado en cuanto a composición y dimensiones, los resultados de las simulaciones serán más precisos y apegados a la realidad.

Los cálculos Monte Carlo son una herramienta poderosa para la simulación del transporte de la radiación y los efectos de esta sobre la materia [Mesbahi, 2007], en el área de la medicina nuclear, son de una gran ayuda este tipo de simulaciones debido a que el usuario tiene la capacidad de poder separar la radiación detectada en sus componentes: eventos primarios, eventos de dispersión, eventos de contribución de baja dispersión [Zaidi y Xu 2007].

Para [Vaz \(2010\)](#), las características deseables en los próximos códigos Monte Carlo, son las siguientes:

- a) Capacidad de desarrollar cálculos completos en 3D dependientes del tiempo,
- b) Disponibilidad de técnicas automáticas de reducción de varianza,
- c) Capacidad para realizar cálculos en paralelo,
- d) Capacidad para importar datos de entrada fácilmente mediante controladores de diseño asistidos por computadora,
- e) Las capacidades de salida debe incluir nuevas características y capacidades de estimación.

Actualmente, existen cuatro principales códigos de propósito general usados en el cálculo de dosis de radioterapia. Estos sistemas son EGS, PENELOPE, GEANT y MCNP [\[Buvat y Castiglioni 2002\]](#). Una simulación simple en los códigos Monte Carlo puede ejecutarse por varias horas antes de obtener resultados en computadoras convencionales. Dependiendo del código empleado, los tiempos de cálculo pueden reducirse, lo cual se convierte en un factor importante para elegir un código en particular [\[Love et al., 1998\]](#). Para obtener un resultado más exacto y preciso el modelado debe ser lo más semejante a la realidad [\[Dalledone et al., 2008\]](#).

EGS y PENELOPE simulan tanto el transporte de fotones como de electrones, lo cual tiene la ventaja que durante el uso de estos códigos toda la atención se enfoca en las partículas de interés para el cálculo de dosis. Por otro lado, los códigos MCNP y GEANT son de uso general, simulan el transporte de haces de partículas de altas energías y pueden hacer el seguimiento de las partículas secundarias [\[Reynaert et al., 2006\]](#).

2.5.1 EGS

El código EGS (Electron-Gamma Shower) es un código muy exacto incluso en las vecindades entre materiales con alto y bajo número atómico. Sin embargo, una desventaja de este código, es que los usuarios necesitan programar su código de entrada en macro Fortran también llamado Mortran que incluye la geometría, el término fuente y los *tallies*. Todos los componentes del acelerador (blanco, colimador primario, filtro aplanador, monitos, colimador de hojas múltiples, etc.) son programados y denominados componentes moduladores. El archivo de entrada debe ser generado en donde las dimensiones, materiales y parámetros de transporte deben ser definidos individualmente [Reynaert *et al.*, 2006; Rogers 2006].

Este código se considera como el que simula mejor los modelos para el transporte de electrones-fotones, sin embargo no incluye las reacciones fotonucleares las cuales son de gran importancia en áreas en las que se trabaja con LINAC's de altas energías. [Horst, Czarnecki & Zink 2015].

Love *et al.* (1998) señalan que una de las principales diferencias entre el EGS y el código MCNP son los tiempos de cálculo para resolver el mismo problema; el código EGS es al menos 50% más rápido que el código MCNP.

2.5.2 MCNP

El código MCNP (Monte Carlo N-Particle) es un código de propósito general, energía continua, geometría generalizada, dependiente del tiempo, en el cual, se puede simular el transporte de neutrones, fotones y electrones [Mesbahi 2006; Reynaert, *et al.*, 2006; Bedogni, Gualdrini y Monteventi 2002; Lewis *et al.*, 1999]. Este código simula el transporte de partículas desde que son emitidas por el término fuente hasta que son absorbidas o se escapan por las fronteras del modelo. Con la finalidad de reducir el tiempo de cómputo, este código contiene varias opciones para la reducción de varianza [Lewis *et al.*, 1999]. En la figura 4 se muestra un esquema del uso de este código [Zaidi y Xu 2007; Buvat y Castiglioni 2002].

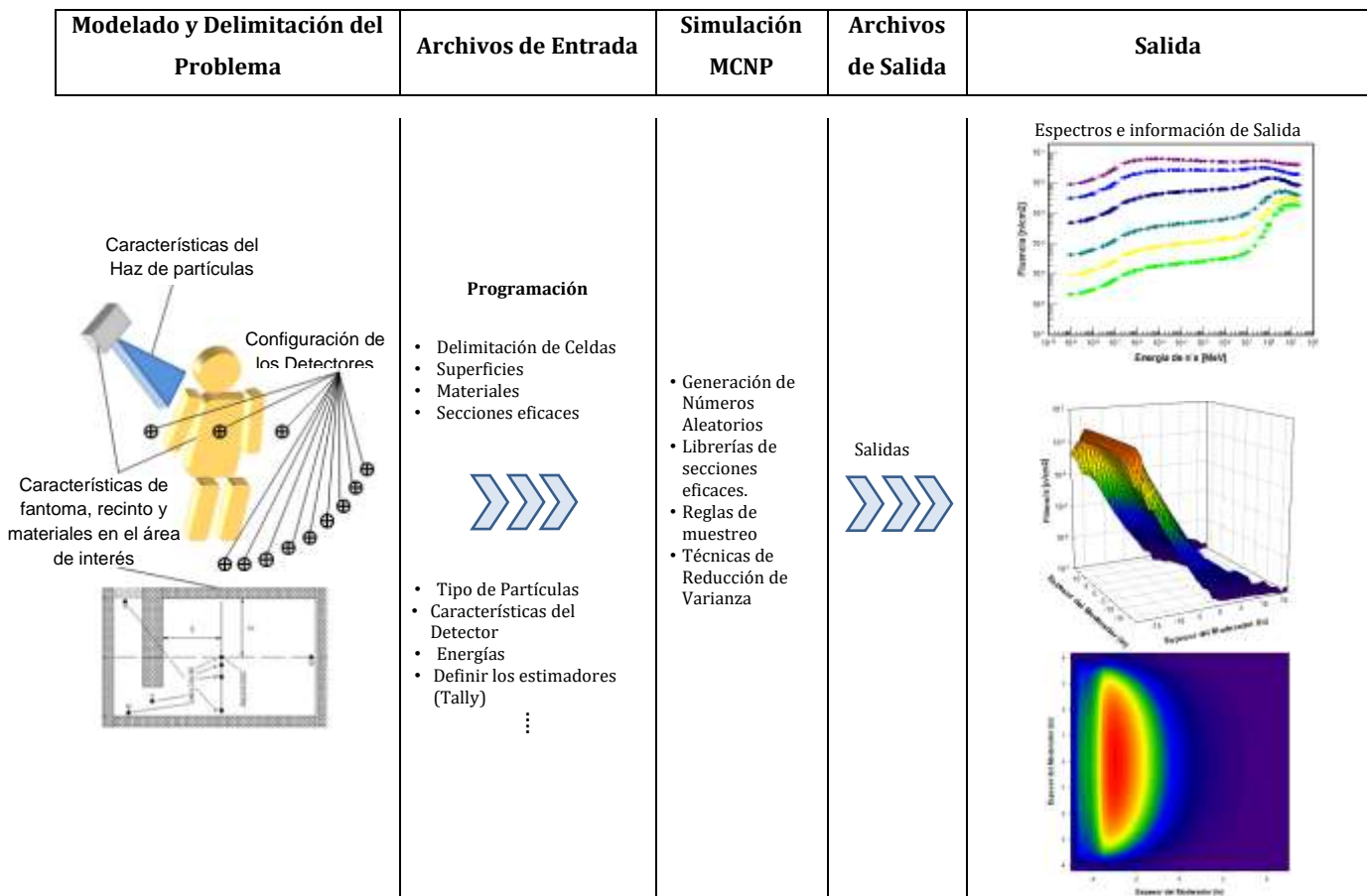


Figura 4. Componentes de la simulación del MCNP

2.5.3 PENELOPE

El código PENELOPE (PENetration and Energy LOss of Positrons and Electrons) tiene subrutinas detalladas para el transporte a bajas energías. También, las subrutinas son más flexibles en la definición de las geometrías del problema [Rogers 2006]. Con este código se puede simular el transporte de electrones, fotones y positrones con energías entre los pocos cientos de eV y 1 GeV [Baumgartner, Steurer y Maringer, 2009; Sánchez-Reyes *et al.*, 2001]. Es capaz de manejar geometrías complejas con campos electromagnéticos, sin embargo, el usuario tiene que programar la aplicación en Fortran [Reynaert *et al.*, 2006].

2.5.4 GEANT

El código GEANT (GEometry And Tracking) originalmente se desarrolló para física de altas energías. Con el GEANT se pueden simular diversos tipos de partículas sobre un amplio rango de energías. Las versiones más actualizadas de dicho código incluyen datos de la física del electromagnetismo a bajas energías lo cual lo hace muy útil para aplicaciones de radioterapia. El código puede manejar geometrías complejas, campos electromagnéticos, detectores y permite el modelado con dependencia del tiempo por ejemplo el decaimiento radiactivo o el movimiento de objetos. Los estudios relacionados con el uso de este código, muestran buenos resultados con el manejo de fotones [Kim *et al.*, 2016; Reynaert *et al.*, 2006].

3 MATERIALES Y MÉTODOS

El Sistema Espectrométrico de Cubos Bonner se diseñó, modeló y se caracterizó su eficiencia mediante Métodos Monte Carlo. Para determinar el espectro de los neutrones es necesario conocer la respuesta entre la combinación de moderador y detector [Pioch *et al.*, 2011; Garny, *et al.*, 2009; Regintto 2009], el conjunto de funciones respuestas nos da la matriz respuesta, la cual caracteriza el SECB, siendo diferente de los demás sistemas espectrométricos. Los que se obtuvieron se compararan con los obtenidos por otros autores tanto en modo pasivo como en modo activo quienes emplearon el Sistema Espectrométrico de esferas Bonner.

3.1 Código MCNP y sus librerías

En el estudio la versión de código Monte Carlo que se empleó fue MCNP 5C usando la librería ENDF/B-VII [Briestmeister 2000] para simular el transporte de los neutrones [Zabihzadeh *et al.*, 2009; Hashemi *et al.*, 2007; Garnica-Garza 2005]. El MCNP C5 se utilizó para calcular las funciones respuesta para cada combinación entre moderador y detector pasivo y/o activo conjuntándolas y así obtener la matriz respuesta para cada caso que se enuncia a continuación. Este código ha sido vastamente utilizado ya que permite desarrollar en detalle los modelos en 3D de todo lo que se involucra en áreas que se desee conocer, determinar y caracterizar el campo de radiación [Zabihzadeh *et al.*, 2009; Mesbahi, Mehnati y Keshtkar 2007; Barquero *et al.*, 2005].

El MCNP contiene bibliotecas de secciones eficaces de la mayoría de isótopos de interés para simular el transporte y la interacción de fotones, electrones y neutrones,

en forma individual y combinada [Zabihzadeh *et al.*, 2009; Becker, Brunckhorst y Schmidt 2007].

Para obtener y asegurar incertidumbres menores o iguales al 2% el número de historias empleado fue lo suficientemente grande en las simulaciones.

Se determinaron las funciones respuesta [Mohammadi, Hakimabad y Motavalli 2015; Lee and Sheu 2015] para cada uno de los tres objetivos de nuestra investigación.

3.2 Detector puntual.

En un primer caso la simulación se realizó con 23 grupos de energía monoenergéticos unidireccionales en un intervalo de $1E(-9)$ a 20 MeV, empleando el estimador o *tally* 5 debido a que la detección se hizo mediante un detector puntual al centro de cada moderador para observar el comportamiento de los neutrones al interactuar con cada espesor de moderación del SECB. Se modelaron cubos de 2, 3, 5, 8, 10 y 12 pulgadas de arista de polietileno de baja densidad (0.92 g/cm^3), paralela a una de las caras del moderador se colocó una fuente de irradiación con un centímetro de separación entre el termino fuente y el moderador como se muestra en la Figura 5.

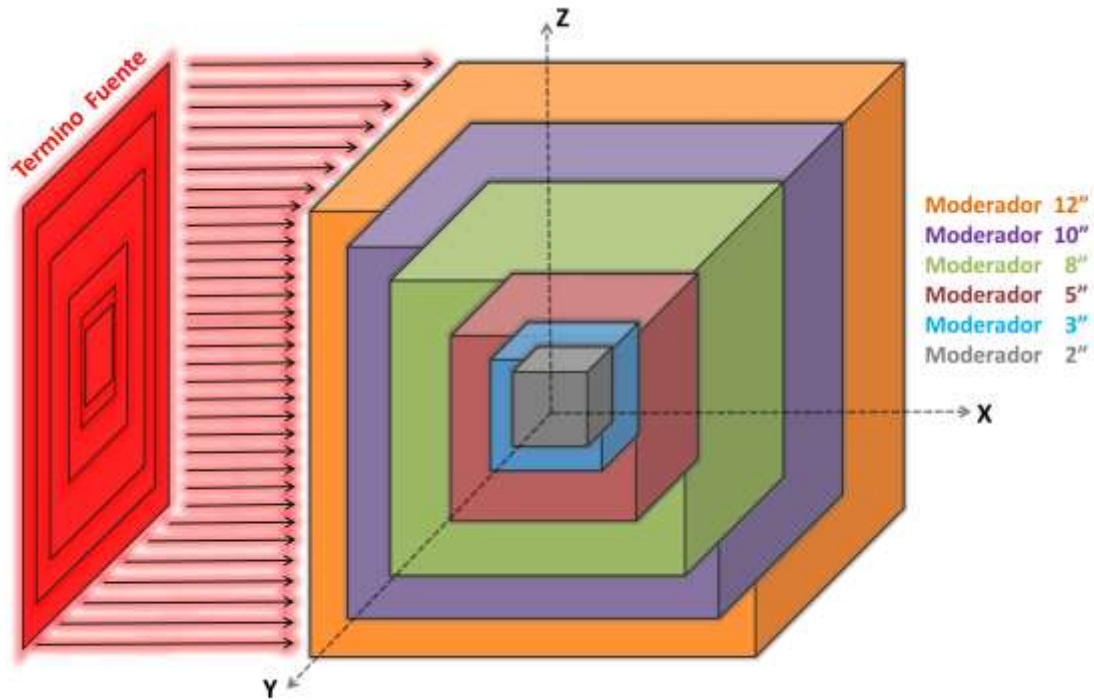


Figura 5. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector puntual.

3.3 Sistema Espectrométrico de Cubos Bonner pasivo (SECB pasivo).

Así mismo para la caracterización del segundo caso propuesto en esta investigación del Sistema Espectrométrico de Cubos Bonner pasivo, se calcularon las funciones respuesta y la fluencia de los neutrones mediante un detector pasivo de laminillas de oro de 1.3 cm de radio y 0.00025 cm de grosor, con una pureza de 100% de Au 197 y una densidad de 19.3 g/cm³, se emplearon 60 grupos de energía en un intervalo de 1E(10⁻⁹) a 20 MeV, a diferencia del caso anterior se empleó el estimador o *tally* 4 que nos permite determinar la fluencia de neutrones a través de una celda, así mismo la tarjeta multiplicadora FM4 para obtener las reacciones sobre el detector de laminillas

de oro con un Factor Multiplicador Proporcional para el Detector Pasivo (FMPDP) [Mohammadi et al., 2014]. Se modeló un fuente monoenergética para cada una de las energías colocándola paralela a una de las caras del moderador como se muestra en la Figura 6 con una separación de 1cm entre el termino fuente y el moderador cubico, empleando el mismo arreglo que el caso sin detector.

Sin embargo para el SECB pasivo se realizaron dos modelos diferentes, uno en el cual el detector pasivo de laminillas de oro se colocó al centro de cada moderador cubico en posición vertical como se observa en la Figura 6, es decir el área más amplia del detector quedó perpendicular al flujo unidireccional de neutrones.

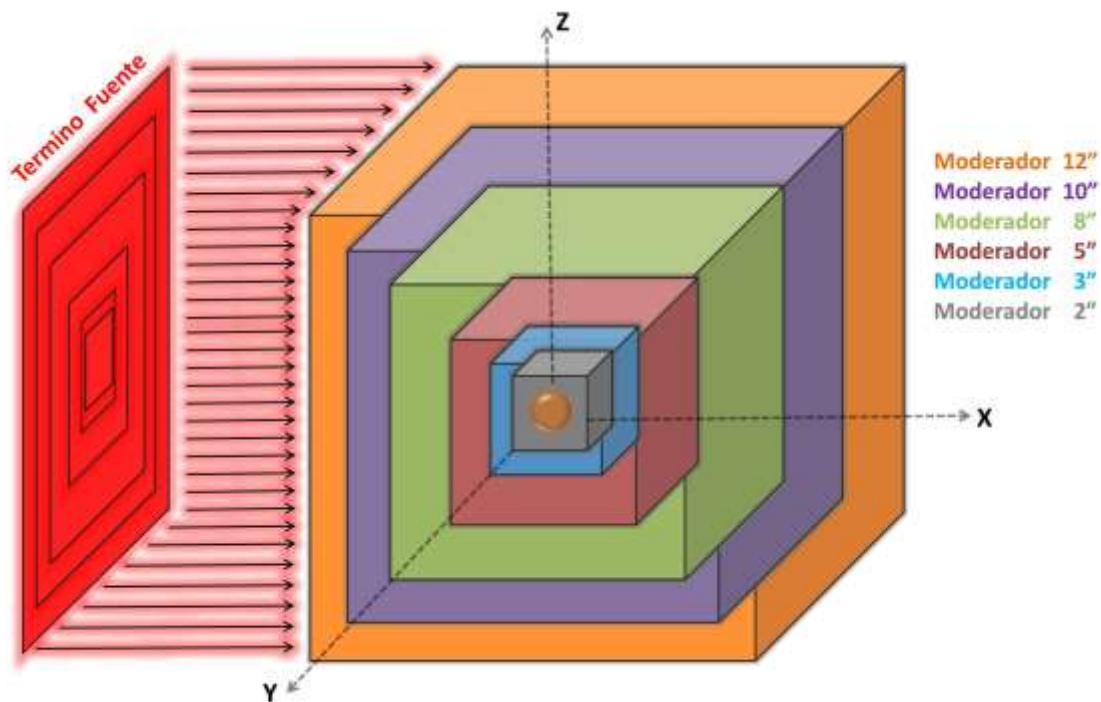


Figura 6. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector pasivo de laminillas de oro en posición vertical.

Otra de las condiciones que se tomó a consideración fue colocar el detector horizontalmente, es decir que la superficie más amplia o sea el diámetro del detector se colocó paralelo al flujo de neutrones (eje x) como se visualiza en la Figura 7. Esto con la finalidad de validar si existe alguna relación entre la posición del detector pasivo con respecto a la fuente de irradiación al momento de obtener las funciones respuesta, el flujo y las reacciones en el detector variando la posición del mismo al interior de cada espesor de moderación.

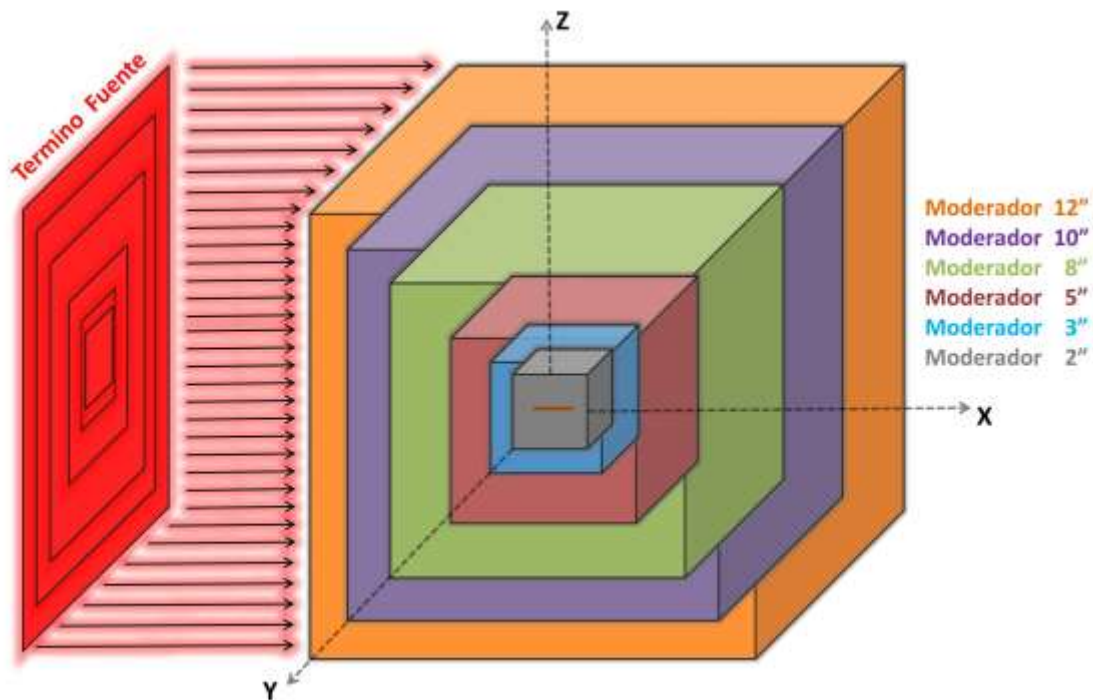


Figura 7. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector pasivo de laminillas de oro en posición horizontal.

La respuesta del sistema es el producto de la reacción de la captura radiactiva descrita por la Ec.(A):

$$R_i(E) = FMPDP_i \int \sigma \Phi_E dE \quad \dots\dots (A)$$

En donde i es el número de cubos, $FMPDP_i$ (Factor Multiplicador Proporcional para el Detector Pasivo) es el área de la fuente de neutrones empleada en cada espesor de moderación, multiplicada por la densidad atómica y dividido entre la densidad en gr/cm^3 del detector, y se calcula como se muestra en la Ec. (B).

$$FMPDP_i = (ARA_i) \frac{\eta_{PD}}{\rho_{PD}} \dots\dots\dots (B)$$

Así mismo el FMPDP nos permite definir las unidades que nos arrojaran nuestras simulaciones.

En el caso del moderador de 2" el FMPDP será:

$$FMPDP_{2"} = (25.08 \text{ cm}^2) \frac{\frac{0.6022 \frac{\text{atomo}}{\text{grmol}} (19.3 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3})}{196.967 \frac{\text{gr}}{\text{grmol}}}}{19.3 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} \dots\dots\dots (B1a)$$

$$FMPDP_{2"} = 7.889958257E - 02 \frac{\text{cm}^2}{\text{gr}} \dots\dots\dots (B1b)$$

Para el moderador de 3" el FMPDP será:

$$FMPDP_{3"} = (58.0644 \text{ cm}^2) \frac{\frac{0.6022 \frac{\text{atomo}}{\text{grmol}} (19.3 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3})}{196.967 \frac{\text{gr}}{\text{grmol}}}}{19.3 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} \dots\dots\dots (B2a)$$

$$FMPDP_{3"} = 0.17752406078 \frac{\text{cm}^2}{\text{gr}} \dots\dots\dots (B2b)$$

Para el moderador de 5" el FMPDP será:

$$FMPDP_{5"} = (161.29 \text{ cm}^2) \frac{\frac{0.6022 \frac{\text{atomo}}{\text{grmol}} (19.3 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3})}{196.967 \frac{\text{gr}}{\text{grmol}}}}{19.3 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}} \dots\dots\dots (B3a)$$

$$FMPDP_{5''} = 0.4931223910 \frac{cm^2}{gr} \dots\dots\dots (B3b)$$

Para el moderador de 8" el FMPDP será:

$$FMPDP_{8''} = (412.9024 \text{ cm}^2) \frac{\frac{0.6022 \frac{atomo}{gramo} (19.3 \frac{gr}{cm^3})}{196.967 \frac{gr}{gramo}}}{19.3 \frac{gr}{cm^3}} \dots\dots\dots (B4a)$$

$$FMPDP_{8''} = 1.2623933211 \frac{cm^2}{gr} \dots\dots\dots (B4b)$$

Para el moderador de 10" el FMPDP será:

$$FMPDP_{10''} = (645.16 \text{ cm}^2) \frac{\frac{0.6022 \frac{atomo}{gramo} (19.3 \frac{gr}{cm^3})}{196.967 \frac{gr}{gramo}}}{19.3 \frac{gr}{cm^3}} \dots\dots\dots (B5a)$$

$$FMPDP_{10''} = 1.9724895642 \frac{cm^2}{gr} \dots\dots\dots (B5b)$$

Para el moderador de 12" el FMPDP será:

$$FMPDP_{12''} = (929.0304 \text{ cm}^2) \frac{\frac{0.6022 \frac{atomo}{gramo} (19.3 \frac{gr}{cm^3})}{196.967 \frac{gr}{gramo}}}{19.3 \frac{gr}{cm^3}} \dots\dots\dots (B6a)$$

$$FMPDP_{12''} = 2.8403849725 \frac{cm^2}{gr} \dots\dots\dots (B6b)$$

3.4 Sistema Espectrométrico de Cubos Bonner activo (SECB activo).

Para la caracterización del Sistema Espectrométrico de Cubos Bonner activo propuesto, se calcularon las funciones respuesta, la fluencia y reacciones consecuencia de los neutrones en un contador proporcional o detector activo de ^3He , se modeló el detector activo comercial de la marca LDN, INC. 25019 (Apéndice) como un cilindro de 0.33 cm de radio y 3 cm de largo, lleno completamente de ^3He a una presión de 10 atm y un volumen activo de 1.03 cm^3 .

Se emplearon 60 grupos de energía, en un intervalo de $1\text{E}(10^{-9})$ a 20 MeV, utilizando el estimador o *tally* 4 que nos permite determinar la fluencia de neutrones a través de una celada, de la misma forma se empleó una tarjeta multiplicadora FM4 para obtener las reacciones sobre el detector de activo de ^3He con un Factor Multiplicador Proporcional para el Detector Activo (FMPDA) [Mohammadi et al., 2014]. Se modeló un fuente monoenergética para cada una de las energías colocándola paralela a una de las caras del moderador como se muestra en la Figura 8 con una separación de 1 cm entre el termino fuente y el moderador cúbico.

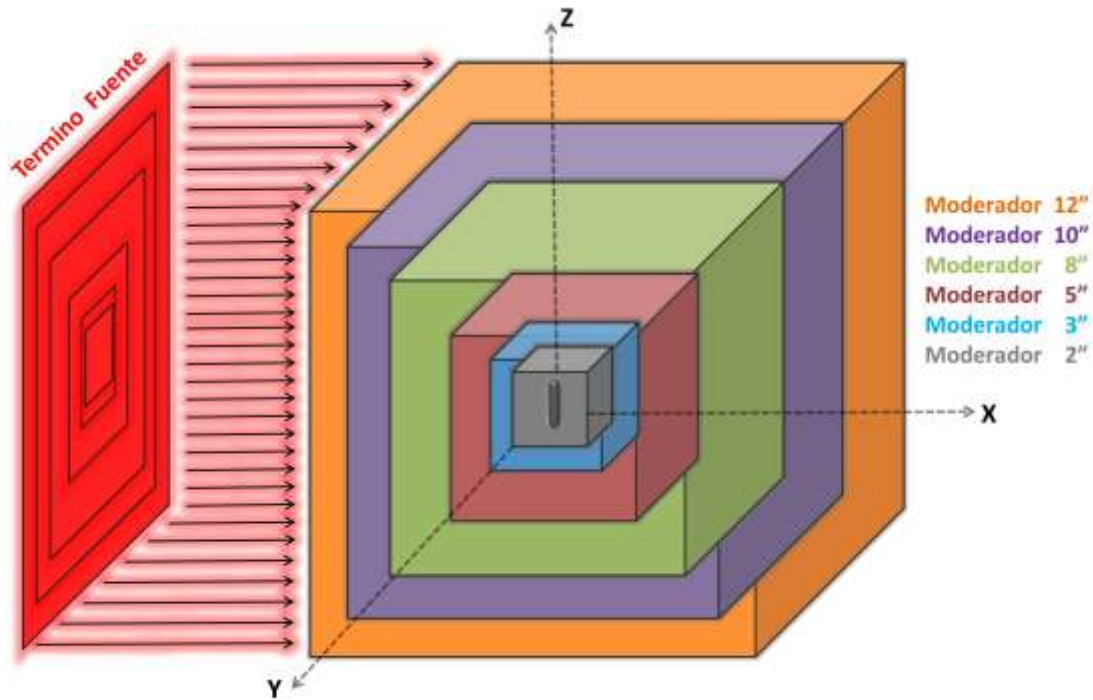


Figura 8. Modelado de los diferentes espesores de moderación con un detector Activo de ^3He .

La respuesta del sistema es el producto de la reacción $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$ [Bougamont *et al*, 2017] descrita por la Ec.(C):

$$R_i(E) = FMPDA_i \int \sigma \Phi_E dE \quad \dots\dots (C)$$

En donde i es el número de cubos, $FMPDA_i$ (Factor Multiplicador Proporcional para el Detector Activo) es el área de la fuente de neutrones empleada en cada espesor de moderación, multiplicada por el volumen activo del detector, por la densidad atómica del gas contenido en el detector, en este caso ^3He Ec. (D).

$$FMPDA_i = (ARA_i) Vol_{^3\text{He}} \eta_{DA} \quad \dots\dots (D)$$

Así mismo el FMPDP nos permite definir las unidades que nos arrojaran nuestras simulaciones.

En el caso del moderador de 2" el FMPDA será:

$$FMPDA_{2''} = (25.08 \text{ cm}^2)(1.03 \text{ cm}^3)(2.524E - 04 \frac{\text{atomos}}{\text{Barra} \times \text{cm}}) \dots\dots\dots (D1a)$$

$$FMPDA_{2''} = 0.0067091989 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (D1b)$$

Para el moderador de 3" el FMPDA será:

$$FMPDA_{3''} = (58.0644 \text{ cm}^2)(1.03 \text{ cm}^3)(2.524E - 04 \frac{\text{atomos}}{\text{Barra} \times \text{cm}}) \dots\dots\dots (D2a)$$

$$FMPDA_{3''} = 0.015095697 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (D2b)$$

Para el moderador de 5" el FMPDA será:

$$FMPDA_{5''} = (161.29 \text{ cm}^2)(1.03 \text{ cm}^3)(2.524E - 04 \frac{\text{atomos}}{\text{Barra} \times \text{cm}}) \dots\dots\dots (D3a)$$

$$FMPDA_{5''} = 0.0419324935 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (D3b)$$

Para el moderador de 8" el FMPDA será:

$$FMPDA_{8''} = (412.9024 \text{ cm}^2)(1.03 \text{ cm}^3)(2.524E - 04 \frac{\text{atomos}}{\text{Barra} \times \text{cm}}) \dots\dots\dots (D4a)$$

$$FMPDA_{8''} = 0.1073471833 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (D4b)$$

Para el moderador de 10" el FMPDA será:

$$FMPDA_{10"} = (645.16 \text{ cm}^2)(1.03 \text{ cm}^2)(2.524E - 04 \frac{\text{atomos}}{\text{Barra} \times \text{cm}}) \dots\dots\dots (D5a)$$

$$FMPDA_{10"} = 0.167729974 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (D5b)$$

Para el moderador de 12" el FMPDA será:

$$FMPDA_{12"} = (929.0304 \text{ cm}^2)(1.03 \text{ cm}^2)(2.524E - 04 \frac{\text{atomos}}{\text{Barra} \times \text{cm}}) \dots\dots\dots (D6a)$$

$$FMPDA_{12"} = 0.241531162608 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots (D6b)$$

3.5 Sistema de Espectrométrico de Cubos Bonner (SECB)

El diseño propuesto en para los moderadores cúbicos del SECB sin importar si es activo o pasivo, se asemeja al principio que utilizan las muñecas rusas matryoshka, anidarse una dentro de otra, esto con la finalidad de que con base en un moderador pivote para este diseño el de dos pulgadas, el cual contiene al detector térmico centrado en su interior se aniden los cubos posteriores.

El diseño de anidación de quijadas propuesto para el SECB (Figura 9) responde a la finalidad de conservar la posición del detector térmico sin tener que desplazarlo para incrementar los espesores de moderación con un mínimo arreglo, conservándose el holder con los detectores sin afectación en su lugar. El Sistema de Moderación se

propone de polietileno de baja densidad (0.92 g/cm^3), modelando los cubos anidados con las dimensiones de 2, 3, 5, 8, 10 y 12 pulgadas de arista, con un orificio en la parte central de la base para cobijar el holder al ir anidando los cubos. Cada cubo se encuentra hueco y seccionado por la mitad como se muestra en la Figura 8. Al modelado del polietileno se le dio un tratamiento (α, β) dentro del código MCNP 5C para darle un tratamiento químico para los efectos de los neutrones en el polietileno [Bedogni *et al.*, 2016; Gómez-Ros, *et al.* 2015; Rühm *et al.*, 2014]. Al finalizar la anidación de cada uno de los moderadores se logrará tener un diseño como se muestra en las Figuras 10 y 11 ya sea activo o pasivo el SECB.

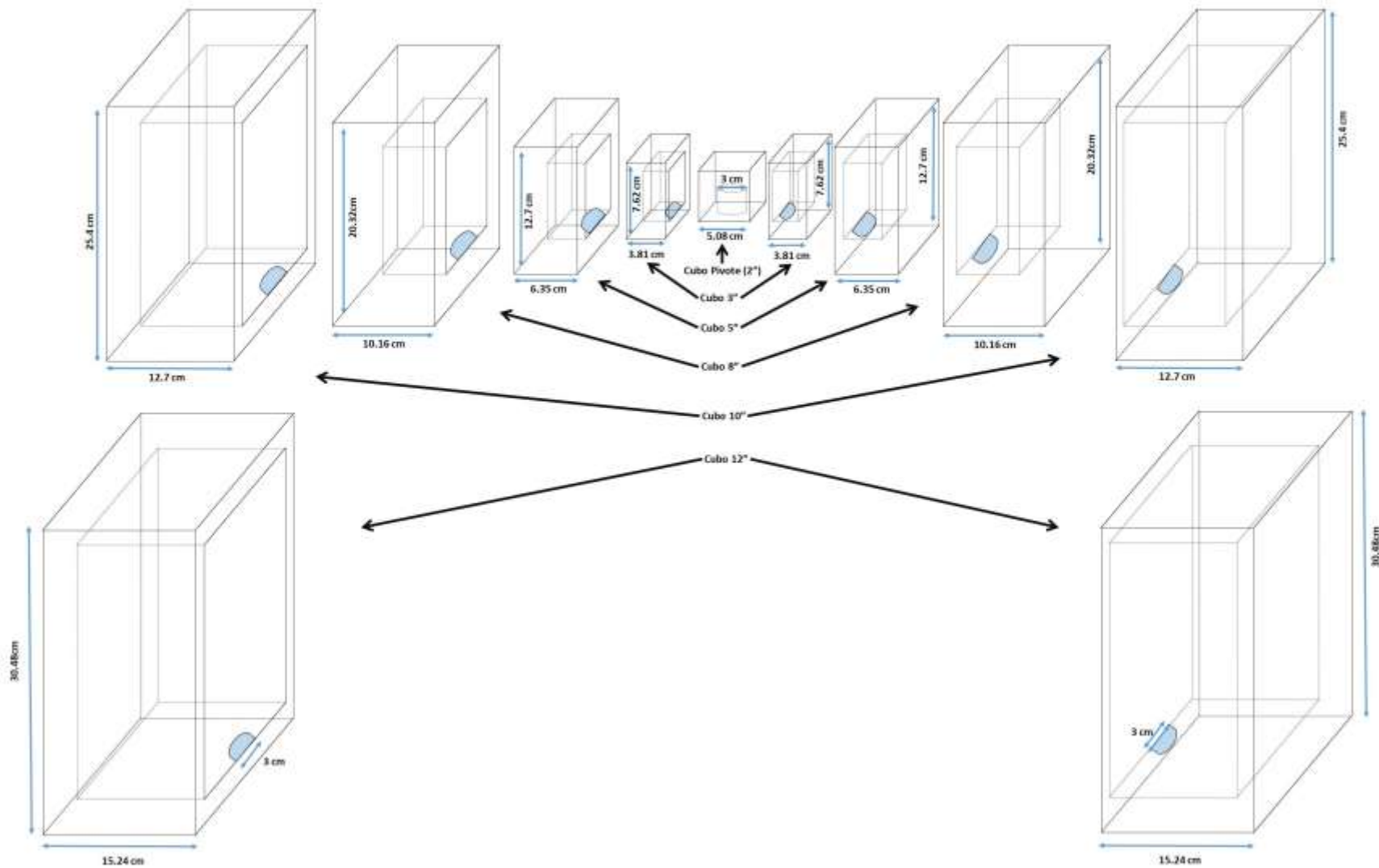


Figura 9. Esquema de anidación y diseño del sistema de moderación de neutrones.

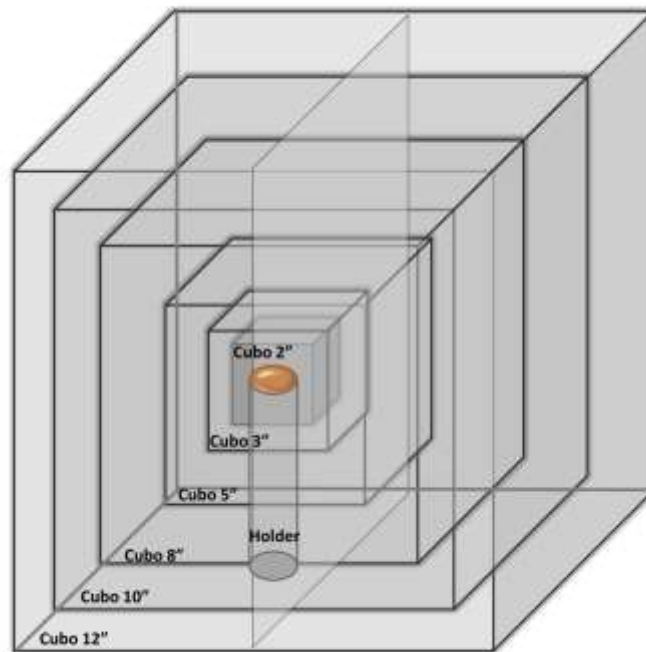


Figura 10. Esquema del SECB en modo pasivo.

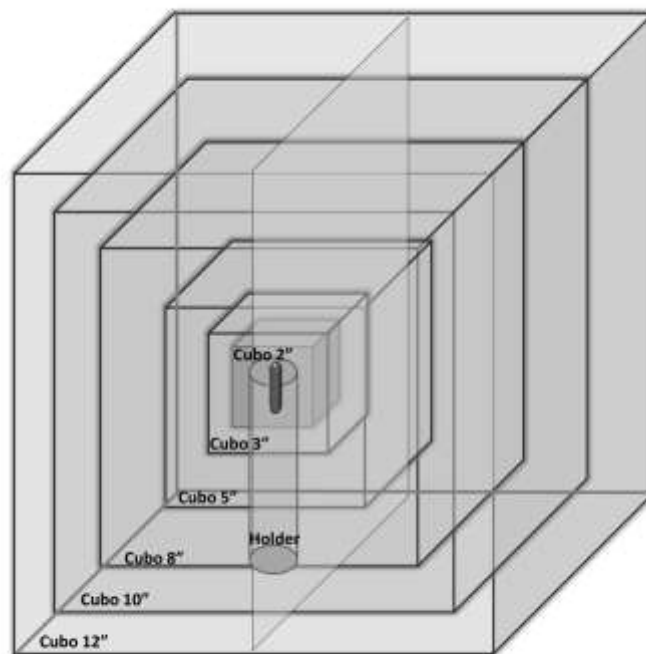


Figura 11. Esquema del SECB en modo activo.

3.6 Monitor de área pasivo.

Como lo menciona la literatura los fotoneutrones en los aceleradores lineales que trabajan con haces de electrones y fotones por encima de 8 MeV, se han detectado fotoneutrones al interior de la sala de tratamiento los cuales presentan un máximo para energías de 1 MeV.

Para tal motivo en el presente estudio se utilizó el arreglo que se muestra en la Figura 12 simulado mediante métodos Monte Carlo empleando los coeficientes de conversión de fluencia a $H^*(10)$ de la ICRP 74 (1996) y los resultados se compararán con los obtenidos por con el monitor de área comercial Berthold LB6411.

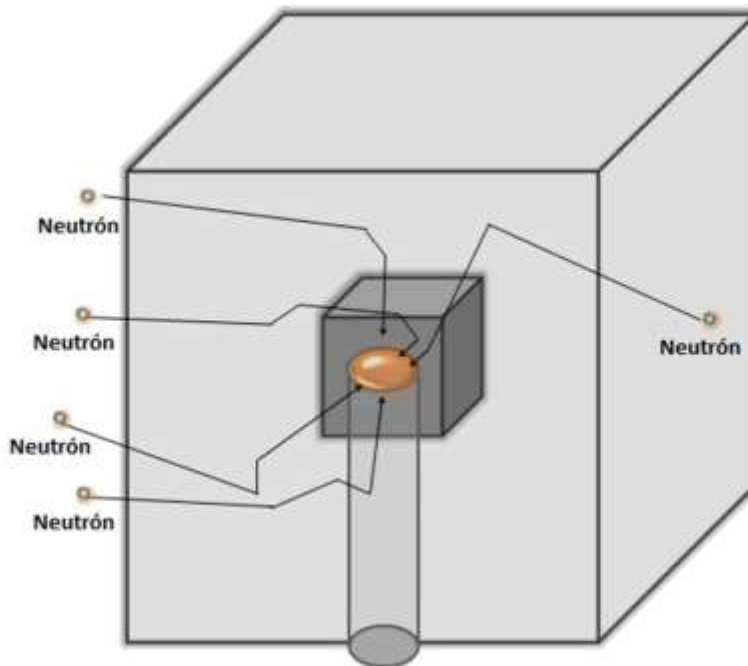


Figura 12. Monitor de área Pasivo SECB.

4 RESULTADOS

4.1 Detector puntual

Los cálculos que a continuación se presentan en la Figura 13, se obtuvieron con la finalidad de observar el comportamiento del flujo de los neutrones a través del SECB ante los diferentes espesores de moderación, mediante métodos Monte Carlo, versión 5, se colocó un detector puntual en la parte central de cada espesor de moderación y se emplearon 23 grupos de energía de los neutrones en un rango de $1E-09$ MeV a 20 MeV.

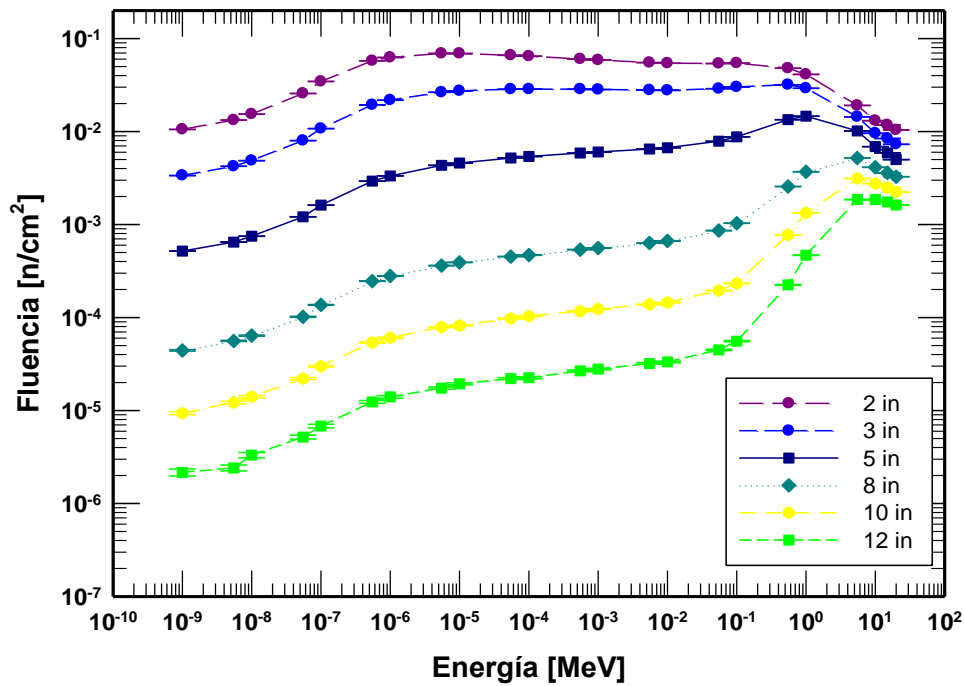


Figura 13. Fluencia de los neutrones bajo los diferentes espesores de moderación del SECB.

4.2 Detector pasivo

Los cálculos que se muestran a continuación se obtuvieron mediante métodos Monte Carlo, versión 5. Se calcularon diversos parámetros utilizando un detector pasivo de laminillas de oro, se emplearon 60 fuentes monoenergéticas de neutrones variando su energía de

Se realizaron los cálculos variando la posición de la laminilla de oro con respecto a la fuente de irradiación, en una primera consideración el detector pasivo de laminillas de oro se simuló colocándolo en posición de canto, es decir la superficie de mayor área quedó perpendicular al flujo de neutrones monoenergéticos como se visualiza en la Figura 7, en un segundo caso el detector pasivo se colocó al centro de cada uno de los moderadores con la diferencia que la superficie más amplia se colocó paralela al flujo de neutrones como se muestra en la Figura 8.

4.2.1 Fluencia de los neutrones.

A continuación en las Figuras de la 14 a la 21 se presenta la fluencia y comportamiento de los neutrones sobre el detector de laminilla de oro, para cada combinación de espesor de moderación del SECB y energía de los neutrones monoenergéticos en el rango de $1E(-9)$ MeV a 20 MeV.

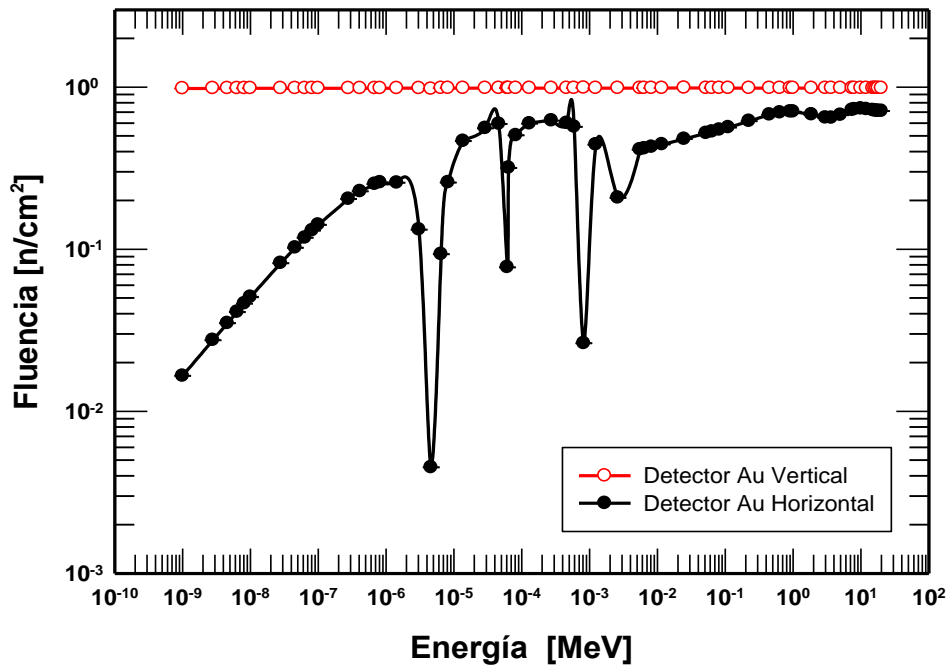


Figura 14. Fluencia de neutrones en el detector desnudo de Au en posición vertical y horizontal

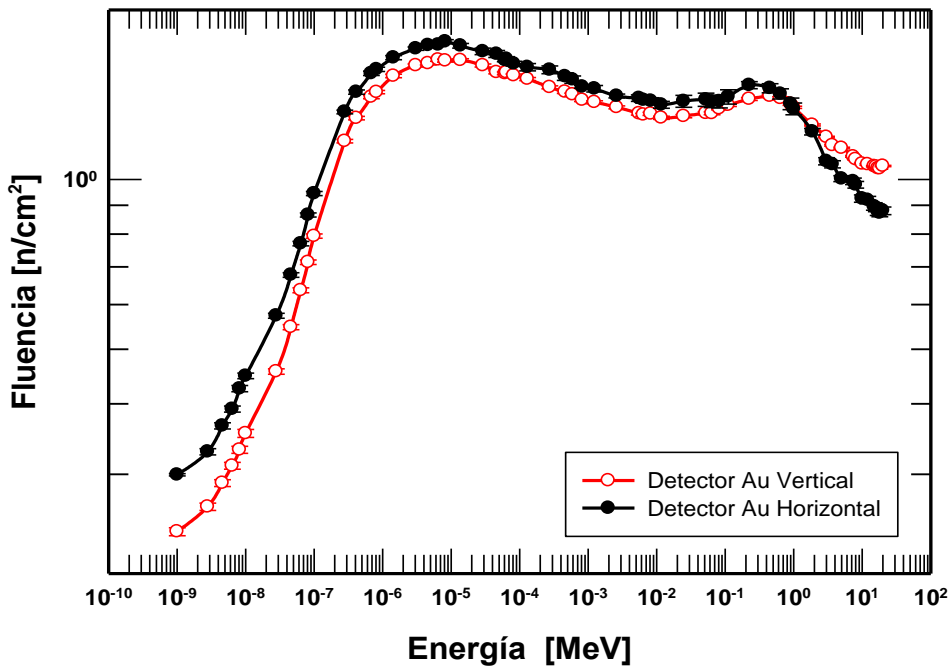


Figura 15. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 2".

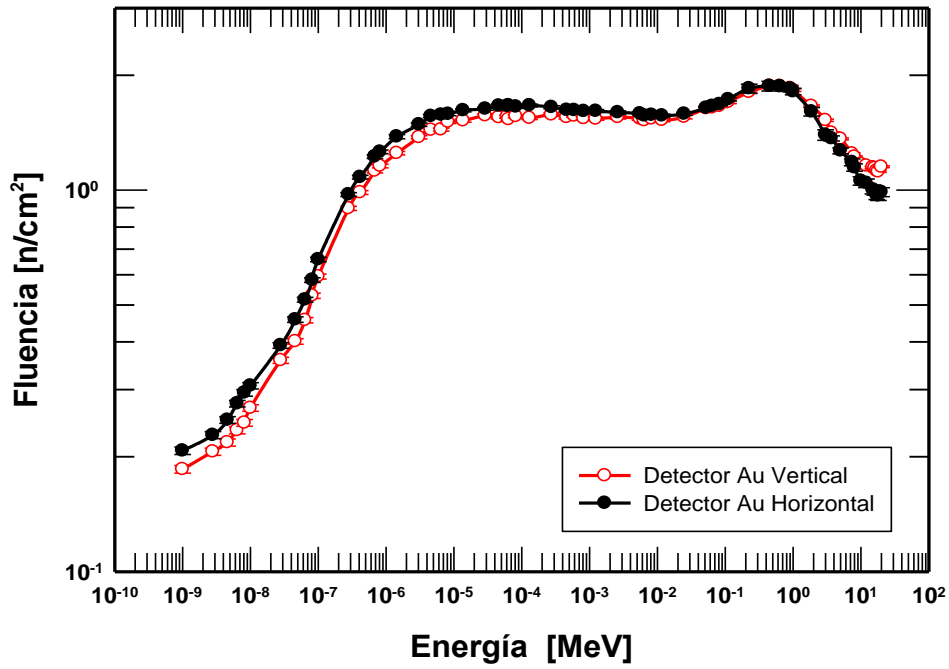


Figura 16. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 3".

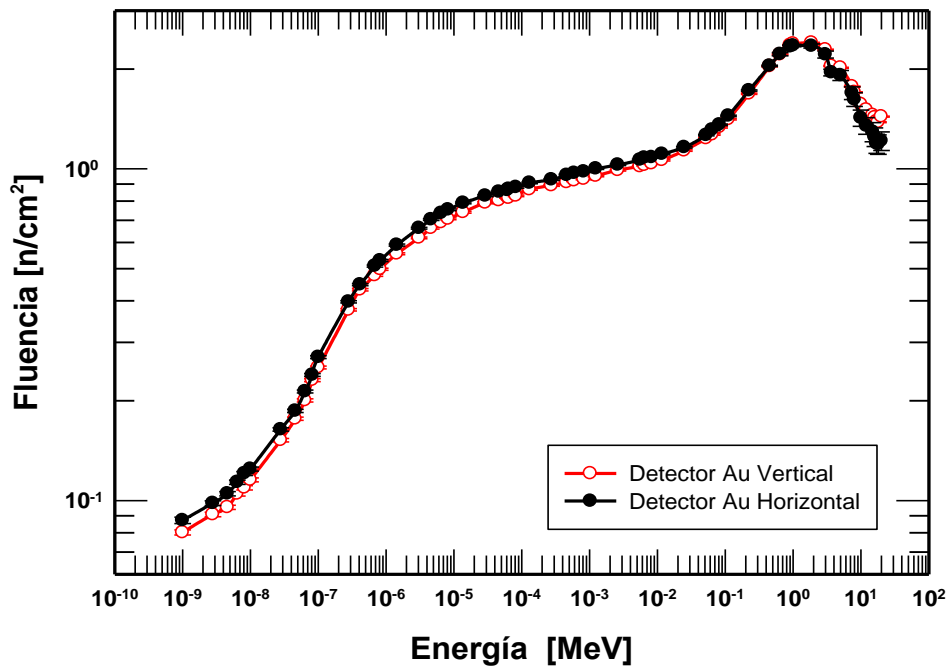


Figura 17. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 5".

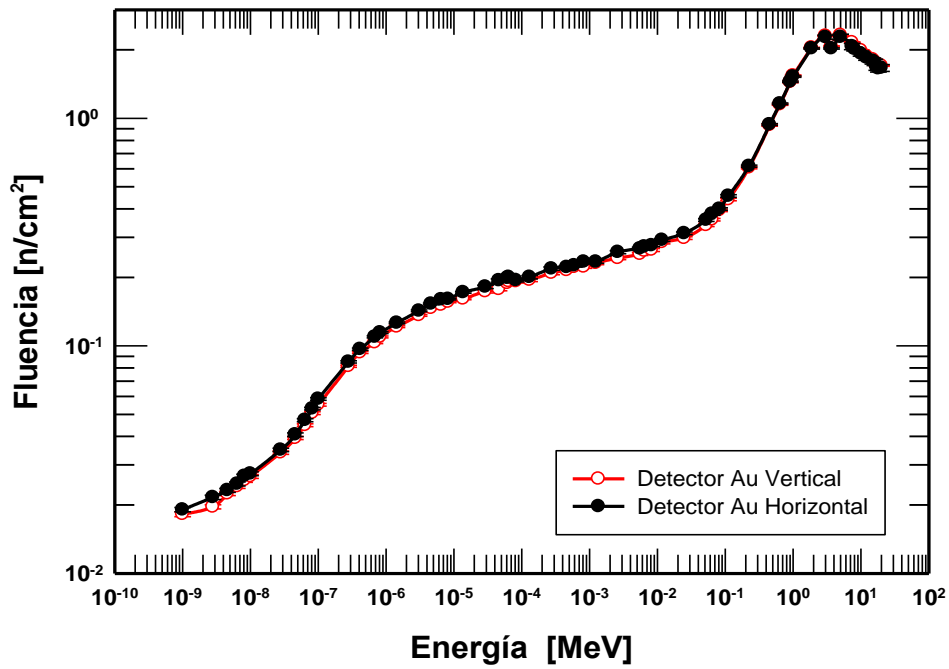


Figura 18. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 8".

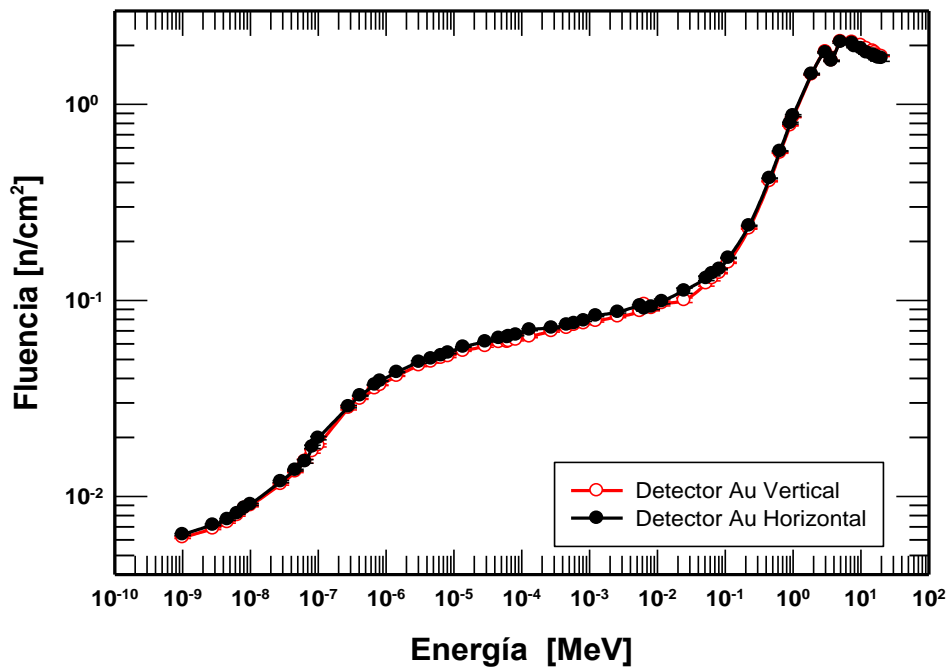


Figura 19. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 10".

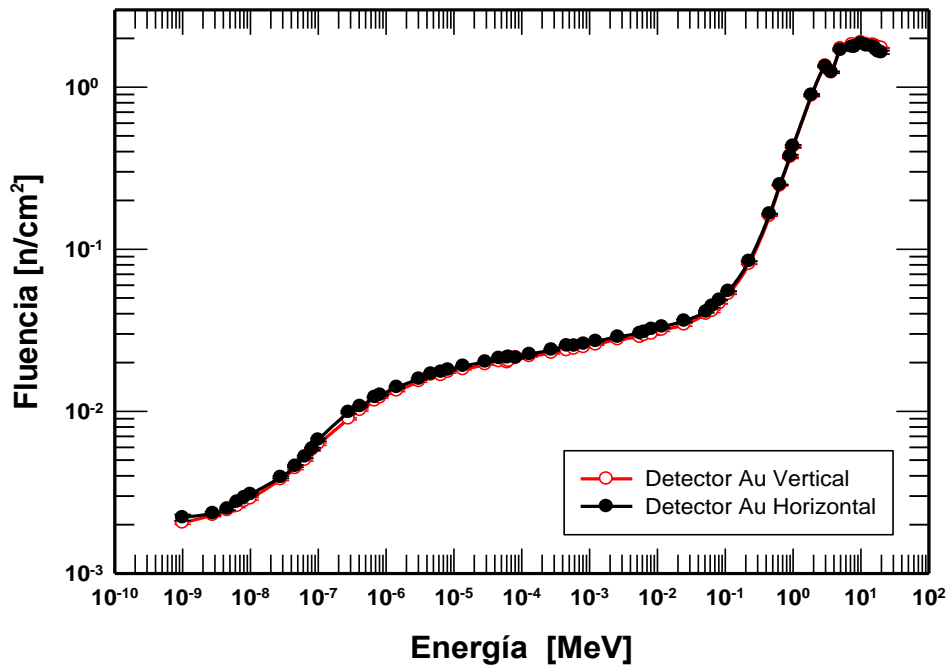


Figura 20. Fluencia de neutrones en el detector de Au en posición vertical y horizontal empleando el moderador de 12".

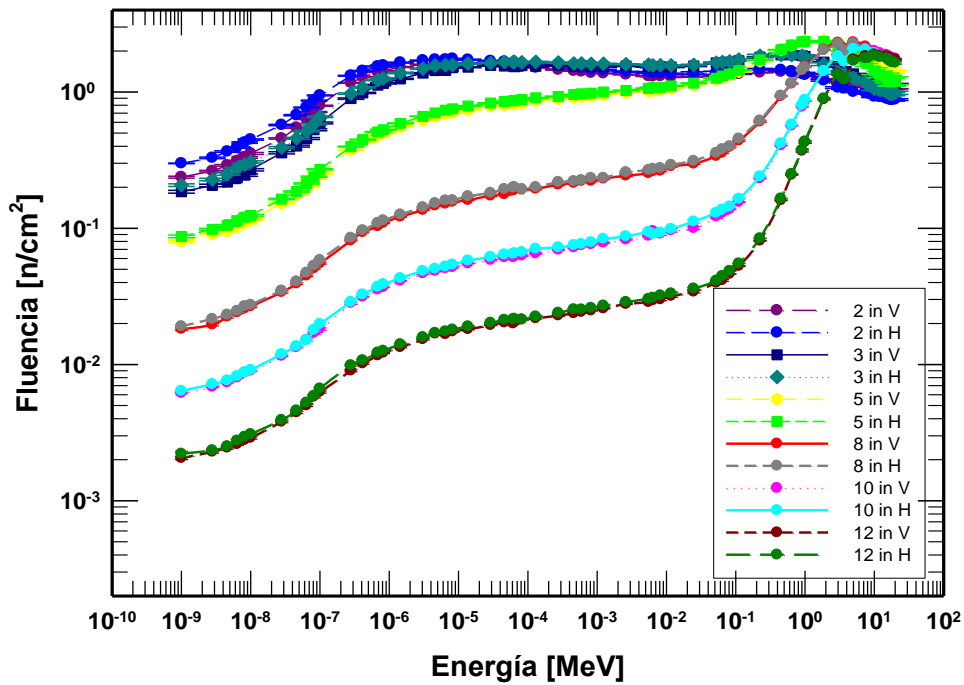


Figura 21. Matriz de fluencia de neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal

4.2.2 Reacciones de absorción en el detector

A continuación de las Figuras de la 22 a la 29 se muestran las reacciones en las cuales el neutrón es absorbido por el detector pasivo de laminilla de oro, obteniendo la respuesta para cada combinación de energía-moderador.

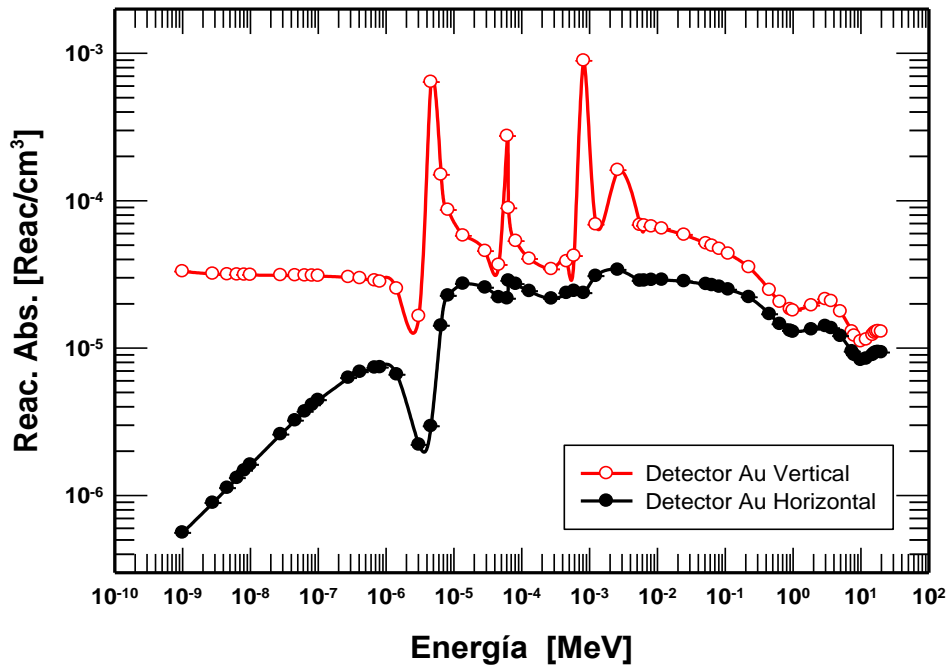


Figura 22. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector desnudo de Au colocado en forma vertical y horizontal.

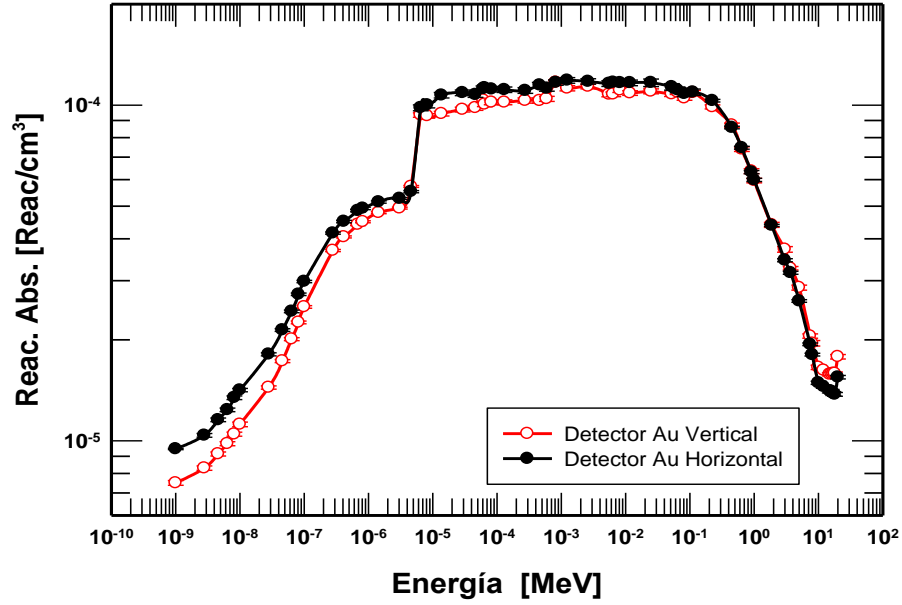


Figura 23. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador de 2".

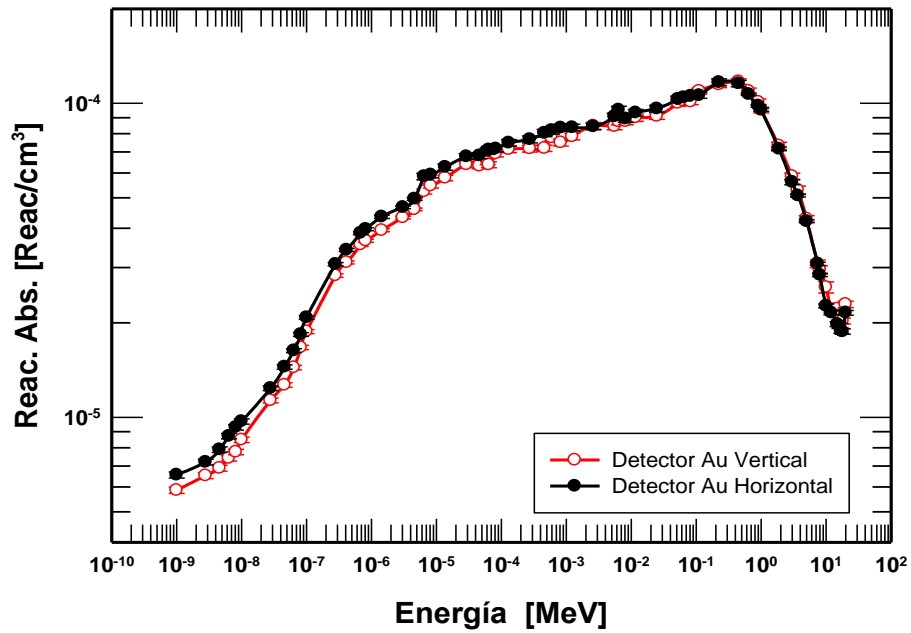


Figura 24. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 3".

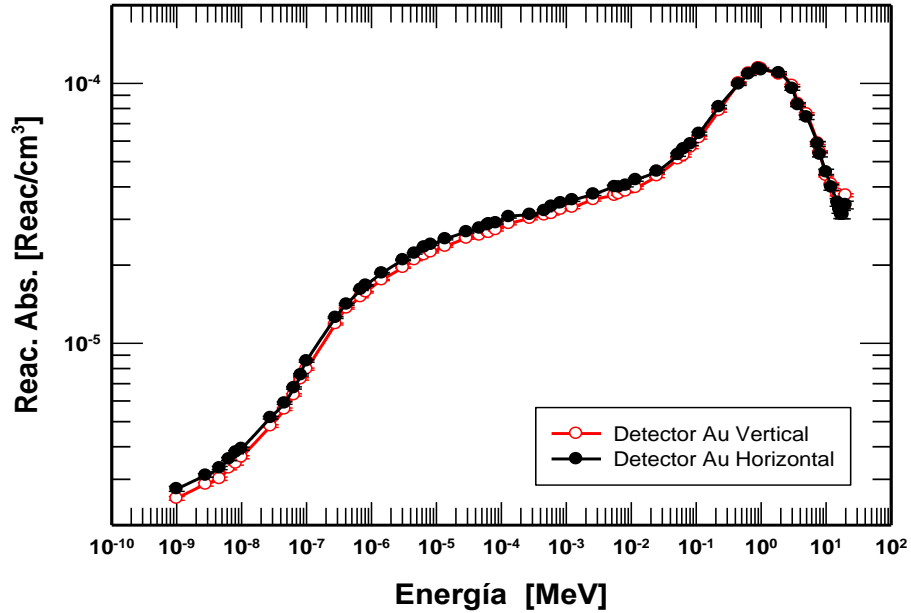


Figura 25. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 5".

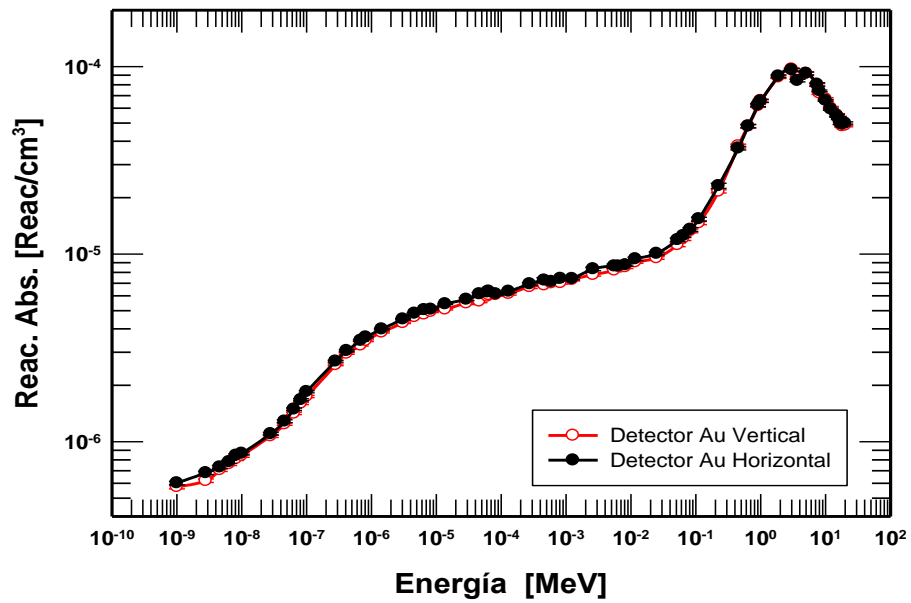


Figura 26. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 8".

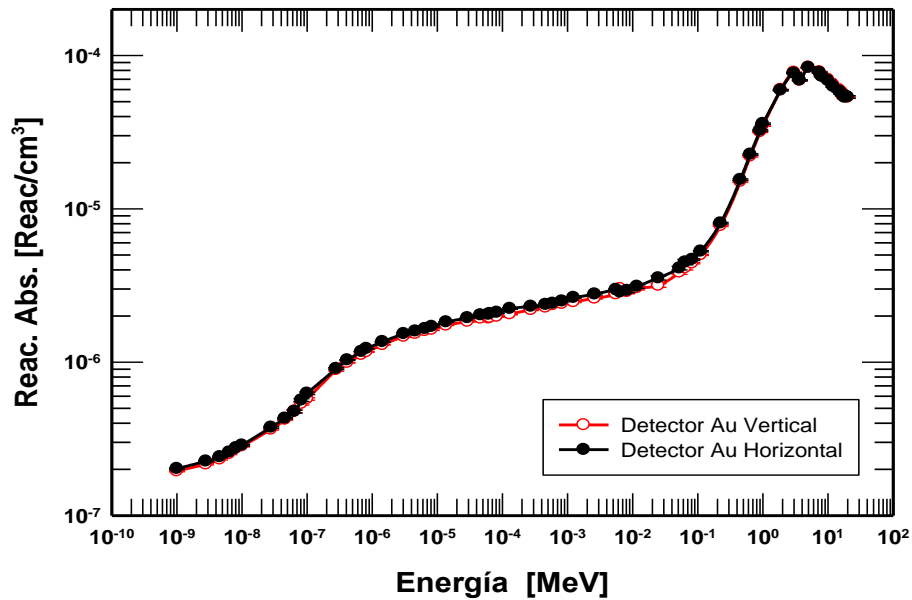


Figura 27. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 10".

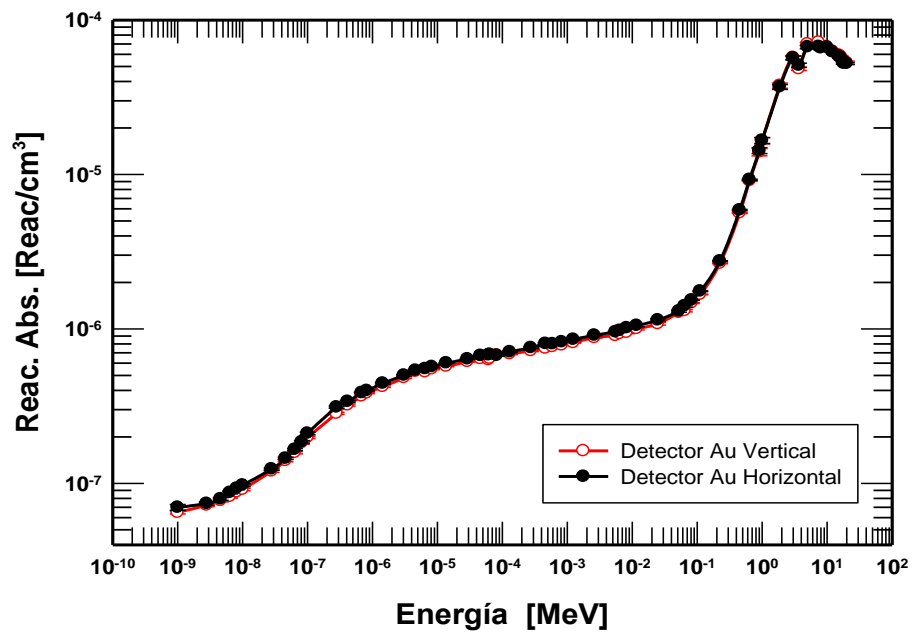


Figura 28. Reacciones de absorción generadas por los neutrones en el detector de Au colocado en forma vertical y horizontal con un moderador 12".

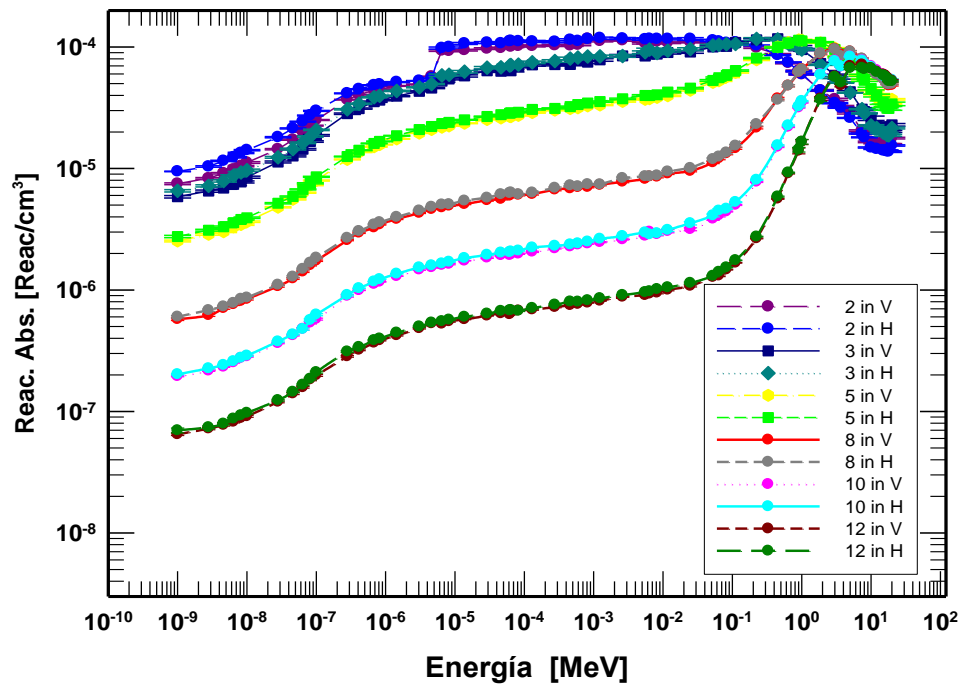


Figura 29. Matriz de reacciones de absorción en el detector (Au) en posición vertical y horizontal generadas por los neutrones.

4.2.3 Reacciones de dispersión elástica en el detector

A continuación de la Figura 30 a la 37 se muestran las reacciones en las cuales el neutrón es dispersado por los átomos en el detector pasivo de laminilla de oro, obteniendo la respuesta para cada combinación de energía- moderador.

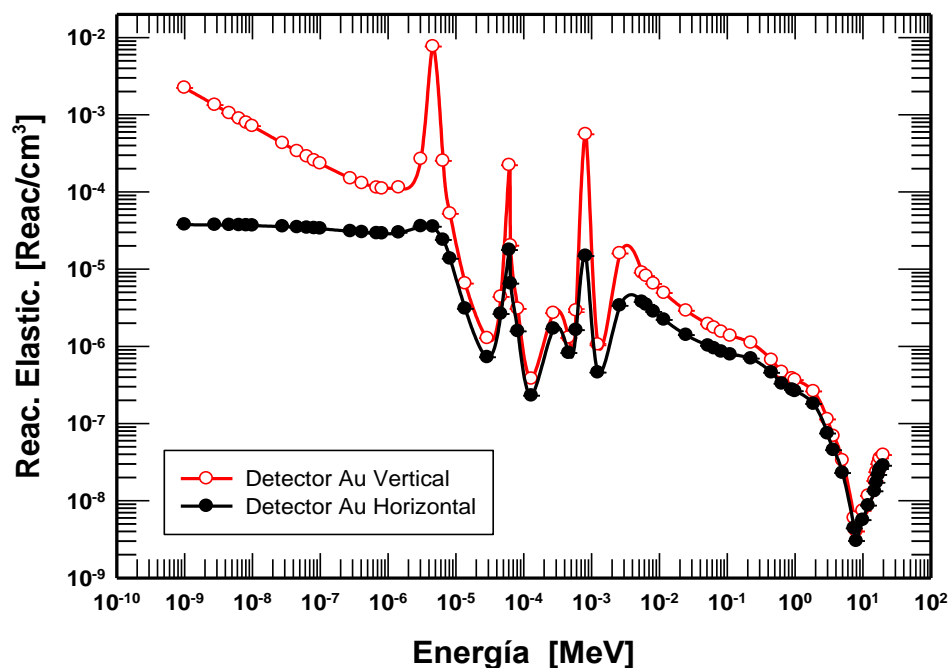


Figura 30. Reacciones elásticas en el detector (Au) desnudo producidas por los neutrones colocado en forma vertical y horizontal.

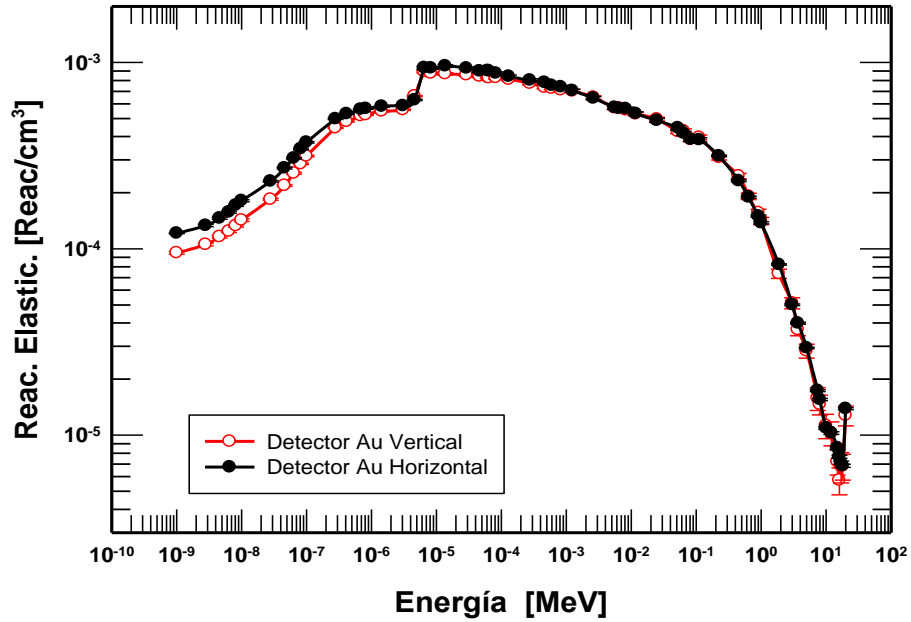


Figura 31. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 2".

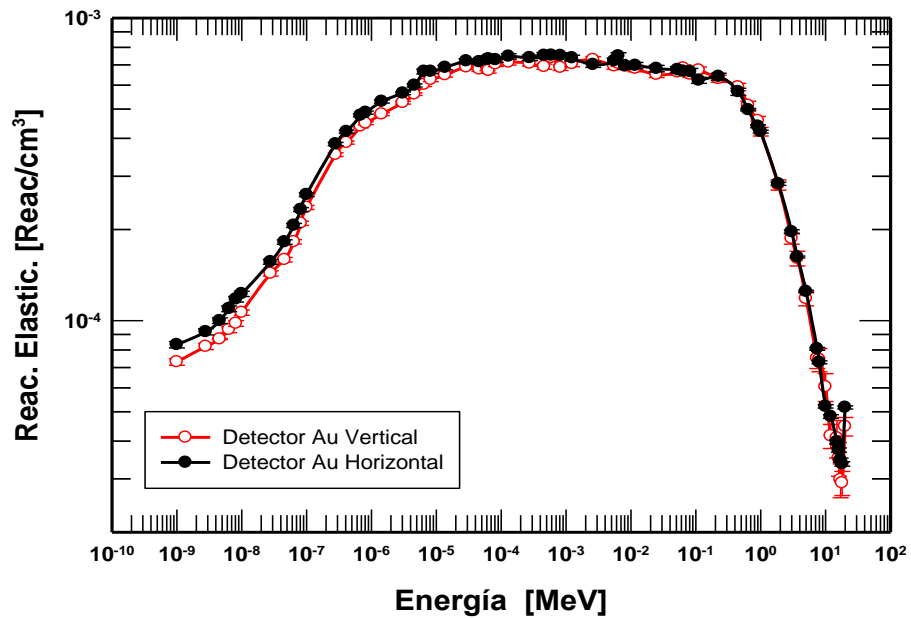


Figura 32. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 3".

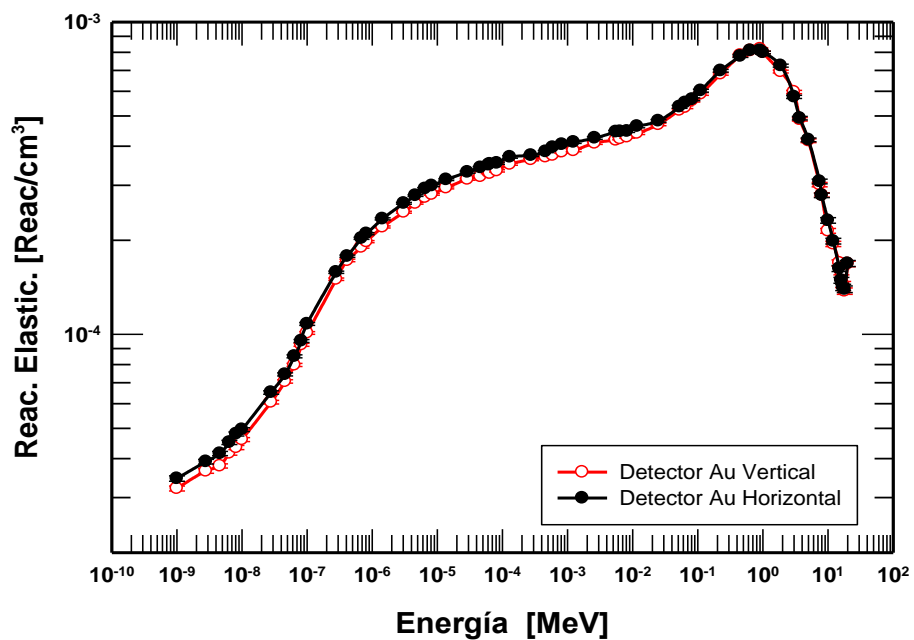


Figura 33. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 5".

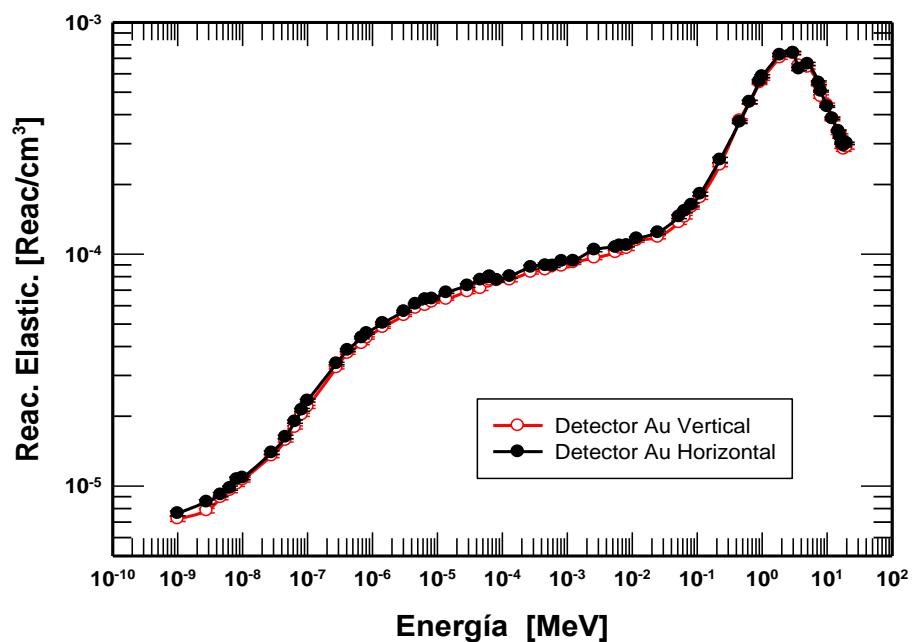


Figura 34. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de.

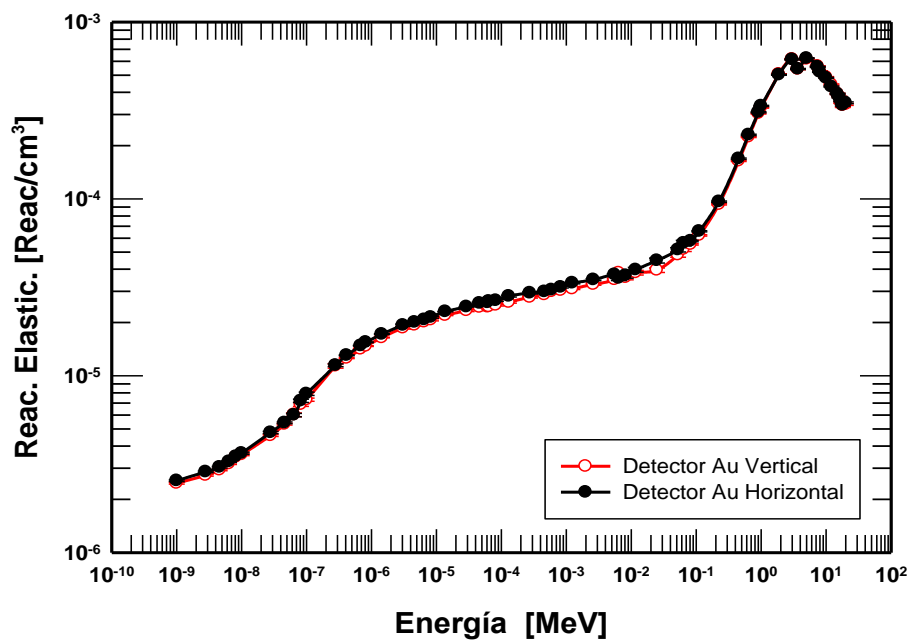


Figura 35. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 10".

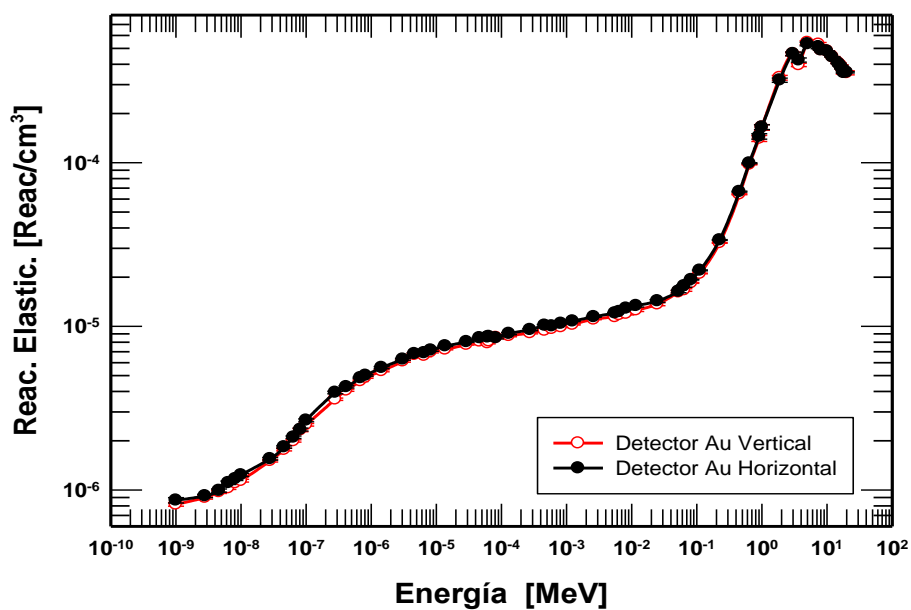


Figura 36. Reacciones elásticas en el detector (Au) en posición horizontal y vertical producidas por los neutrones con un moderador de 12".

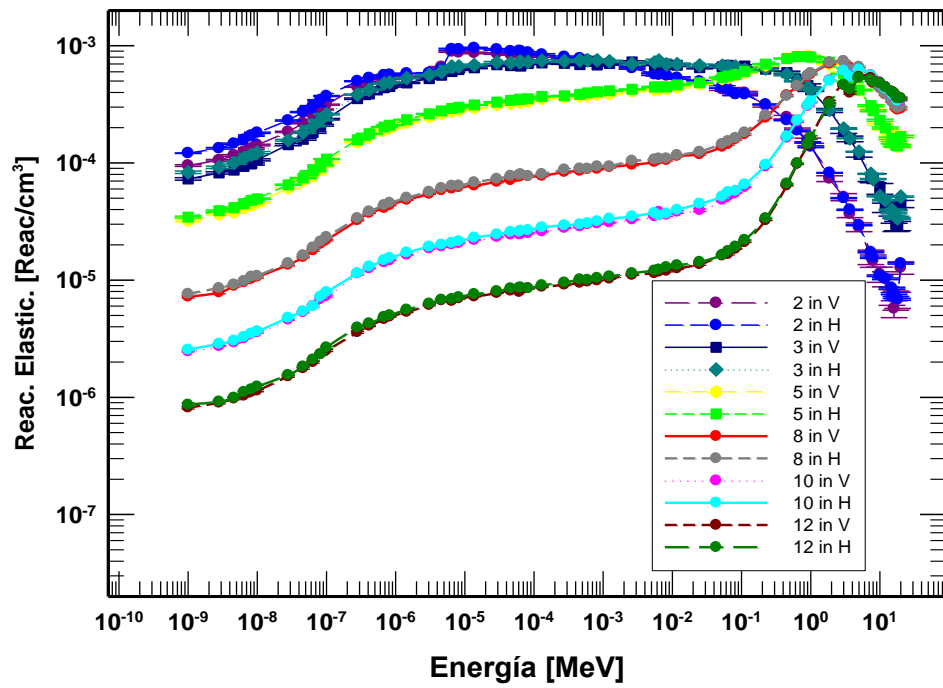


Figura 37. Matriz de las reacciones elásticas producidas por los neutrones en el detector (Au) en posición vertical y horizontal.

4.2.4 Producción de fotones en el detector.

A continuación de la Figura 38 a la 45 se muestran los fotones producidos por la captura del neutrón por los átomos en el detector pasivo de laminilla de oro, obteniendo la respuesta para cada combinación de energía-moderador.

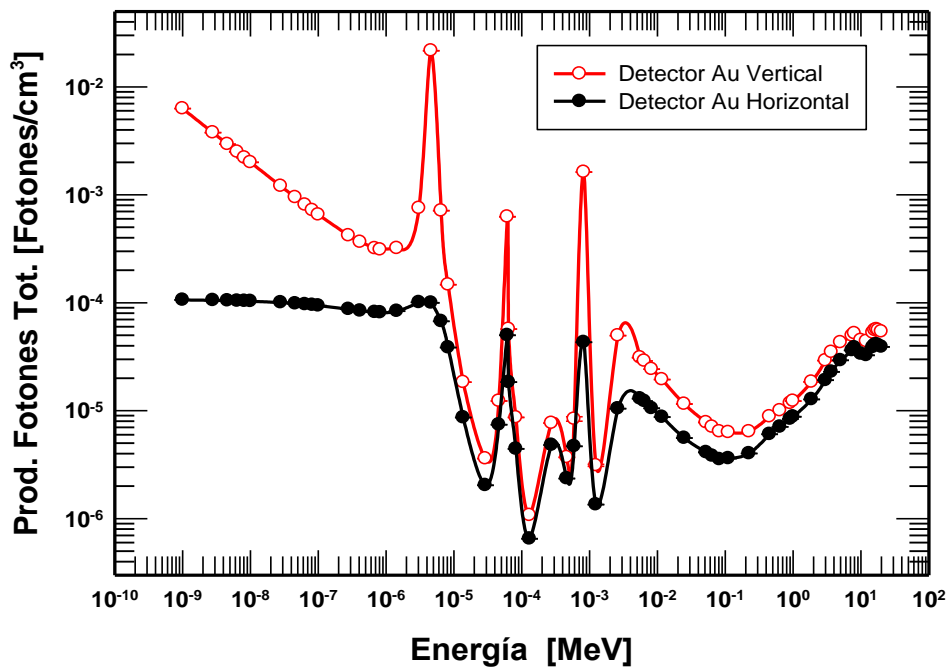


Figura 38. Producción de fotones en el detector (Au) por la interacción de los neutrones en posición vertical y horizontal.

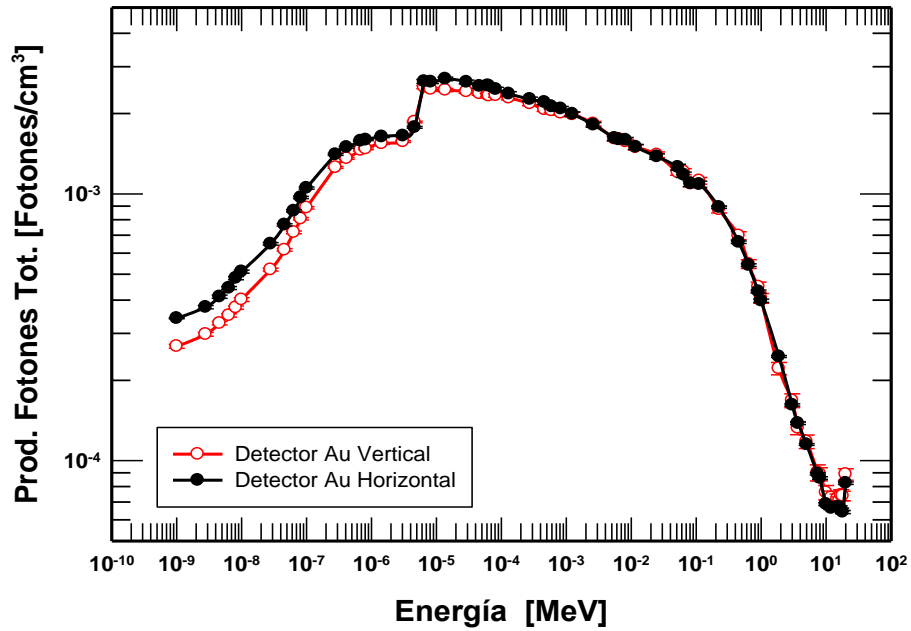


Figura 39. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 2".

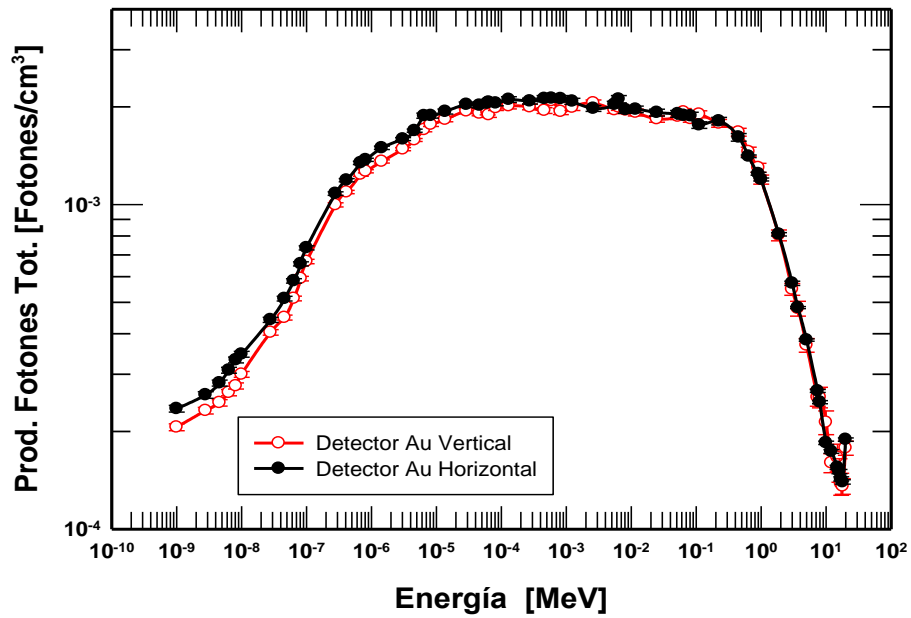


Figura 40. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 3".

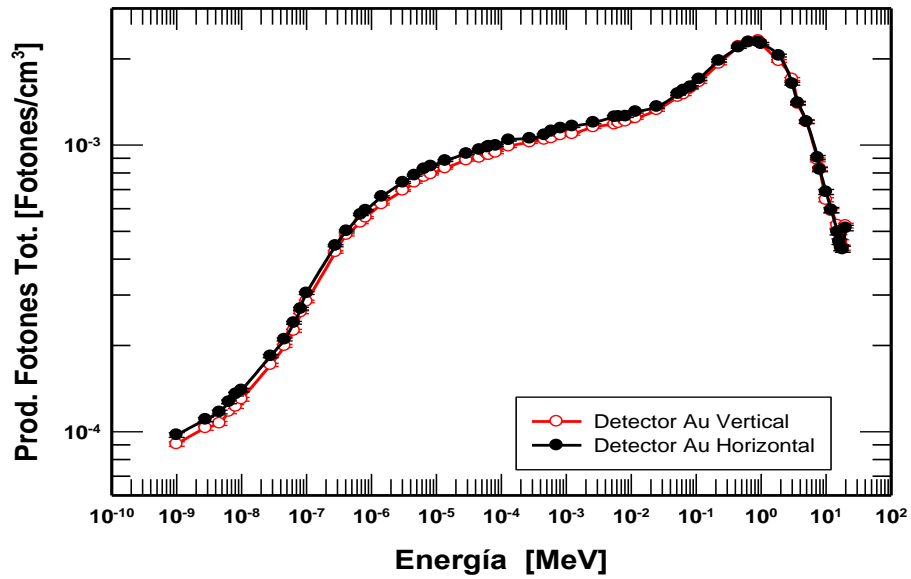


Figura 41. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 5".

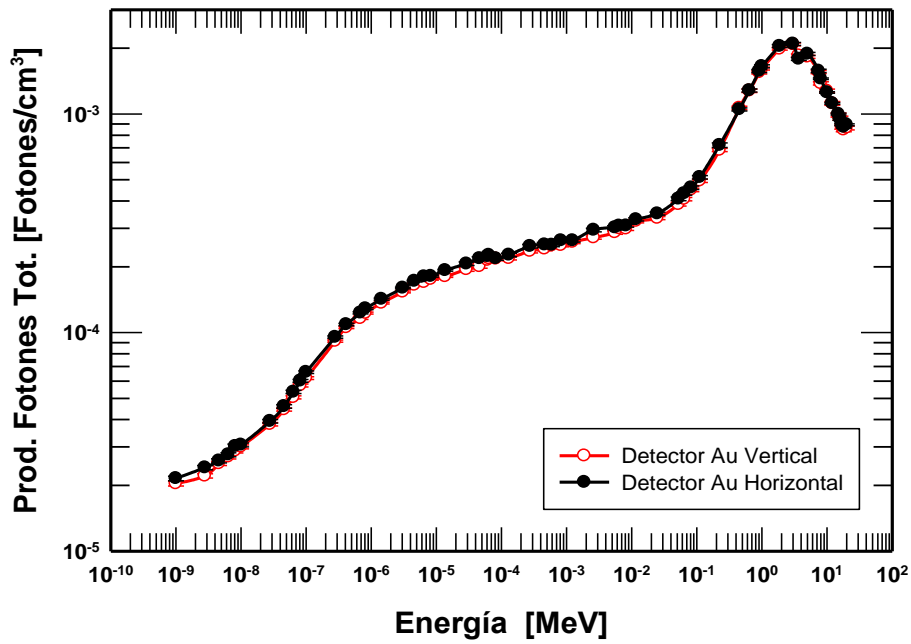


Figura 42. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 8".

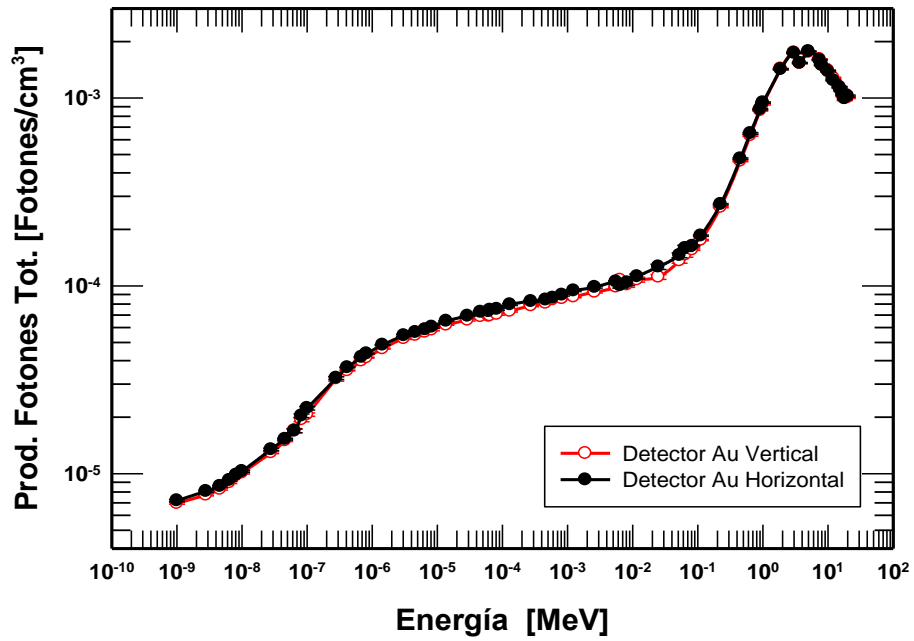


Figura 43. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 10".

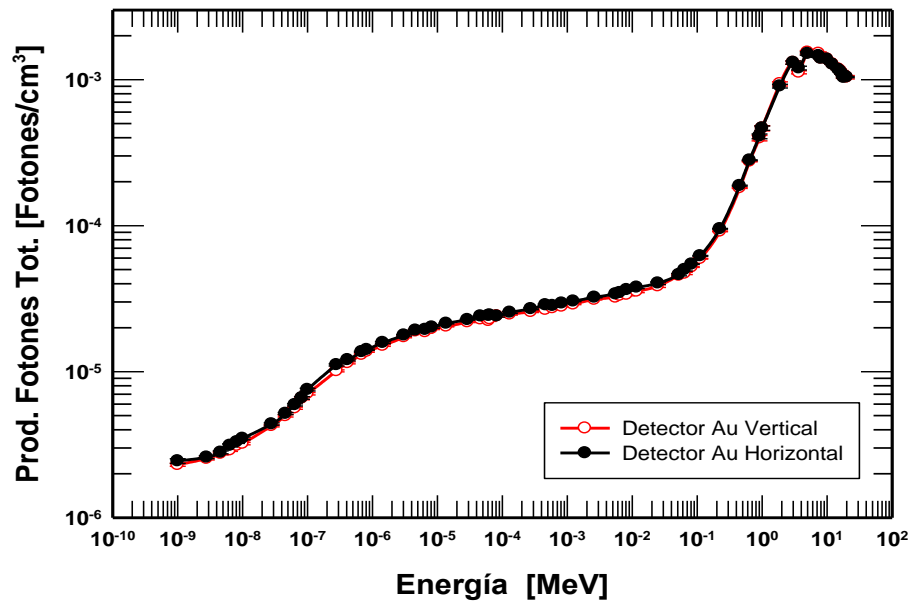


Figura 44. Producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones 12".

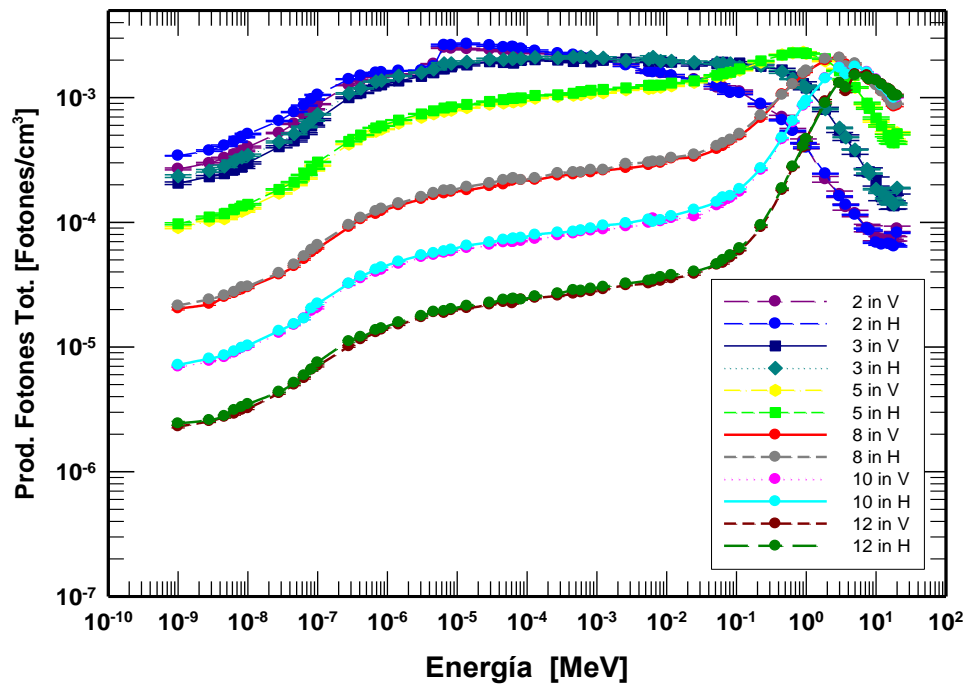


Figura 45. Matriz de la producción de fotones en el detector (Au) en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones.

4.2.5 Reacciones totales en el detector

De la Figura 46 a la 53 se muestra el comportamiento de la suma de todas las reacciones presentes en el detector pasivo al interaccionar los neutrones con los átomos de la laminilla de oro para cada combinación de energía-moderador.

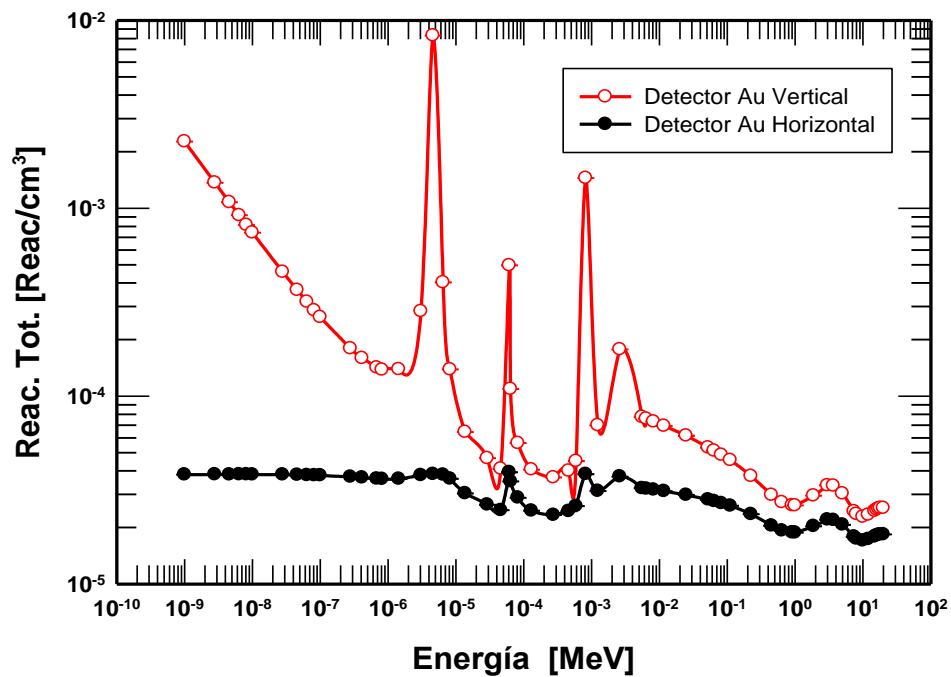


Figura 46. Reacciones totales en el detector (Au) desnudo en posición horizontal y vertical por la interacción de los neutrones..

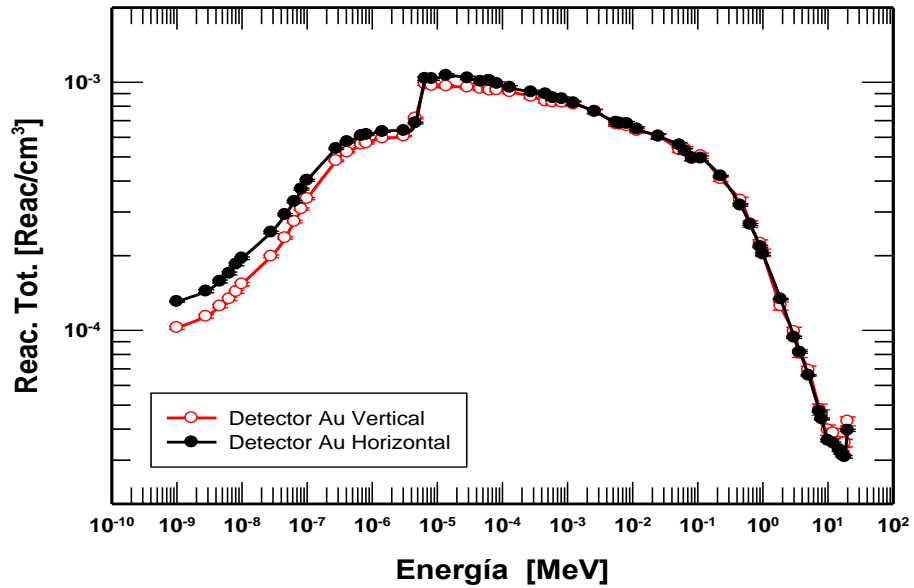


Figura 47. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 2".

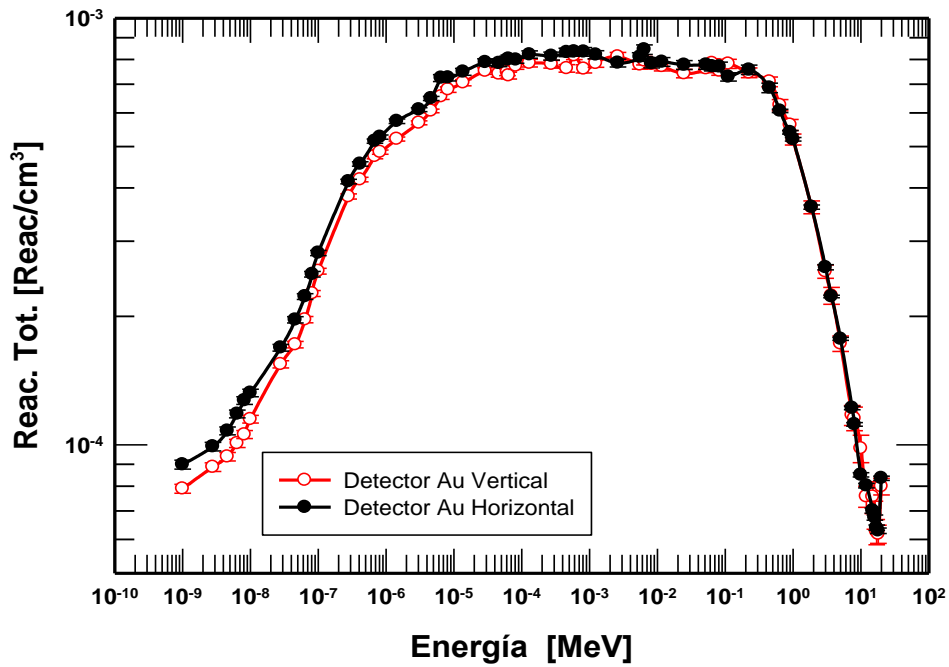


Figura 48. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 3".

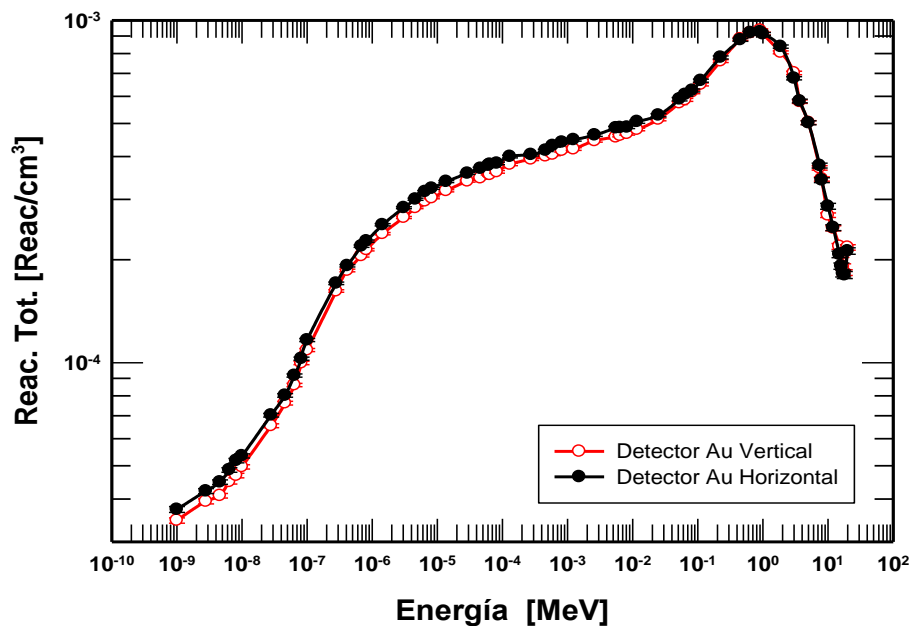


Figura 49. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 5".

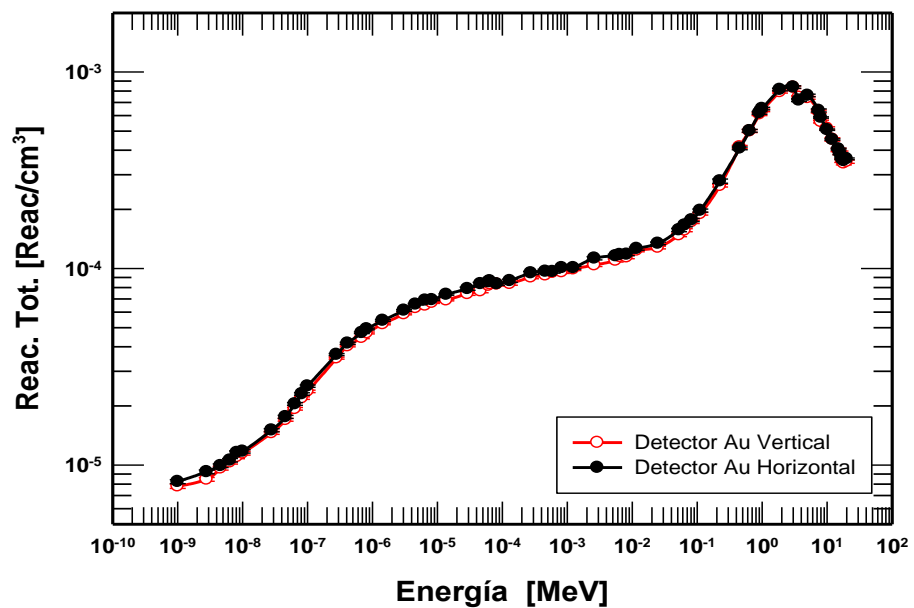


Figura 50. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 8".

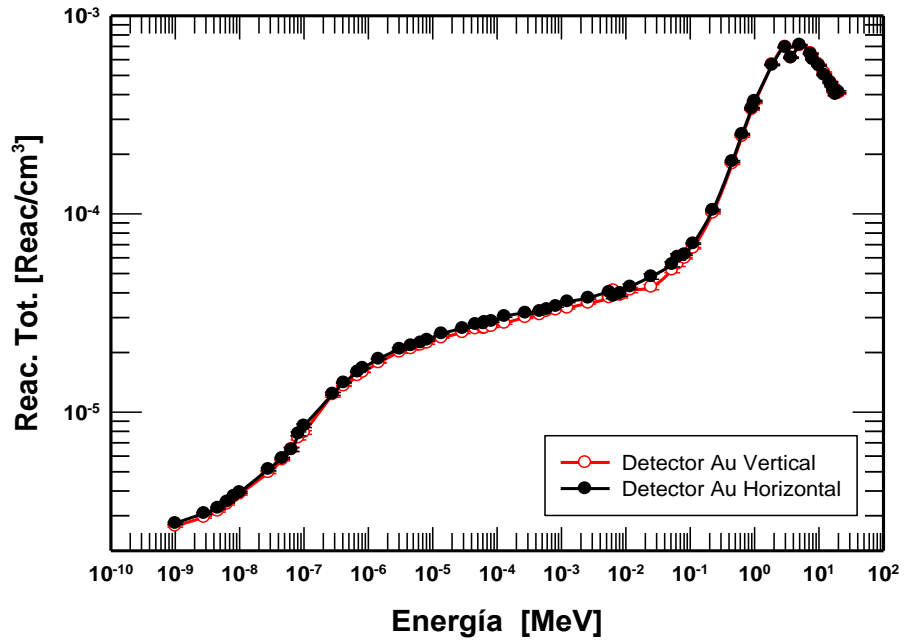


Figura 51. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 10".

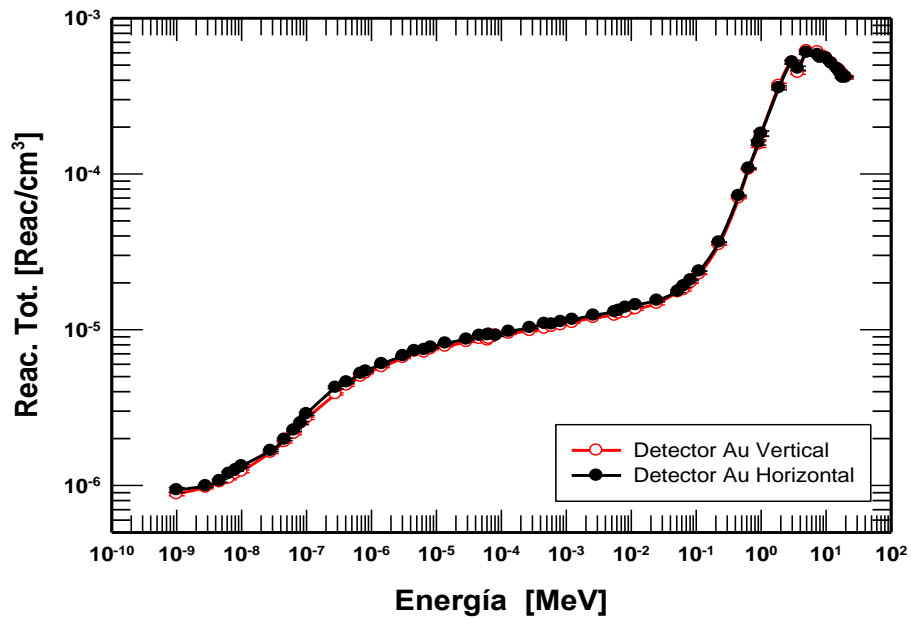


Figura 52. Reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal con un moderador de 12".

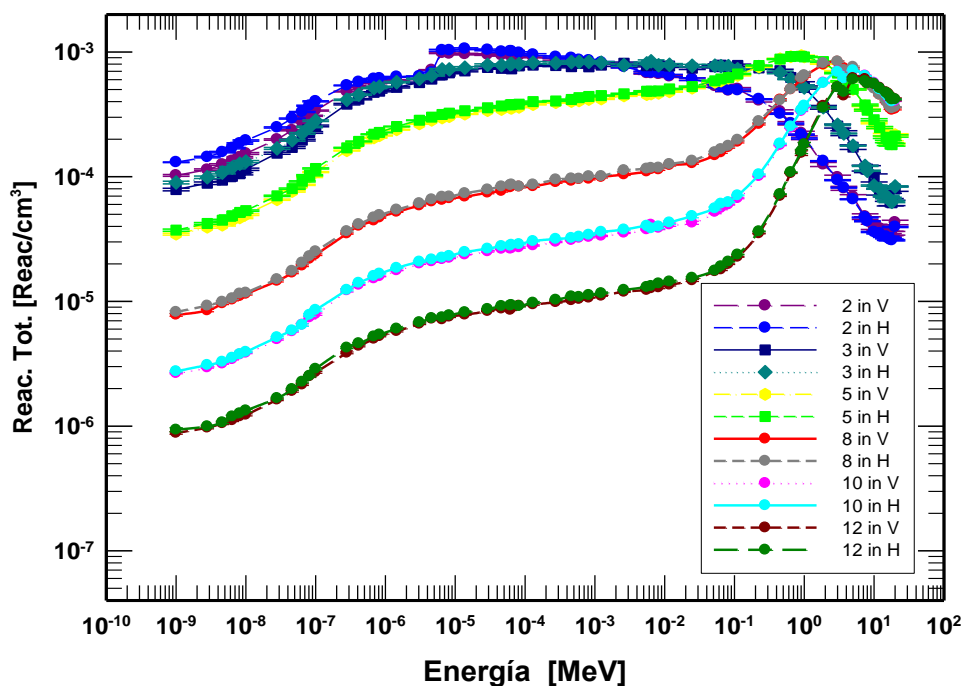


Figura 53. Matriz de las reacciones totales en el detector (Au) en posición vertical y horizontal en cada moderador.

La matriz respuesta SECB con laminilla de Au (SECB pasivo), se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Función respuesta cm^2/g , para cada cubo en función de la energía.

| Energía (MeV) | 0 (in) | 2 (in) | 3 (in) | 5 (in) | 8 (in) | 10 (in) | 12 (in) |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1.000E-09 | 5.5840E-07 | 8.0155E-02 | 5.5098E-02 | 2.2845E-02 | 5.0460E-03 | 1.6865E-03 | 5.7268E-04 |
| 2.800E-09 | 8.9042E-07 | 8.8203E-02 | 6.0748E-02 | 2.5864E-02 | 5.6551E-03 | 1.8926E-03 | 6.0839E-04 |
| 4.600E-09 | 1.1226E-06 | 9.6513E-02 | 6.6094E-02 | 2.7468E-02 | 6.0759E-03 | 2.0107E-03 | 6.5653E-04 |
| 6.400E-09 | 1.3116E-06 | 1.0406E-01 | 7.2391E-02 | 2.9803E-02 | 6.4761E-03 | 2.1633E-03 | 7.3220E-04 |
| 8.200E-09 | 1.4744E-06 | 1.1327E-01 | 7.7848E-02 | 3.1728E-02 | 7.0810E-03 | 2.3111E-03 | 7.7360E-04 |
| 1.000E-08 | 1.6164E-06 | 1.1984E-01 | 8.1101E-02 | 3.2757E-02 | 7.1841E-03 | 2.4142E-03 | 8.1774E-04 |
| 2.800E-08 | 2.5965E-06 | 1.5231E-01 | 1.0349E-01 | 4.3074E-02 | 9.2174E-03 | 3.1586E-03 | 1.0262E-03 |
| 4.600E-08 | 3.2236E-06 | 1.7948E-01 | 1.2032E-01 | 4.9221E-02 | 1.0773E-02 | 3.5845E-03 | 1.2113E-03 |
| 6.400E-08 | 3.7056E-06 | 2.0245E-01 | 1.3647E-01 | 5.6255E-02 | 1.2544E-02 | 3.9636E-03 | 1.3887E-03 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 8.200E-08 | 4.0995E-06 | 2.2723E-01 | 1.5398E-01 | 6.2993E-02 | 1.4099E-02 | 4.7732E-03 | 1.5482E-03 |
| 1.000E-07 | 4.4336E-06 | 2.4656E-01 | 1.7252E-01 | 7.1420E-02 | 1.5451E-02 | 5.2342E-03 | 1.7653E-03 |
| 2.800E-07 | 6.2707E-06 | 3.2964E-01 | 2.5358E-01 | 1.0454E-01 | 2.2363E-02 | 7.5758E-03 | 2.6091E-03 |
| 4.14E-07 | 6.8762E-06 | 3.5079E-01 | 2.7865E-01 | 1.1764E-01 | 2.5531E-02 | 8.6318E-03 | 2.8241E-03 |
| 6.826E-07 | 7.3549E-06 | 3.7053E-01 | 3.1514E-01 | 1.3425E-01 | 2.8877E-02 | 9.7854E-03 | 3.2064E-03 |
| 8.200E-07 | 7.3869E-06 | 3.7398E-01 | 3.2206E-01 | 1.3888E-01 | 3.0191E-02 | 1.0219E-02 | 3.3170E-03 |
| 1.445E-06 | 6.6049E-06 | 3.8407E-01 | 3.5055E-01 | 1.5499E-01 | 3.3362E-02 | 1.1368E-02 | 3.7035E-03 |
| 3.059E-06 | 2.2074E-06 | 3.8719E-01 | 3.7300E-01 | 1.7382E-01 | 3.7501E-02 | 1.2767E-02 | 4.1655E-03 |
| 4.600E-06 | 2.9505E-06 | 4.1630E-01 | 3.9598E-01 | 1.8399E-01 | 4.0332E-02 | 1.3282E-02 | 4.4958E-03 |
| 6.476E-06 | 1.4186E-05 | 6.1891E-01 | 4.4033E-01 | 1.9351E-01 | 4.2274E-02 | 1.3740E-02 | 4.5554E-03 |
| 8.200E-06 | 2.2661E-05 | 6.1672E-01 | 4.4063E-01 | 1.9787E-01 | 4.2480E-02 | 1.4176E-02 | 4.7325E-03 |
| 1.371E-05 | 2.7291E-05 | 6.3276E-01 | 4.5383E-01 | 2.0695E-01 | 4.5192E-02 | 1.5253E-02 | 5.0206E-03 |
| 2.902E-05 | 2.5699E-05 | 6.1589E-01 | 4.7679E-01 | 2.1872E-01 | 4.8440E-02 | 1.6234E-02 | 5.3224E-03 |
| 4.600E-05 | 2.2075E-05 | 5.9456E-01 | 4.7378E-01 | 2.2597E-01 | 5.1223E-02 | 1.7018E-02 | 5.6267E-03 |
| 6.144E-05 | 2.1662E-05 | 5.9669E-01 | 4.8148E-01 | 2.3057E-01 | 5.2389E-02 | 1.7150E-02 | 5.6806E-03 |
| 6.400E-05 | 2.8649E-05 | 5.9594E-01 | 4.8434E-01 | 2.3207E-01 | 5.3038E-02 | 1.7436E-02 | 5.7248E-03 |
| 8.200E-05 | 2.7205E-05 | 5.7858E-01 | 4.8127E-01 | 2.3359E-01 | 5.1185E-02 | 1.7632E-02 | 5.6238E-03 |
| 1.301E-04 | 2.4334E-05 | 5.5651E-01 | 4.9415E-01 | 2.4439E-01 | 5.3106E-02 | 1.8655E-02 | 5.9756E-03 |
| 2.754E-04 | 2.1607E-05 | 5.3093E-01 | 4.8852E-01 | 2.4737E-01 | 5.8213E-02 | 1.9420E-02 | 6.3116E-03 |
| 4.600E-04 | 2.3589E-05 | 5.1684E-01 | 4.9710E-01 | 2.5442E-01 | 5.9182E-02 | 1.9762E-02 | 6.7107E-03 |
| 5.929E-04 | 2.4353E-05 | 4.9822E-01 | 4.9809E-01 | 2.6249E-01 | 5.9004E-02 | 2.0230E-02 | 6.6443E-03 |
| 8.200E-04 | 2.3615E-05 | 4.8923E-01 | 4.9647E-01 | 2.6834E-01 | 6.1788E-02 | 2.0978E-02 | 6.8955E-03 |
| 1.234E-03 | 3.0819E-05 | 4.6696E-01 | 4.8777E-01 | 2.7282E-01 | 6.1858E-02 | 2.2118E-02 | 7.1227E-03 |
| 2.613E-03 | 3.3934E-05 | 4.2536E-01 | 4.6373E-01 | 2.8115E-01 | 6.9081E-02 | 2.3094E-02 | 7.5742E-03 |
| 5.531E-03 | 2.8568E-05 | 3.7863E-01 | 4.7661E-01 | 2.9432E-01 | 7.0895E-02 | 2.4712E-02 | 7.9791E-03 |
| 6.400E-03 | 2.8667E-05 | 3.7434E-01 | 4.9520E-01 | 2.9488E-01 | 7.2115E-02 | 2.3551E-02 | 8.1288E-03 |
| 8.200E-03 | 2.8930E-05 | 3.7296E-01 | 4.5949E-01 | 2.9556E-01 | 7.2299E-02 | 2.4423E-02 | 8.5278E-03 |
| 1.171E-02 | 2.8977E-05 | 3.5131E-01 | 4.6066E-01 | 3.0644E-01 | 7.7262E-02 | 2.6304E-02 | 8.8561E-03 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 2.479E-02 | 2.8376E-05 | 3.2309E-01 | 4.5016E-01 | 3.1909E-01 | 8.2101E-02 | 2.9634E-02 | 9.4583E-03 |
| 5.247E-02 | 2.7091E-05 | 2.9463E-01 | 4.4613E-01 | 3.5411E-01 | 9.5977E-02 | 3.4103E-02 | 1.0812E-02 |
| 6.400E-02 | 2.6643E-05 | 2.7586E-01 | 4.4078E-01 | 3.6460E-01 | 1.0151E-01 | 3.7185E-02 | 1.1696E-02 |
| 8.200E-02 | 2.5977E-05 | 2.5575E-01 | 4.3951E-01 | 3.7419E-01 | 1.0785E-01 | 3.8181E-02 | 1.2762E-02 |
| 1.111E-01 | 2.4918E-05 | 2.5420E-01 | 4.1178E-01 | 3.9862E-01 | 1.2037E-01 | 4.3373E-02 | 1.4549E-02 |
| 2.237E-01 | 2.2111E-05 | 2.0828E-01 | 4.2354E-01 | 4.6183E-01 | 1.6892E-01 | 6.3757E-02 | 2.2314E-02 |
| 4.508E-01 | 1.6976E-05 | 1.5339E-01 | 3.7721E-01 | 5.1427E-01 | 2.4616E-01 | 1.1162E-01 | 4.4050E-02 |
| 6.400E-01 | 1.4523E-05 | 1.2519E-01 | 3.2922E-01 | 5.3613E-01 | 3.0022E-01 | 1.5210E-01 | 6.5754E-02 |
| 9.072E-01 | 1.3102E-05 | 9.9107E-02 | 2.9027E-01 | 5.3596E-01 | 3.6847E-01 | 2.0444E-01 | 9.5883E-02 |
| 1 | 1.2860E-05 | 9.1233E-02 | 2.7868E-01 | 5.2854E-01 | 3.8723E-01 | 2.2166E-01 | 1.0923E-01 |
| 1.872 | 1.3365E-05 | 5.4462E-02 | 1.8733E-01 | 4.7967E-01 | 4.7862E-01 | 3.3273E-01 | 2.1146E-01 |
| 3 | 1.4072E-05 | 3.3139E-02 | 1.3005E-01 | 3.8090E-01 | 4.8891E-01 | 4.0582E-01 | 3.0649E-01 |
| 3.679 | 1.3638E-05 | 2.6408E-02 | 1.0737E-01 | 3.2559E-01 | 4.1695E-01 | 3.5868E-01 | 2.8083E-01 |
| 5 | 1.2071E-05 | 1.9455E-02 | 8.2569E-02 | 2.7752E-01 | 4.3772E-01 | 4.1257E-01 | 3.5199E-01 |
| 7.408 | 9.4803E-06 | 1.1473E-02 | 5.3368E-02 | 2.0412E-01 | 3.6368E-01 | 3.6881E-01 | 3.3820E-01 |
| 8 | 8.9641E-06 | 1.0282E-02 | 4.8190E-02 | 1.8426E-01 | 3.3409E-01 | 3.4531E-01 | 3.2317E-01 |
| 10 | 8.2946E-06 | 7.2257E-03 | 3.4454E-02 | 1.5317E-01 | 2.8704E-01 | 3.1955E-01 | 3.1831E-01 |
| 12 | 8.4539E-06 | 6.7928E-03 | 3.1902E-02 | 1.3150E-01 | 2.5446E-01 | 2.8539E-01 | 2.9355E-01 |
| 14.92 | 8.9524E-06 | 5.6539E-03 | 2.6284E-02 | 1.0741E-01 | 2.2500E-01 | 2.5996E-01 | 2.6796E-01 |
| 16 | 9.2161E-06 | 5.0673E-03 | 2.4719E-02 | 9.8521E-02 | 2.1168E-01 | 2.4829E-01 | 2.5991E-01 |
| 17 | 9.3393E-06 | 4.7128E-03 | 2.2884E-02 | 9.3523E-02 | 1.9965E-01 | 2.3713E-01 | 2.4860E-01 |
| 18 | 9.3875E-06 | 4.5322E-03 | 2.2243E-02 | 9.2236E-02 | 1.9421E-01 | 2.2389E-01 | 2.3501E-01 |
| 20 | 9.3459E-06 | 9.1864E-03 | 3.4192E-02 | 1.1154E-01 | 1.9933E-01 | 2.3110E-01 | 2.3627E-01 |

Incertidumbres $\leq 2\%$

4.3 Detector activo

Los cálculos que se muestran a continuación se obtuvieron mediante métodos Monte Carlo, versión 5. Se calcularon diversos parámetros utilizando un detector activo de ^3He , se emplearon 60 fuentes monoenergéticas de neutrones variando su energía de $1\text{E-}09$ MeV a 20 MeV, modelando los moderadores anidados de (SECB) de 0, 2", 3", 5", 8", 10" y 12" de arista.

En la Figura 54 se presenta la fluencia y comportamiento de los neutrones sobre el detector activo de ^3He , para cada combinación de espesor de moderación del SECB y energía de los neutrones monoenergéticos

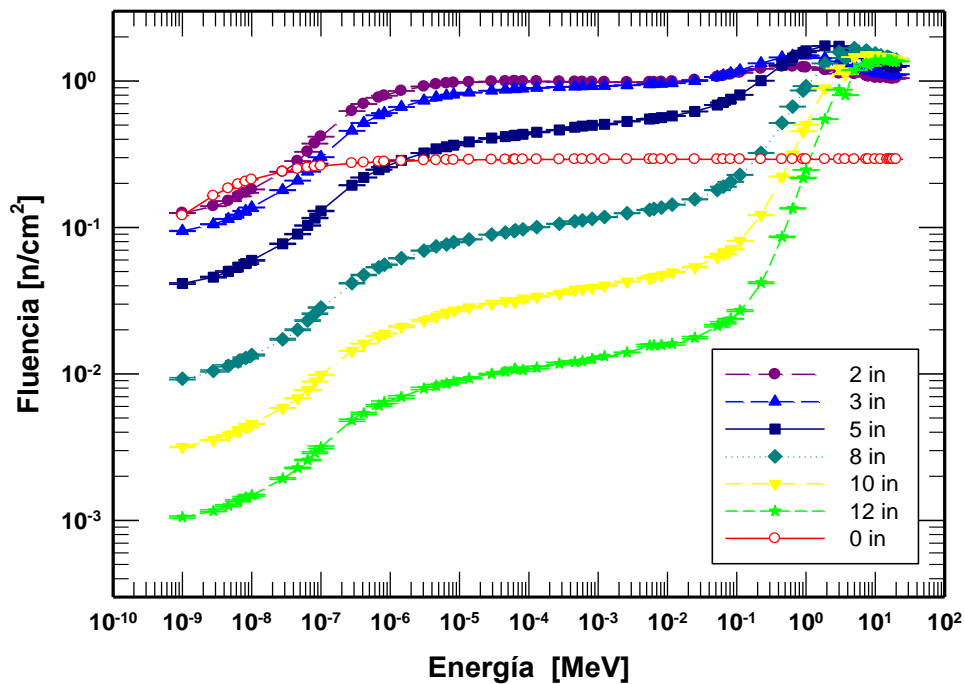


Figura 54. Fluencia de neutrones en el detector ^3He con los diferentes espesores de moderación.

En la Figura 55 se muestran las reacciones (n,gamma) que se generan en el gas del detector activo de ^3He , cuando el neutrón interactúa con los átomos.

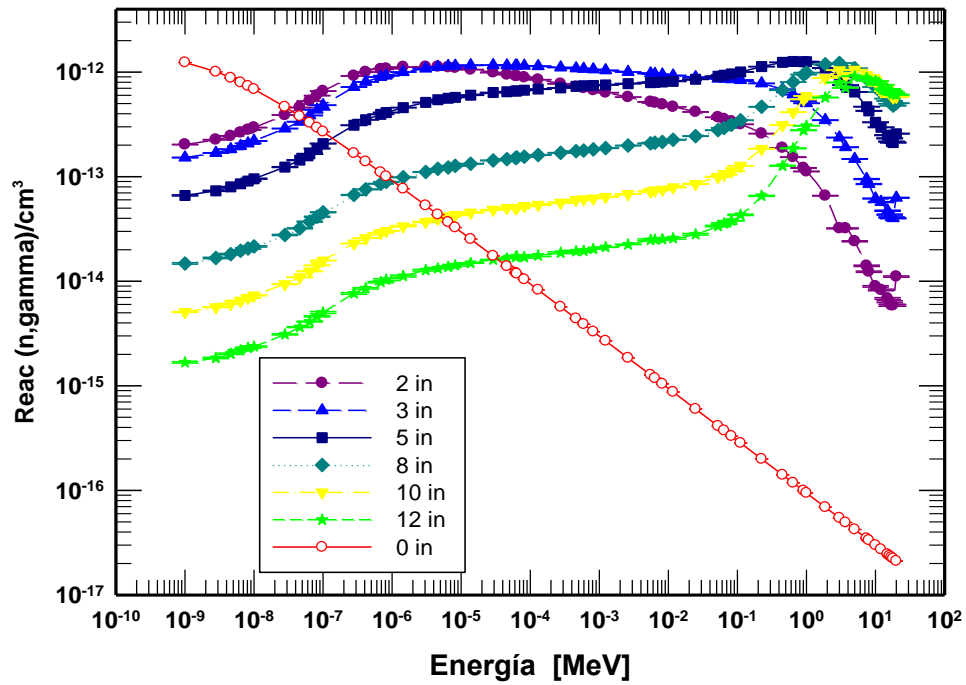


Figura 55. Reacciones (n,gamma) por unidad de volumen en el detector ^3He por la interacción de los neutrones con los diferentes espesores de moderación.

En la Figura 56 se muestran las reacciones (n,p) que se generan en el gas del detector activo de ^3He , cuando el neutrón interactúa con los átomos.

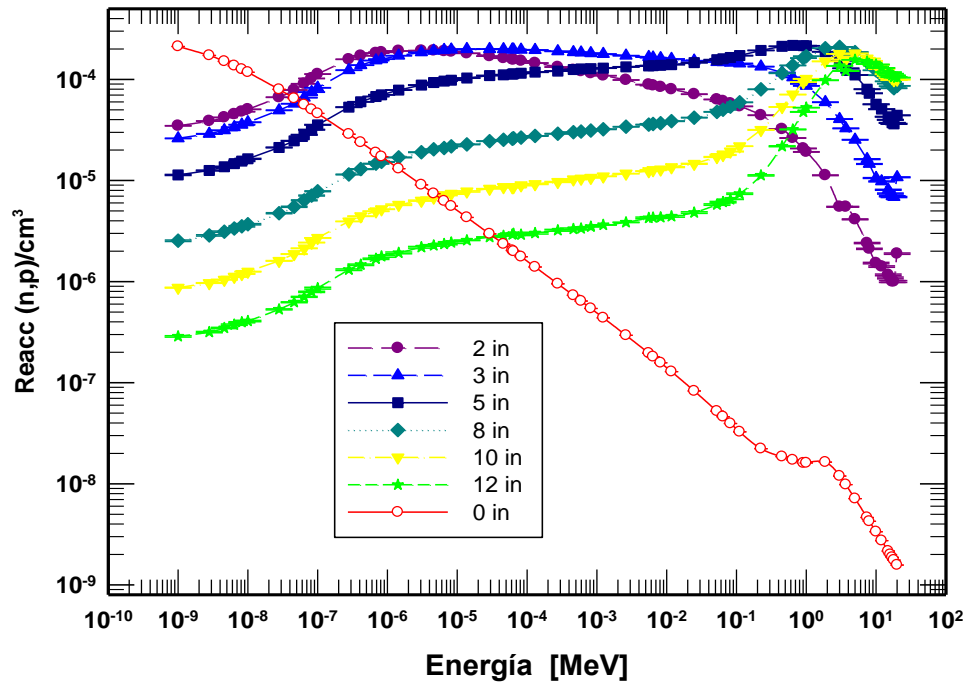


Figura 56. Reacciones (n,p) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ^3He con los diferentes espesores de moderación.

En la Figura 57 se muestran las reacciones (n,d) que se generan en el gas del detector activo de ^3He , cuando el neutrón interactúa con los átomos.

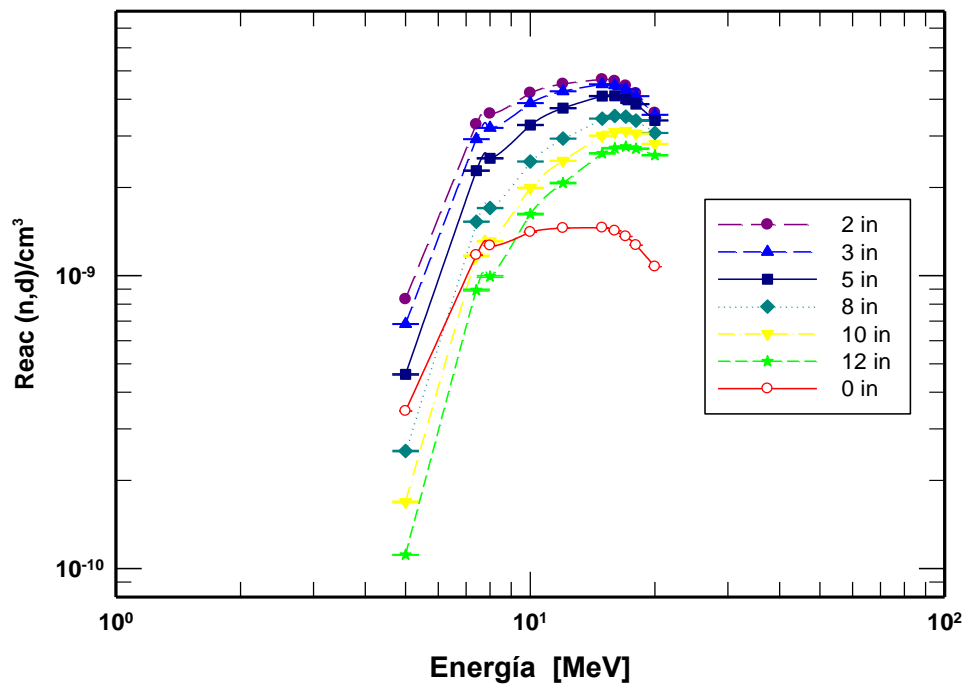


Figura 57. Reacciones (n,d) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ^3He con los diferentes espesores de moderación.

En la Figura 58 se muestran las reacciones (n,t) que se generan en el gas del detector activo de ^3He , cuando el neutrón interactiona con los átomos.

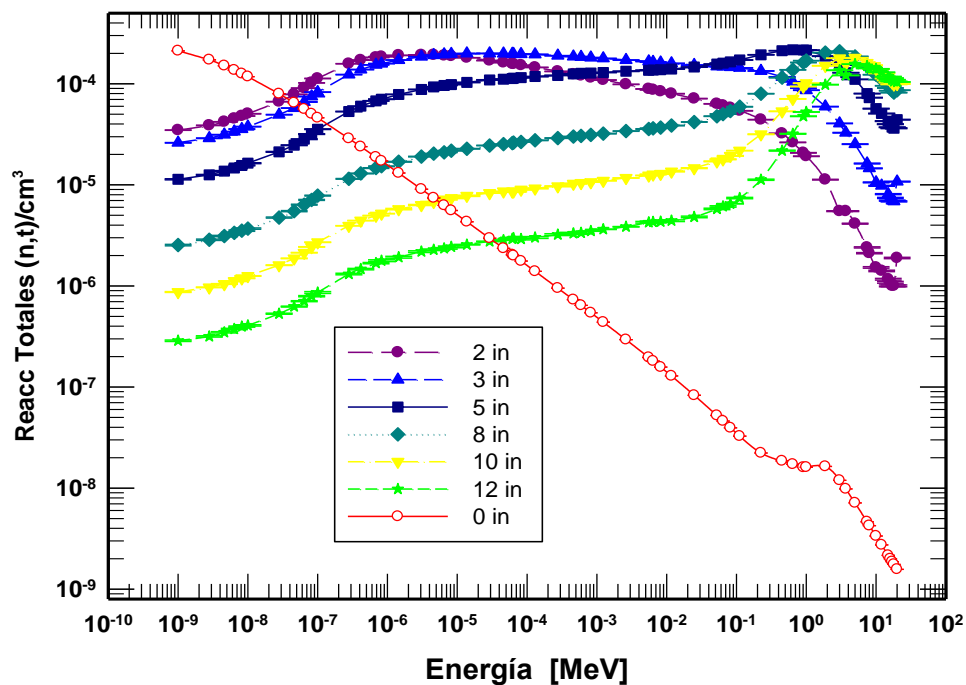


Figura 58. Reacciones (n,t) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ^3He con los diferentes espesores de moderación.

En la Figura 59 se muestran las reacciones (n,α) que se generan en el gas del detector activo de ^3He , cuando el neutrón interactiona con los átomos.

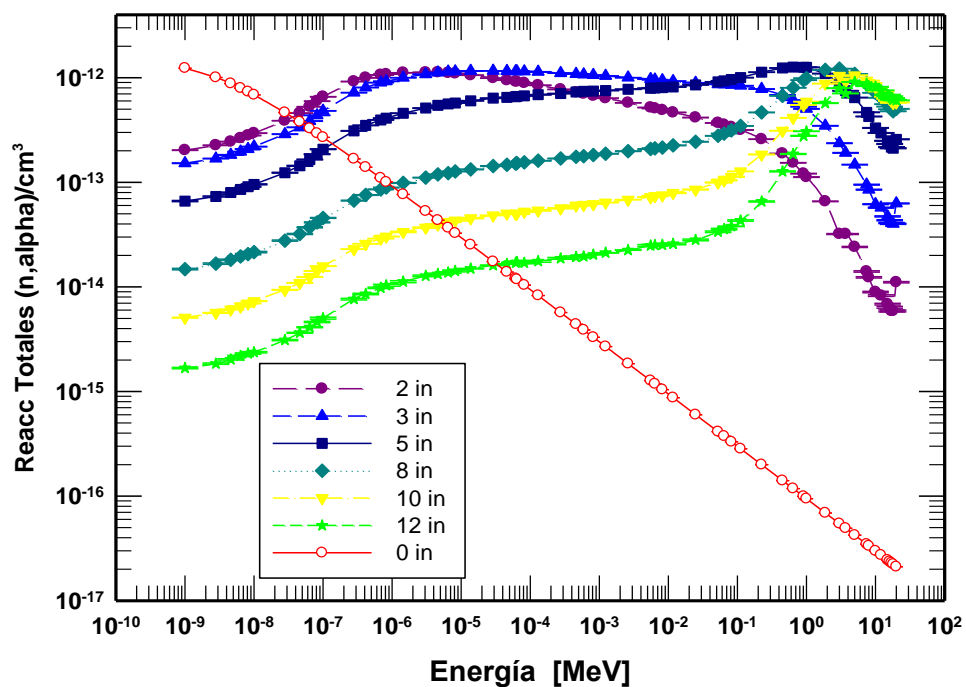


Figura 59. Reacciones (n,α) por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ^3He con los diferentes espesores de moderación.

A continuación en la gráfica 60 se muestran el comportamiento de la suma de todas las reacciones presentes en el detector activo de ^3He al interaccionar los neutrones con los átomos del gas para cada combinación de energía- moderador.

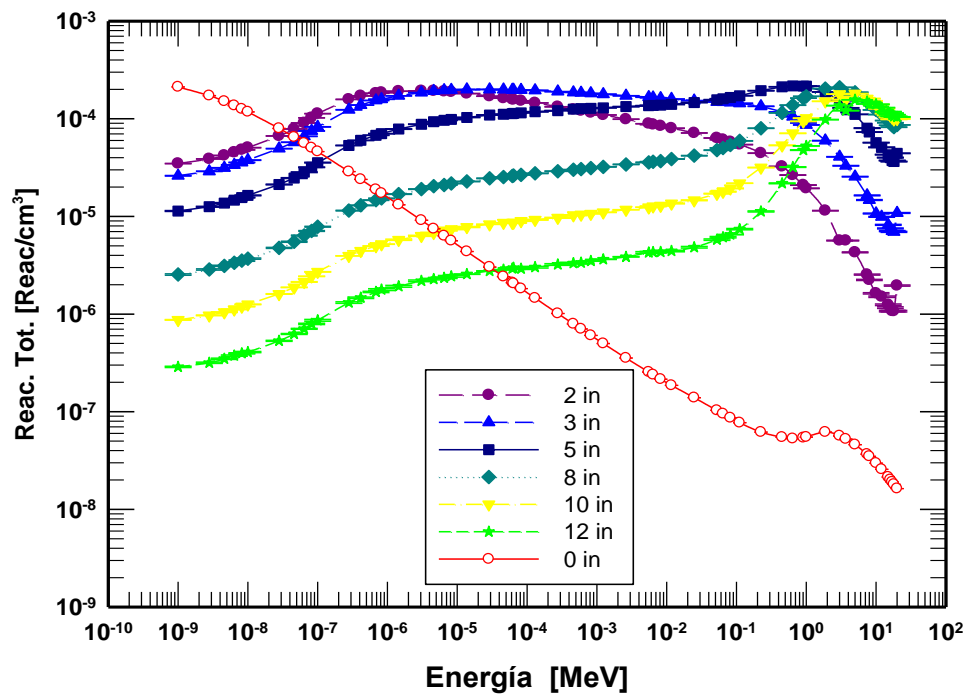


Figura 60. Reacciones totales por unidad de volumen generadas por los neutrones en el detector ^3He con los diferentes espesores de moderación.

La matriz respuesta del SECB con detector de activo ^3He (SECB activo), se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Función respuesta cm^2 para cada cubo en función de la energía.

| Energía (MeV) | 0 (in) | 2 (in) | 3 (in) | 5 (in) | 8 (in) | 10 (in) | 12 (in) |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 1.000E-09 | 2.1173E-04 | 3.4795E-05 | 2.6087E-05 | 1.1355E-05 | 2.5386E-06 | 8.7103E-07 | 3.7521E-07 |
| 2.800E-09 | 1.7250E-04 | 3.8725E-05 | 2.8926E-05 | 1.2565E-05 | 2.8637E-06 | 9.6884E-07 | 3.9617E-07 |
| 4.600E-09 | 1.5093E-04 | 4.2025E-05 | 3.1385E-05 | 1.3686E-05 | 3.1178E-06 | 1.0453E-06 | 4.0741E-07 |
| 6.400E-09 | 1.3652E-04 | 4.5288E-05 | 3.3657E-05 | 1.4672E-05 | 3.3508E-06 | 1.1154E-06 | 5.3209E-07 |
| 8.200E-09 | 1.2593E-04 | 4.8044E-05 | 3.5654E-05 | 1.5584E-05 | 3.5256E-06 | 1.1921E-06 | 6.2512E-07 |
| 1.000E-08 | 1.1765E-04 | 5.0580E-05 | 3.7672E-05 | 1.6396E-05 | 3.6939E-06 | 1.2554E-06 | 7.0605E-07 |
| 2.800E-08 | 7.9628E-05 | 6.6616E-05 | 4.9463E-05 | 2.1206E-05 | 4.7539E-06 | 1.6063E-06 | 7.9262E-07 |
| 4.600E-08 | 6.4795E-05 | 7.8527E-05 | 5.7489E-05 | 2.4681E-05 | 5.4994E-06 | 1.8743E-06 | 8.6196E-07 |
| 6.400E-08 | 5.6208E-05 | 9.0474E-05 | 6.6092E-05 | 2.8335E-05 | 6.3711E-06 | 2.1328E-06 | 1.3107E-06 |
| 8.200E-08 | 5.0406E-05 | 1.0224E-04 | 7.4912E-05 | 3.1833E-05 | 7.0988E-06 | 2.4343E-06 | 1.4686E-06 |
| 1.000E-07 | 4.6129E-05 | 1.1285E-04 | 8.2661E-05 | 3.5552E-05 | 7.8344E-06 | 2.7067E-06 | 1.6820E-06 |
| 2.800E-07 | 2.8728E-05 | 1.5789E-04 | 1.2353E-04 | 5.3198E-05 | 1.1476E-05 | 3.9401E-06 | 1.7776E-06 |
| 4.14E-07 | 2.3890E-05 | 1.7132E-04 | 1.3819E-04 | 6.0050E-05 | 1.2976E-05 | 4.4354E-06 | 1.9255E-06 |
| 6.826E-07 | 1.8823E-05 | 1.8223E-04 | 1.5389E-04 | 6.7735E-05 | 1.4673E-05 | 4.9695E-06 | 2.1875E-06 |
| 8.200E-07 | 1.7233E-05 | 1.8531E-04 | 1.5844E-04 | 7.0366E-05 | 1.5285E-05 | 5.1972E-06 | 2.2786E-06 |
| 1.445E-06 | 1.3102E-05 | 1.9121E-04 | 1.7169E-04 | 7.8472E-05 | 1.6921E-05 | 5.7624E-06 | 2.3529E-06 |
| 3.059E-06 | 9.0701E-06 | 1.9268E-04 | 1.8510E-04 | 8.7892E-05 | 1.9034E-05 | 6.3267E-06 | 2.4367E-06 |
| 4.600E-06 | 7.4187E-06 | 1.9299E-04 | 1.9216E-04 | 9.3334E-05 | 2.0398E-05 | 6.7783E-06 | 2.5630E-06 |
| 6.476E-06 | 6.2694E-06 | 1.9022E-04 | 1.9554E-04 | 9.6341E-05 | 2.0992E-05 | 7.1728E-06 | 2.7595E-06 |
| 8.200E-06 | 5.5747E-06 | 1.8799E-04 | 1.9715E-04 | 9.8351E-05 | 2.1760E-05 | 7.4075E-06 | 2.8402E-06 |
| 1.371E-05 | 4.3165E-06 | 1.8109E-04 | 1.9929E-04 | 1.0318E-04 | 2.2791E-05 | 7.7970E-06 | 2.9241E-06 |
| 2.902E-05 | 2.9660E-06 | 1.6976E-04 | 1.9948E-04 | 1.0925E-04 | 2.4523E-05 | 8.2936E-06 | 2.9730E-06 |

| | | | | | | | |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 4.600E-05 | 2.3542E-06 | 1.6221E-04 | 1.9854E-04 | 1.1122E-04 | 2.5265E-05 | 8.6153E-06 | 2.9138E-06 |
| 6.144E-05 | 2.0355E-06 | 1.5766E-04 | 1.9760E-04 | 1.1286E-04 | 2.5887E-05 | 8.6050E-06 | 3.0187E-06 |
| 6.400E-05 | 1.9951E-06 | 1.5690E-04 | 1.9726E-04 | 1.1361E-04 | 2.6194E-05 | 8.6226E-06 | 3.2169E-06 |
| 8.200E-05 | 1.7609E-06 | 1.5262E-04 | 1.9668E-04 | 1.1497E-04 | 2.6614E-05 | 8.9877E-06 | 3.3182E-06 |
| 1.301E-04 | 1.3955E-06 | 1.4506E-04 | 1.9519E-04 | 1.1799E-04 | 2.7586E-05 | 9.2342E-06 | 3.3562E-06 |
| 2.754E-04 | 9.5189E-07 | 1.3256E-04 | 1.8970E-04 | 1.2103E-04 | 2.9008E-05 | 9.6852E-06 | 3.4897E-06 |
| 4.600E-04 | 7.3193E-07 | 1.2422E-04 | 1.8604E-04 | 1.2535E-04 | 3.0067E-05 | 1.0290E-05 | 3.6361E-06 |
| 5.929E-04 | 6.4226E-07 | 1.2051E-04 | 1.8416E-04 | 1.2700E-04 | 3.0522E-05 | 1.0446E-05 | 3.8538E-06 |
| 8.200E-04 | 5.4286E-07 | 1.1517E-04 | 1.8175E-04 | 1.2783E-04 | 3.1252E-05 | 1.0639E-05 | 4.2685E-06 |
| 1.234E-03 | 4.3853E-07 | 1.0908E-04 | 1.7817E-04 | 1.2940E-04 | 3.2154E-05 | 1.0999E-05 | 4.3005E-06 |
| 2.613E-03 | 2.9466E-07 | 9.8686E-05 | 1.7177E-04 | 1.3308E-04 | 3.4065E-05 | 1.1714E-05 | 4.3228E-06 |
| 5.531E-03 | 1.9605E-07 | 8.8899E-05 | 1.6613E-04 | 1.3600E-04 | 3.5721E-05 | 1.2394E-05 | 4.4222E-06 |
| 6.400E-03 | 1.8087E-07 | 8.7112E-05 | 1.6448E-04 | 1.3689E-04 | 3.6279E-05 | 1.2688E-05 | 4.8240E-06 |
| 8.200E-03 | 1.5750E-07 | 8.4107E-05 | 1.6215E-04 | 1.3782E-04 | 3.6868E-05 | 1.2871E-05 | 5.7820E-06 |
| 1.171E-02 | 1.2870E-07 | 7.9758E-05 | 1.5900E-04 | 1.4008E-04 | 3.8653E-05 | 1.3571E-05 | 6.1231E-06 |
| 2.479E-02 | 8.2873E-08 | 7.1372E-05 | 1.5331E-04 | 1.4649E-04 | 4.1881E-05 | 1.4628E-05 | 6.5107E-06 |
| 5.247E-02 | 5.2265E-08 | 6.3296E-05 | 1.4851E-04 | 1.5666E-04 | 4.7741E-05 | 1.7086E-05 | 7.4064E-06 |
| 6.400E-02 | 4.6146E-08 | 6.0904E-05 | 1.4794E-04 | 1.6012E-04 | 5.0156E-05 | 1.7906E-05 | 1.1241E-05 |
| 8.200E-02 | 3.9453E-08 | 5.7825E-05 | 1.4619E-04 | 1.6499E-04 | 5.3849E-05 | 1.9365E-05 | 2.1814E-05 |
| 1.111E-01 | 3.2627E-08 | 5.4152E-05 | 1.4378E-04 | 1.7199E-04 | 5.9357E-05 | 2.1831E-05 | 3.1994E-05 |
| 2.237E-01 | 2.2265E-08 | 4.4246E-05 | 1.3379E-04 | 1.9364E-04 | 7.9872E-05 | 3.1670E-05 | 4.7722E-05 |
| 4.508E-01 | 1.8554E-08 | 3.2279E-05 | 1.1721E-04 | 2.1246E-04 | 1.1499E-04 | 5.3417E-05 | 5.2639E-05 |
| 6.400E-01 | 1.7201E-08 | 2.6320E-05 | 1.0467E-04 | 2.1677E-04 | 1.3765E-04 | 7.0917E-05 | 9.8001E-05 |
| 9.072E-01 | 1.6070E-08 | 2.0744E-05 | 9.0594E-05 | 2.1558E-04 | 1.6244E-04 | 9.4001E-05 | 1.3620E-04 |
| 1 | 1.6073E-08 | 1.9206E-05 | 8.6352E-05 | 2.1526E-04 | 1.6951E-04 | 1.0136E-04 | 1.2114E-04 |
| 1.872 | 1.6391E-08 | 1.1273E-05 | 5.9508E-05 | 1.8782E-04 | 2.0361E-04 | 1.5075E-04 | 1.5633E-04 |
| 3 | 1.1937E-08 | 5.4904E-06 | 4.0557E-05 | 1.5319E-04 | 2.0952E-04 | 1.7882E-04 | 1.4994E-04 |
| 3.679 | 9.8062E-09 | 5.4904E-06 | 3.2843E-05 | 1.2881E-04 | 1.8193E-04 | 1.5743E-04 | 1.4236E-04 |

| | | | | | | | |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 5 | 7.1319E-09 | 4.1309E-06 | 2.5314E-05 | 1.1070E-04 | 1.8642E-04 | 1.8076E-04 | 1.4054E-04 |
| 7.408 | 4.6435E-09 | 2.4042E-06 | 1.6262E-05 | 8.0020E-05 | 1.5275E-04 | 1.6088E-04 | 1.2972E-04 |
| 8 | 4.2564E-09 | 2.1105E-06 | 1.4578E-05 | 7.2949E-05 | 1.4267E-04 | 1.5272E-04 | 1.1806E-04 |
| 10 | 3.3550E-09 | 1.5245E-06 | 1.0581E-05 | 5.6784E-05 | 1.2304E-04 | 1.3987E-04 | 1.1401E-04 |
| 12 | 2.7415E-09 | 1.4101E-06 | 9.7960E-06 | 5.0841E-05 | 1.1020E-04 | 1.2662E-04 | 1.0972E-04 |
| 14.92 | 2.1620E-09 | 1.1660E-06 | 8.0911E-06 | 4.2735E-05 | 9.5752E-05 | 1.1289E-04 | 1.0563E-04 |
| 16 | 1.9939E-09 | 1.0884E-06 | 7.4326E-06 | 3.9861E-05 | 9.0875E-05 | 1.0798E-04 | 1.0419E-04 |
| 17 | 1.8712E-09 | 1.0022E-06 | 6.9873E-06 | 3.7192E-05 | 8.5531E-05 | 1.0296E-04 | 3.7521E-07 |
| 18 | 1.7600E-09 | 1.0017E-06 | 6.8681E-06 | 3.6336E-05 | 8.1882E-05 | 9.8599E-05 | 3.9617E-07 |
| 20 | 1.5721E-09 | 1.8918E-06 | 1.0756E-05 | 4.4182E-05 | 8.6433E-05 | 9.9548E-05 | 4.0741E-07 |

Incertidumbres $\leq 2\%$

4.3.1 Fluencia de los neutrones en los detector pasivo, activo y puntual.

En la Figura 61 se realiza la comparativa de las funciones de fluencia obtenidas para el detector puntual, el detector activo y el detector pasivo, al interaccionar los neutrones monoenergéticos en el rango de 1E-09 MeV a 20 MeV a través del moderador de cubico de 2" de arista.

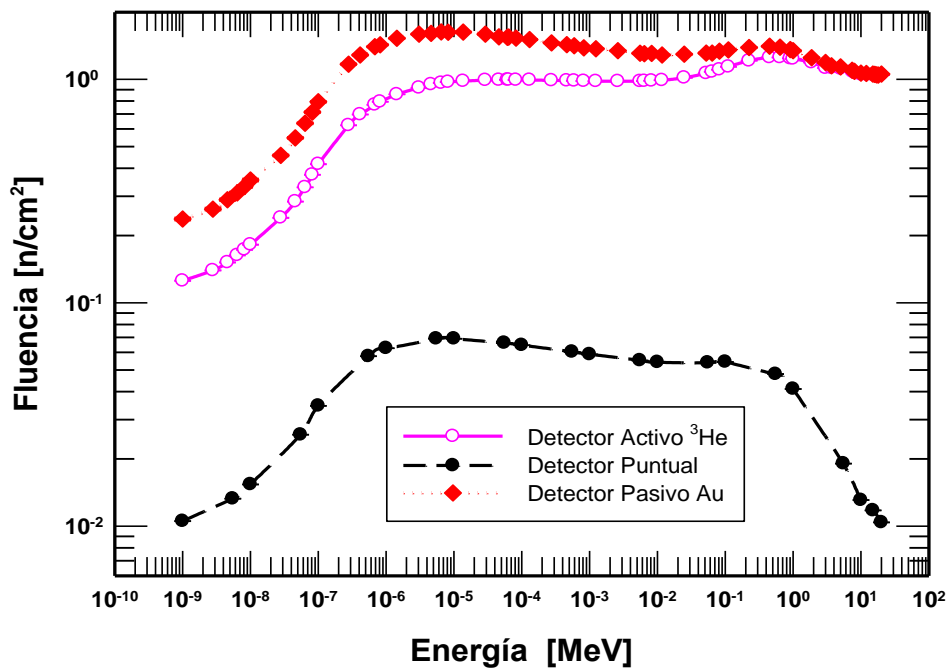


Figura 61. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³He y Au con un moderador de 2".

En la Figura 62 se realiza la comparativa de las funciones de fluencia obtenidas para el detector puntual, el detector activo y el detector pasivo, al interaccionar los neutrones monoenergéticos en el rango de 1E-09 MeV a 20 MeV a través del moderador de cubico de 3" de arista.

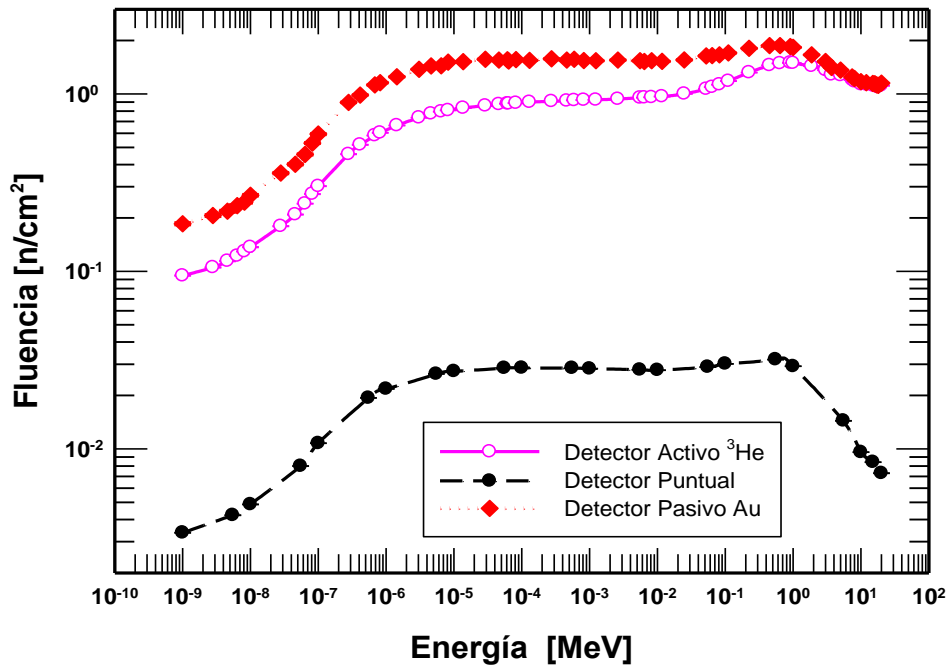


Figura 62. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³He y Au con un moderador de 3".

En la Figura 63 se realiza la comparativa de las funciones de fluencia obtenidas para el detector puntual, el detector activo y el detector pasivo, al interaccionar los neutrones monoenergéticos en el rango de 1E-09 MeV a 20 MeV a través del moderador de cubico de 5" de arista.

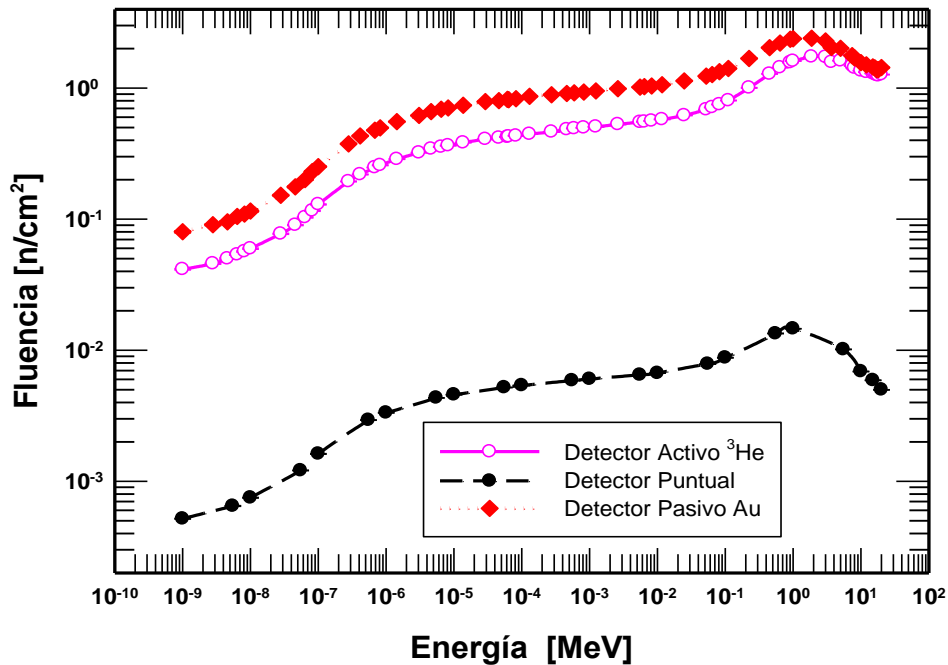


Figura 63. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ³He y Au con un moderador de 5".

En la Figura 64 se realiza la comparativa de las funciones de fluencia obtenidas para el detector puntual, el detector activo y el detector pasivo, al interaccionar los neutrones monoenergéticos en el rango de $1\text{E-}09$ MeV a 20 MeV a través del moderador de cubico de $8''$ de arista.

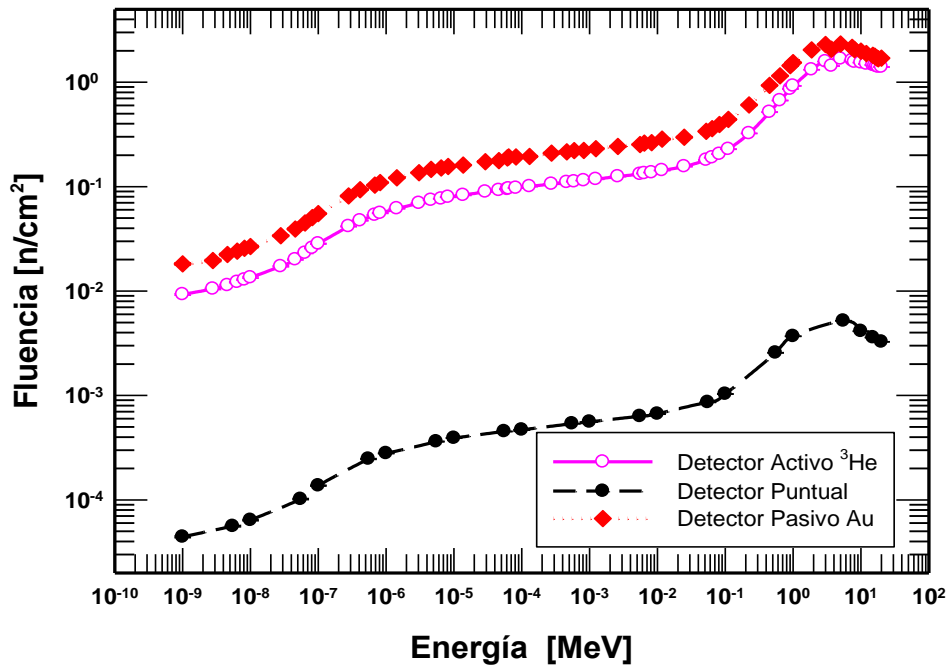


Figura 64. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ^3He y Au con un moderador de $8''$.

En la Figura 65 se realiza la comparativa de las funciones de fluencia obtenidas para el detector puntual, el detector activo y el detector pasivo, al interaccionar los neutrones monoenergéticos en el rango de $1\text{E-}09$ MeV a 20 MeV a través del moderador de cubico de $10''$ de arista.

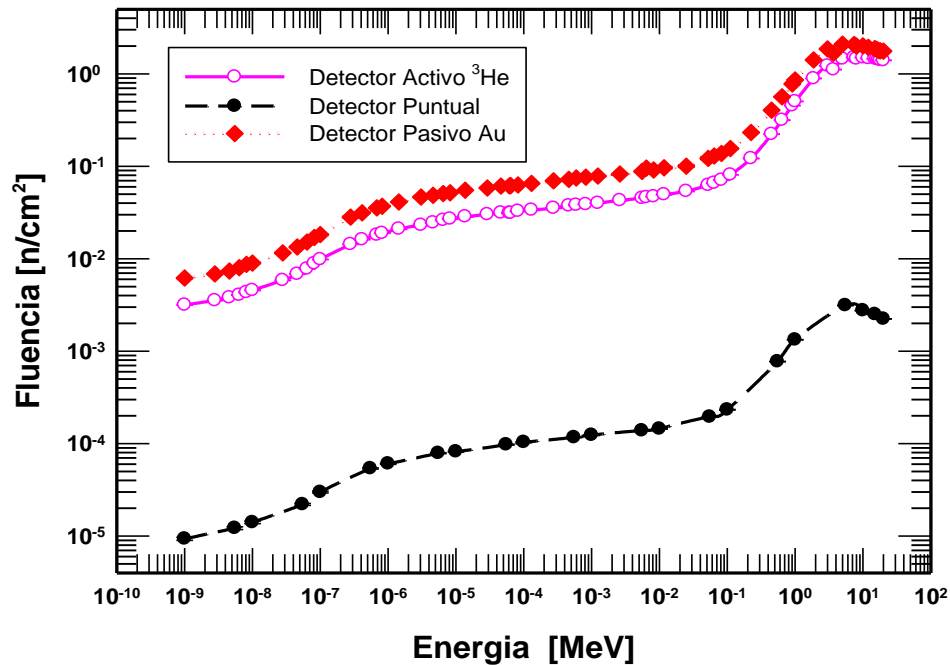


Figura 65. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ^3He y Au con un moderador de $10''$.

En la Figura 66 se realiza la comparativa de las funciones de fluencia obtenidas para el detector puntual, el detector activo y el detector pasivo, al interaccionar los neutrones monoenergéticos en el rango de 1E-09 MeV a 20 MeV a través del moderador de cubico de 12" de arista.

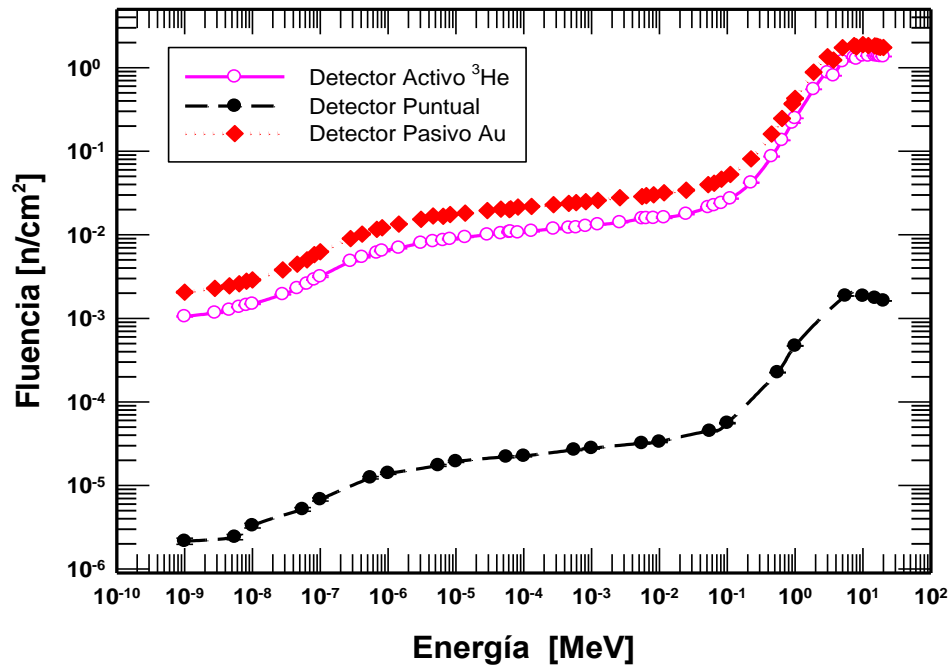


Figura 66. Fluencia de neutrones a través del detector puntual, ^3He y Au con un moderador de 12".

4.4 Monitor de área pasivo

Con la finalidad de presentar una herramienta como monitor pasivo con base al SECB se caracterizaron y obtuvieron las respuestas de fluencia a dosis de los moderadores de 5, 8 y 10 pulgadas de arista para determinar el que tenga la mejor respuesta a obtener la $H^*(10)$. Como se observa en la Figura 79 el moderador cúbico que presenta una mejor respuesta.

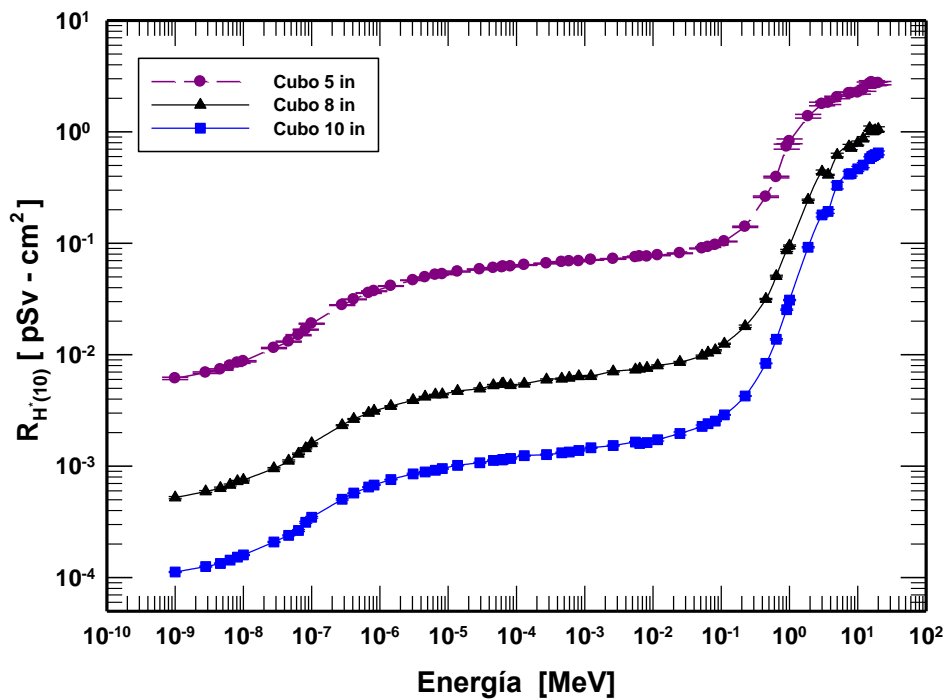


Figura 67. $H^*(10)$ calculada para el SECB de 5 “, 8” y 10”.

5 DISCUSIÓN

5.1 Fluencia de los neutrones

Con la finalidad de observar el comportamiento de los neutrones a través de un punto en particular y determinar la viabilidad del SECB, se calculó la fluencia de los neutrones mediante un detector puntual colocado al centro de cada uno de los moderadores propuestos en el SECB (2", 3", 5", 8", 10" y 12" de arista), al obtener la firma de cada combinación de moderador-detector Figura 13, se visualiza que presentan una forma similar a la reportada en la literatura [Valero-Luna, *et al.*, 2012].

La fluencia de los neutrones a través del detector puntual, del pasivo de laminillas de oro (Au) y del activo de ^3He conservan la forma mencionada como se visualiza en la figura 61 a la 66, con la diferencia que se encuentran desplazadas en magnitud debido a la diferencia de átomos contenida en cada detector y que interactúan con los neutrones, sin embargo la forma de la función de fluencia se conserva siendo la firma del SECB.

5.2 SECB pasivo

La caracterización del SECB pasivo se realizó mediante métodos Monte Carlo C5, se obtuvieron las reacciones presentes en el detector pasivo de laminillas de oro (Au), se utilizaron 60 fuentes monoenergéticas en un rango de 1E-09 MeV a 20 MeV.

Al exponer al detector pasivo de laminillas de oro (Au) a la fluencia de los neutrones se presentan diferencias significativas (Figuras 14, 22, 30, 38, 46) entre la fluencia y las reacciones sobre el detector. Al calcular la fluencia a través del detector cuando la laminilla de oro en su superficie más amplia se coloca en posición perpendicular con respecto al flujo de neutrones (Figura 6) se determina que prácticamente todos los neutrones atraviesan el detector a diferencia del caso en el cual la superficie mayor de la laminilla de oro se encuentra de forma paralela al flujo (Figura 7), probablemente se debe a que cuando la laminilla se coloca de forma perpendicular al flujo (Figura 6) como no existe material moderador, prácticamente la laminilla es casi invisible para los neutrones debido a lo delgado de la laminilla de oro en contraste con la laminilla colocada en forma vertical al flujo (Figura 7), al estar en posición horizontal al flujo el espesor de material detector que tienen que atravesar los neutrones es más amplio por lo que la probabilidad de un mayor número de interacciones con los átomos de la laminilla de oro está presente, por tal motivo tenemos el resultado del flujo como se presenta en la Figura 14, igualmente se observan unos picos considerables en energías de aproximadamente $4E-6$, $5.5E-5$ y $7.5E-4$ MeV lo cual coincide con las energías en las cuales el oro presenta resonancias.

Sin embargo al introducir los diferentes espesores de moderación e irse incrementando, se observa que va volviéndose despreciable la posición del detector de laminillas de oro con respecto a la fuente de irradiación, siempre y cuando se coloque centrado en cada cubo moderador de polietileno.

Al trabajar con el moderador cúbico de 2" de arista del SECB pasivo, se observa en los resultados obtenidos en las Figuras 15, 23, 31, 39 y 47 que se presenta una ligera diferencia según la posición del detector con respecto a la fuente de irradiación para energías bajas de los neutrones entre $1E-09$ MeV y $1E-05$ MeV, esta diferencia aún se observa probablemente porque el espesor de moderación es demasiado pequeño, en

las energías bajas se tiene una mayor fluencia para el detector vertical porque los neutrones detectados son principalmente los que llegan directamente generados en la fuente, para energías entre $1\text{E-}05$ MeV y 1 MeV se hace despreciable la posición del detector, debido a que los neutrones que son detectados en la laminilla de oro son prácticamente los moderados y dispersados por el cubo hacia el detector, para energías de 1 MeV a 20 MeV se vuelve a presentar una diferencia debido a que los neutrones tienen una alta energía y el espesor de moderación es muy pequeño casi invisible a estos neutrones y los que detecta la laminilla de oro son los que llegan al área del detector expuesta al flujo de los neutrones.

Así mismo para el moderador cúbico de 3" de arista del SECB pasivo se visualizan los resultados de los cálculos en las Figuras 16, 24, 32, 40 y 48, el comportamiento de las funciones es semejante al del caso del moderador de 2", se presenta una ligera diferencia según la posición del detector con respecto a la fuente de irradiación para energías bajas de los neutrones, pero esta vez en un rango menor que el de 2" de entre $1\text{E-}09$ MeV y $1\text{E-}07$ MeV, esta diferencia se minimiza probablemente por el incremento en el espesor de moderación a 3", en las energías bajas se da una mayor fluencia para el detector vertical, esta diferencia aún se presenta probablemente porque si bien es cierto se incrementó el espesor de moderación, no fue tan significativo, en energías bajas se presenta una mayor fluencia para el detector vertical porque los neutrones detectados son los moderados y los que llegan directamente de la fuente de irradiación siendo mayor el flujo sobre el detector en posición vertical, para energías entre $1\text{E-}07$ MeV y 8 MeV se hace despreciable la posición del detector, debido a que los neutrones que son detectados en la laminilla de oro son prácticamente los moderados y dispersados por el cubo hacia el detector, para energías de 8 MeV a 20 MeV se vuelve a presentar una diferencia debido a que los neutrones tienen una alta energía y el espesor de moderación es casi invisible a estos neutrones y los que llegan al detector pasivo son los que llegan al área del detector expuesta al flujo de los neutrones más los moderados.

Sin embargo para los espesores de moderación de 5", 8", 10" y 12" en las funciones calculadas (Figuras 16, 17, 18 y 19) se observa que el flujo de los neutrones que logra llegar al detector de laminilla de oro en posición vertical u horizontal prácticamente es el mismo, volviéndose despreciable la posición del detector al centro del moderador, probablemente porque los neutrones que logran interactuar con la laminilla de oro son los moderados y dispersados hacia el detector, por lo tanto las reacciones de absorción, producción de fotones y dispersión elástica producidas en el detector son iguales para cada caso ya sea que el detector se coloque en posición vertical u horizontal,

En las Figuras 67 y 68 se muestra la matriz respuesta del sistema espectrométrico de cubos Bonner con laminilla de oro como detector de neutrones térmicos (SECB/Au) y en la figura 69 se muestra la matriz respuesta de un sistema espectrometrico de esferas Bonner con laminilla de oro (SEEB/Au) [Mohammadi *et al.*, 2014; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2007]. Ambas matrices presentan respuestas que son similares.

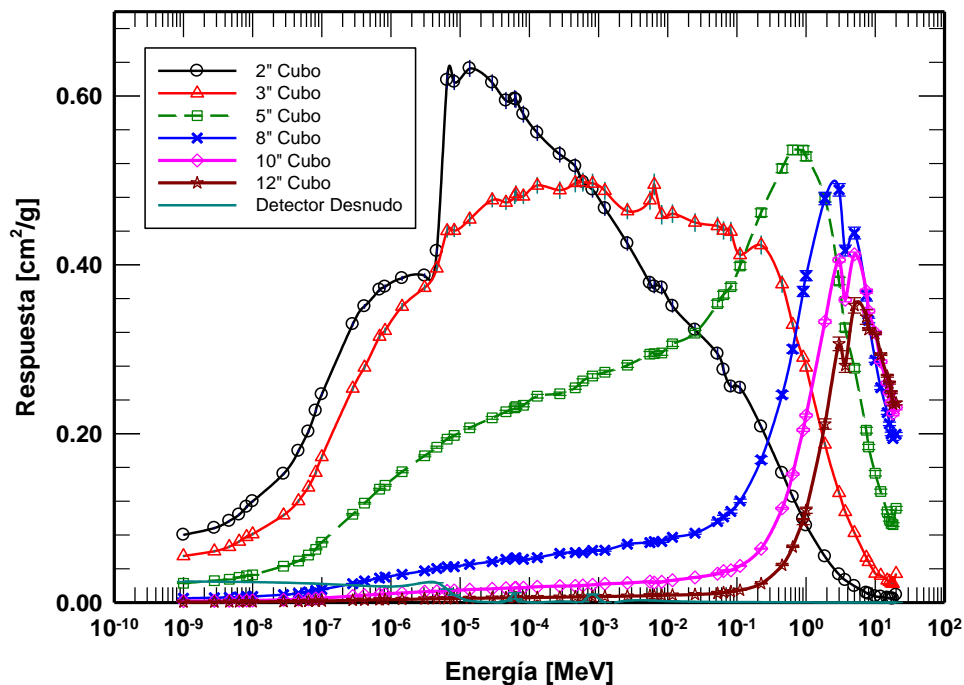


Figura 68. Matriz respuesta para SECB/Au.

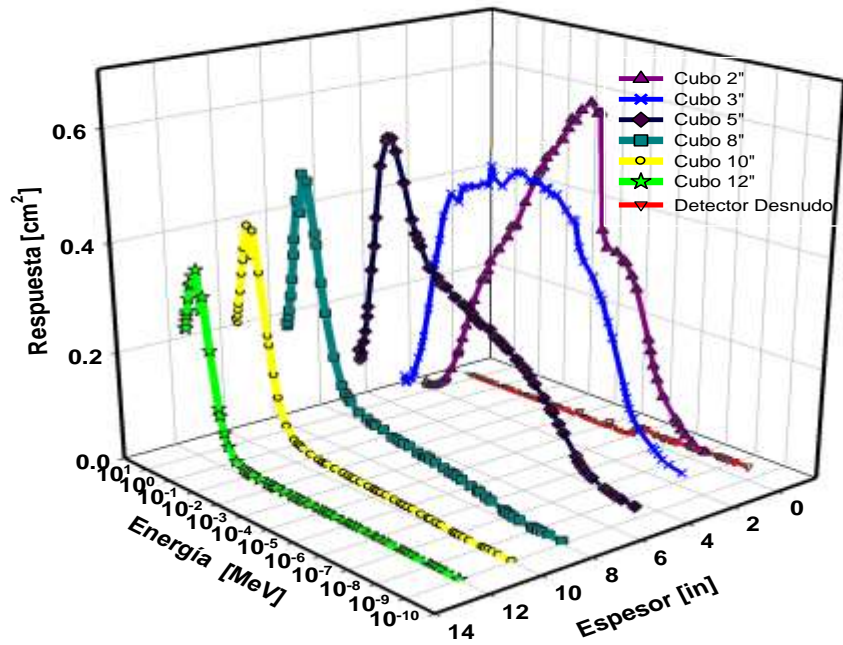


Figura 69. Matriz respuesta para SECB/Au.

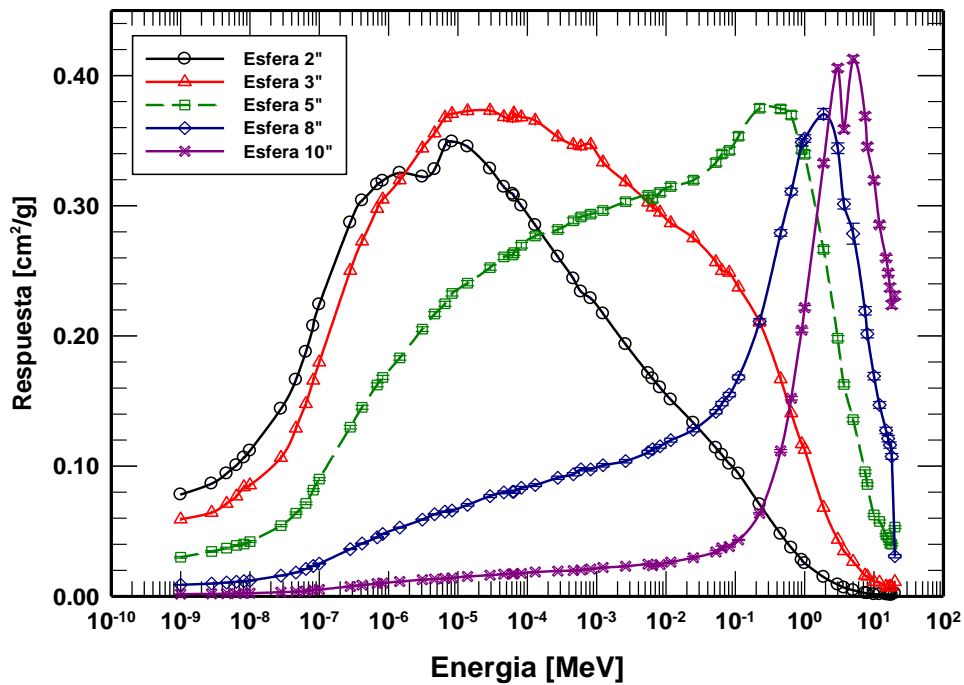


Figura 70. Matriz respuesta para SEEB con laminillas de oro como detector térmico para neutrones.

Para el cubo de 2" de arista y la esfera de 2" de diámetro [Bedogni *et al.*, 2008] la diferencia se presenta en $7.72E-08$ MeV incrementándose en un máximo y un factor de dos con respecto al de la esfera para una energía de $1.32E-05$ el cual muestra una mejor respuesta cubo contra la esfera (Fig. 70).

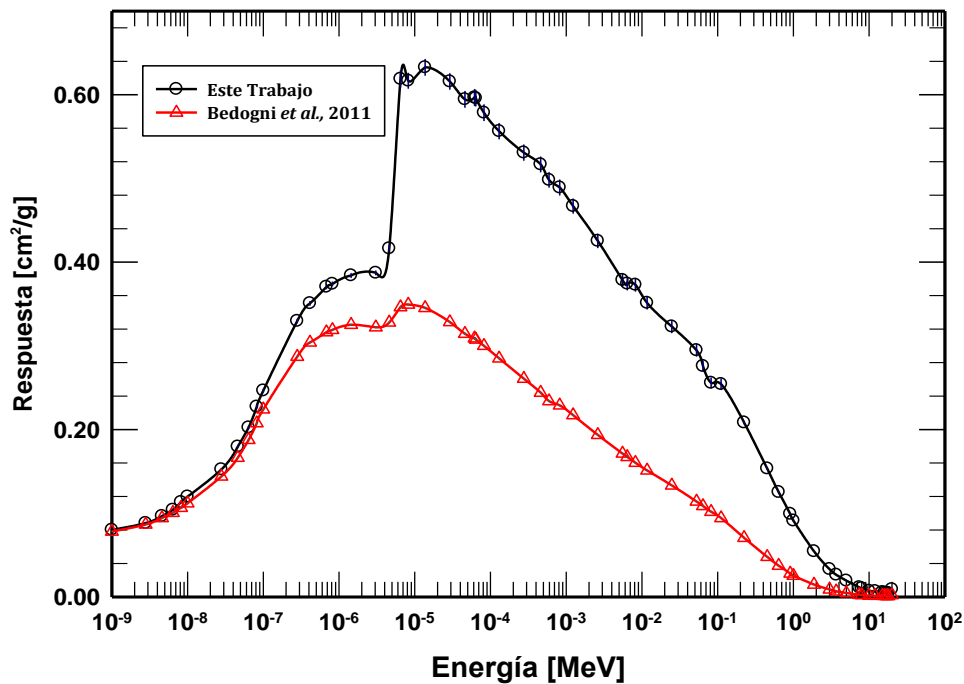


Figura 71. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 2" de arista y las obtenidas por Bedogni *et al.* 2011 con la esfera de 2" de diámetro.

El caso de la esfera y cubo de 3" de diámetro y arista respectivamente [Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2007] la principal diferencia se presenta para una energía de $4E-07$ observando que la respuesta del cubo es mayor por un factor aproximadamente de 1.5 en un rango de energía de $9E-06$ a 0.2 MeV, conservándose con una mejor respuesta hasta 20 MeV (Fig. 71).

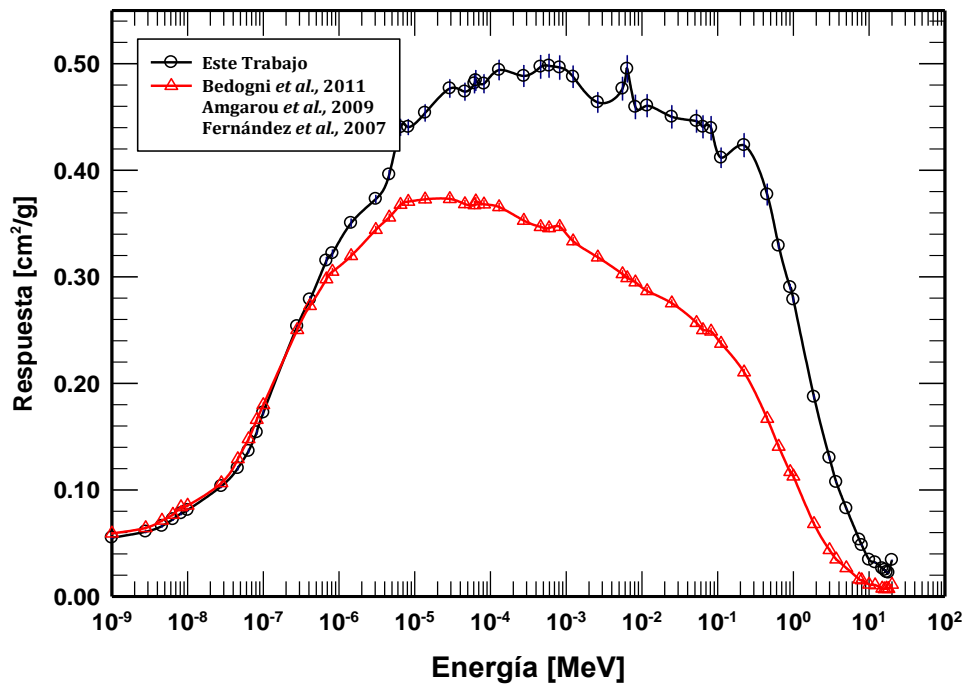


Figura 72. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 3" de arista y las obtenidas por Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009 & Fernández *et al.*, 2007, con la esfera de 3" de diámetro.

Entre el cubo y la esfera de 5" se observa ligeramente una mejor respuesta de la esfera en un factor mínimo de 0.18 aproximadamente en el rango de bajas energías $E-07$ a $3E-3$ MeV hasta converger en un mismo punto ambas respuestas en una energía de 0.024 MeV, después de esta energía el cubo presenta una mejor respuesta que la esfera y un máximo aproximadamente en un factor de 1.5 en el rango de energía de 0.05 a 3 MeV, manteniendo una mejor respuesta el SECB con respecto al SEEB (Fig. 72) [Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2007].

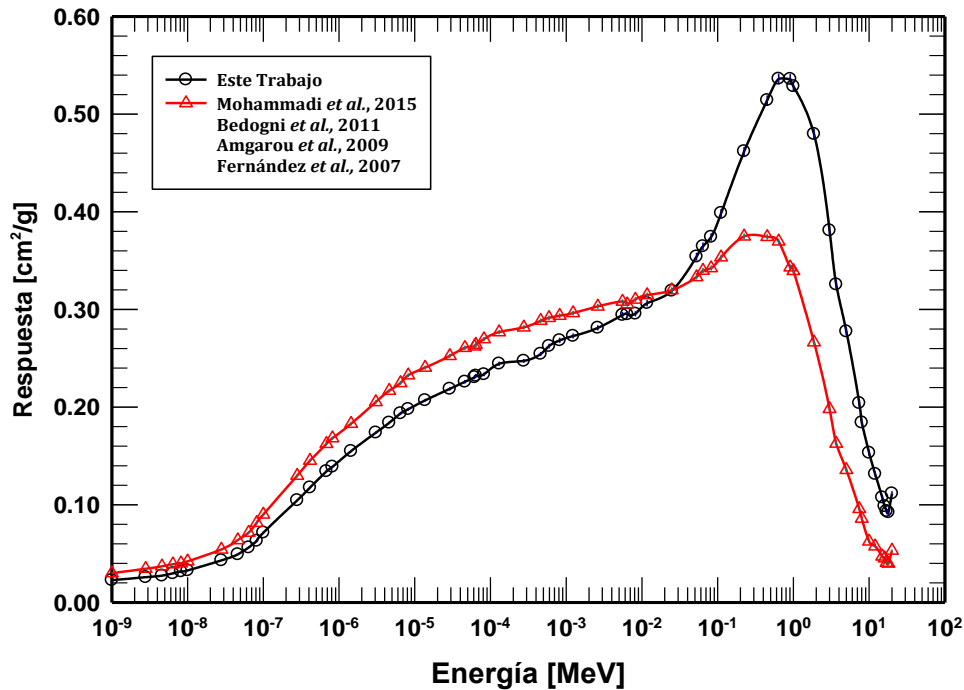


Figura 73. Función respuesta calculada en este trabajo con el cubo de 5'' de arista y las obtenidas por Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009 & Fernández *et al.*, 2007, con la esfera de 5'' de diámetro.

Para el caso de la esfera y el cubo de 8'' se puede visualizar ligeramente una mejor respuesta de la esfera (Fig. 73) [Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2007], en un rango de 1E-07 a 0.3 MeV hasta converger en un mismo punto en una energía 0.6 MeV, después de esta energía el cubo presenta una mejor respuesta y muestra un máximo en un rango de energía de 1 a 9 MeV que la esfera.

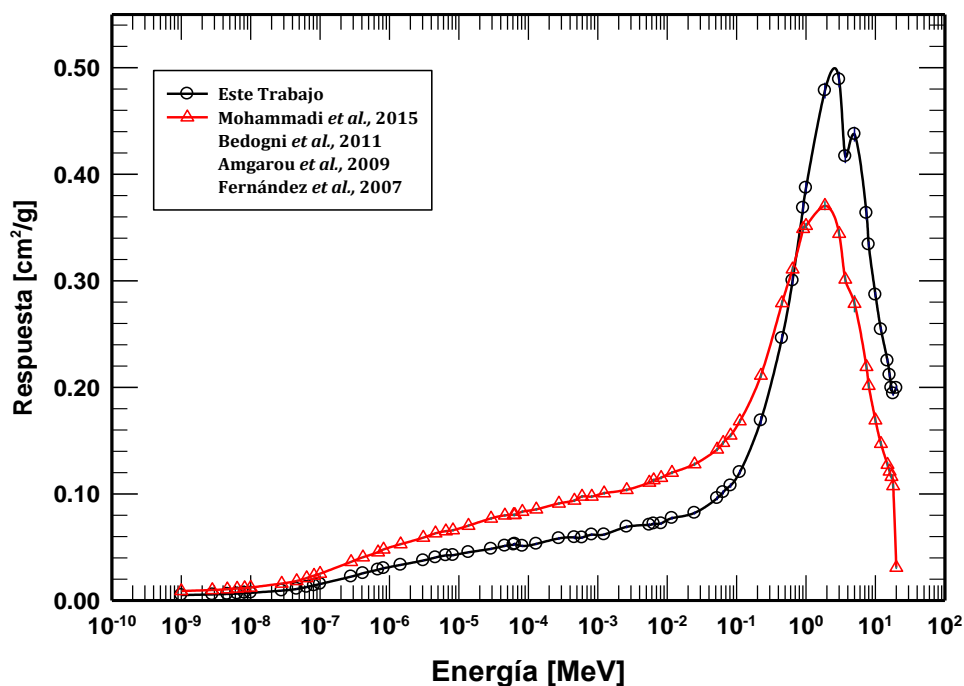


Figura 74. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 8" de arista y las obtenidas por Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009 & Fernández *et al.*, 2007, con la esfera de 8" de diámetro.

Para una moderación de 10" de espesor la esfera nuevamente presenta una muy ligera respuesta en bajas energías en el rango de $8.2E-7$ a 0.1 MeV, convergiendo las respuestas de ambos sistemas en una energía de 0.7 MeV, los neutrones al sobrepasar esta energía, el cubo responde de mejor forma mostrando nuevamente un máximo en un rango de energía de 0.9 a 8 MeV en un factor aproximadamente de 1.7 (Fig.74) [Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2007].

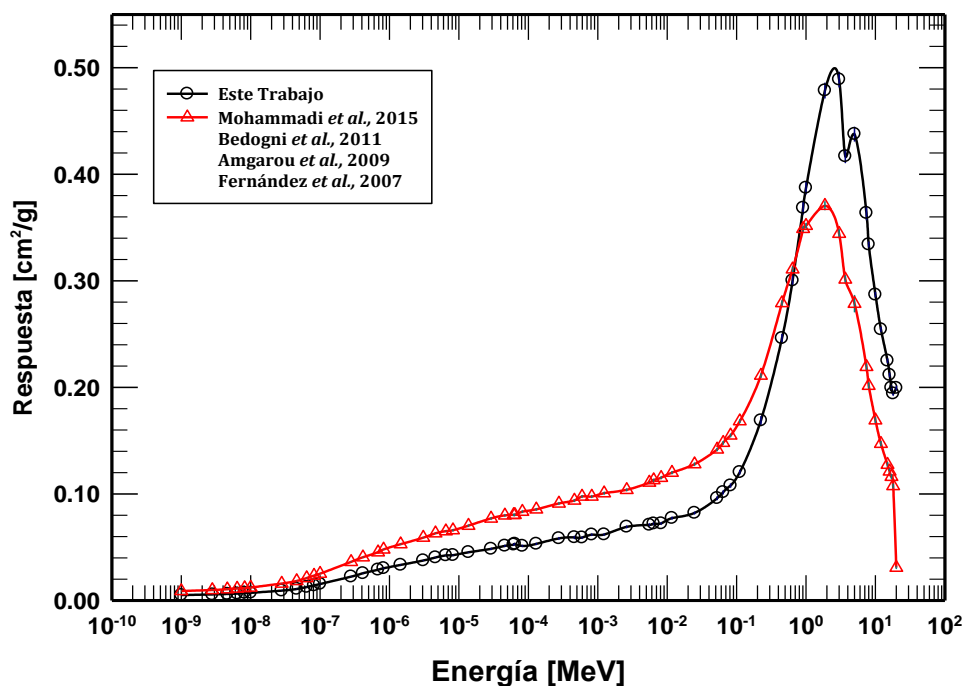


Figura 75. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 10'' de arista y las obtenidas por Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009 & Fernández *et al.*, 2007, con la esfera de 10'' de diámetro.

Finalmente para el SECB en modo pasivo comparando los sistemas de moderación con un espesor de 12'' ambos espectrómetros presentan casi la misma respuesta en un rango de energías de 1E-09 a 2.5 MeV, para neutrones más energéticos del rango antes mencionado el cubo presenta una mejor respuesta en el rango de energías de 2.5 a 20 MeV (Fig. 75) [Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2007].

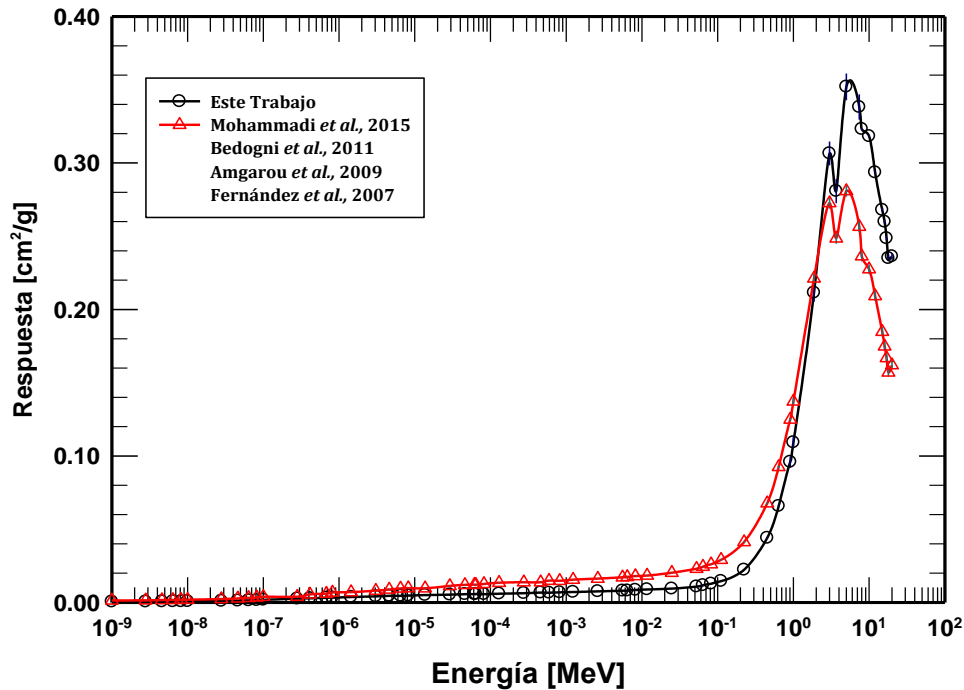


Figura 76. Función respuesta calculada en este trabajo para el cubo de 12" de arista y las obtenidas por Mohammadi *et al.*, 2015; Bedogni *et al.*, 2011; Amgarou *et al.*, 2009 & Fernández *et al.*, 2007, con la esfera de 12" de diámetro.

5.3 SECB activo

Así mismo el SECB activo al igual que en modo pasivo al realizar su caracterización y obtener sus funciones respuesta se comprobó y demostró, que puede operar con detectores activos con una buena eficiencia, al comparar las funciones respuesta con las obtenidas en trabajos de investigación previos, se encuentra una relación con las reportadas por otros autores, con la variante en las respuestas en cuanto a desplazamiento en el eje de la cantidad de reacciones lo cual se debe a la diferencia en las especificaciones del detector empleado, por ejemplo algunos de los autores utilizaron un detector esférico [Aza *et al.*, 2016; Rühm *et al.*, 2014; Vega-Carrillo *et al.*, 2005], otros de ellos un detector tipo capsula similar al que se empleó pero de

diferentes dimensiones con un volumen activo mayor al de la presente investigación [Maglieri *et al.*, 2015; Lee and Sheu 2015; Fernández *et al.*, 2007], por lo tanto los resultados se verán alterados ya que la cantidad de átomos de gas activo de ^3He contenidos en el encapsulado del detector y las condiciones de presión para inyectar el gas en el encapsulado son diferentes, sin embargo la forma de las funciones respuesta que es la firma de moderación se conserva o se asemejan aunque se varíe el detector,

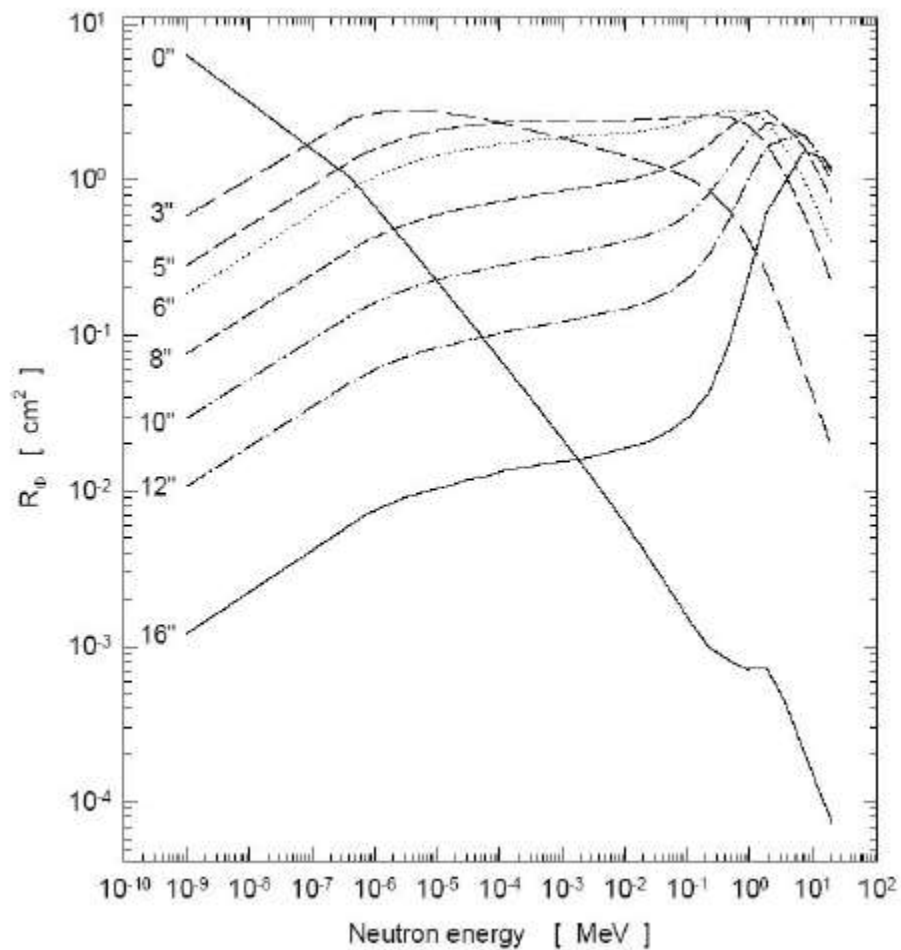


Figura 77. Matriz respuesta para SEEB con un detector de ^3He esférico (Vega-Carrillo *et al.*, 2004).

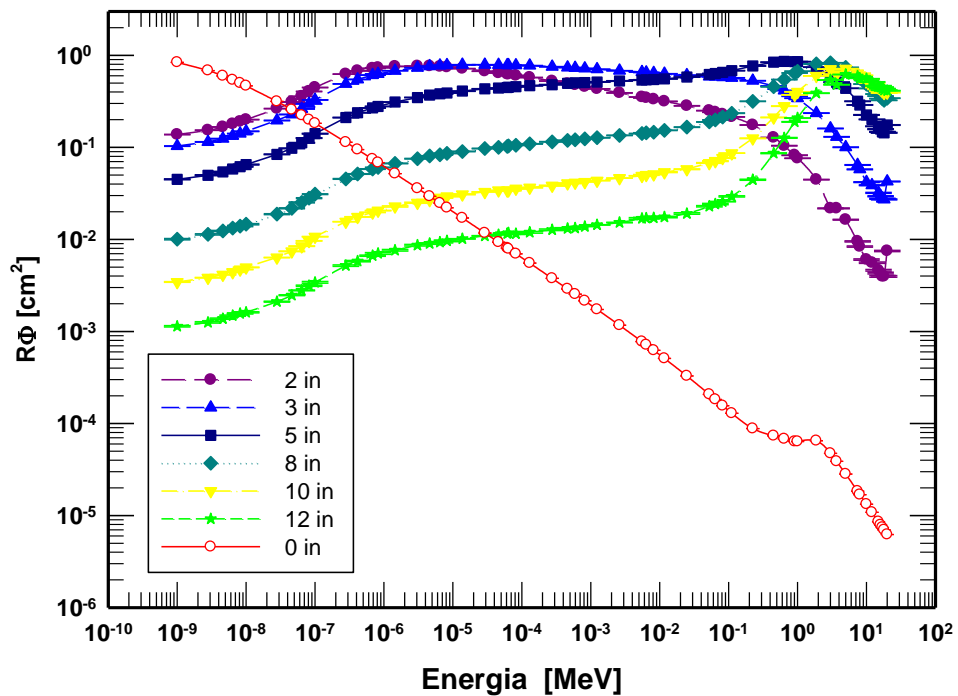


Figura 78. Matriz respuesta para SECB con un detector de ^3He .

Ahora bien como se observa en los resultados obtenidos en la comparativa de la función respuesta del sistema de moderación comercial SEEB [Vega-Carrillo *et al.*, 2004] y el propuesto y diseñado en esta investigación, el SECB presenta una mejor respuesta a lo cual la explicación probable es que se debe a que cada volumen de moderador cúbico tiene 90.98 % más volumen con respecto a la esfera, lo cual le permite tener una mayor capacidad de moderación de los neutrones de diferentes energías, así mismo desde la cara que se vea el moderador se tiene una mayor superficie de interacción de los neutrones con el SECB como se observa en la Figura 78, en donde se visualiza fácilmente que el cubo tiene una ganancia de volumen en los vértices quedando inscrita la esfera.

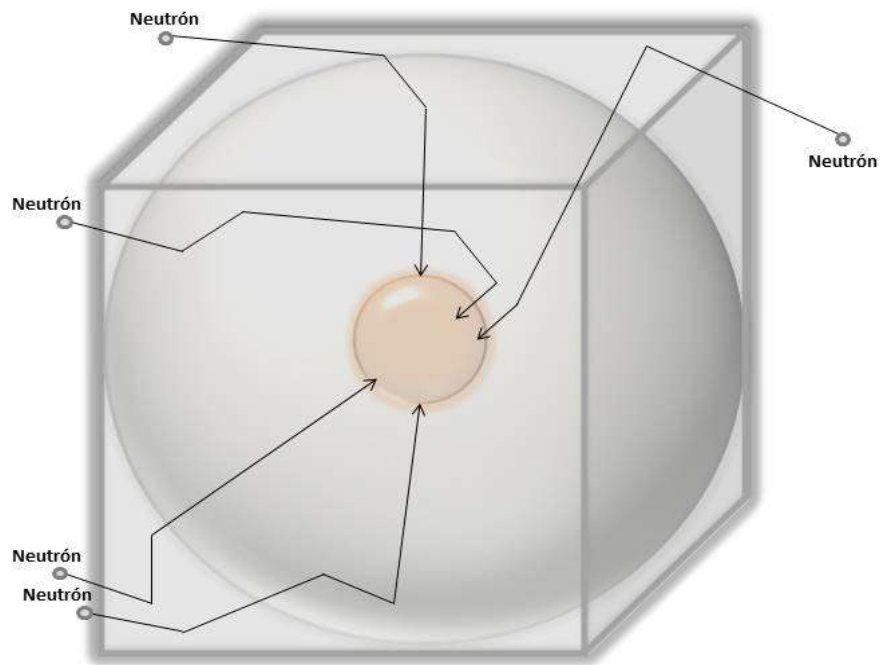


Figura 79. Volúmenes moderadores de la Esfera Vs Cubo.

Al tener un sistema dependiente del incremento de los espesores de moderación como lo es el SECB puesto que un moderador depende de su antecesor, al obtener los espectros de neutrones en ciertos espacios de trabajo como en áreas en las cuales operan LINAC's por encima de 8 MeV, se tiene que realizar cada medición con cada espesor de moderación de una en una, en cambio con el SEEB en el cual cada esfera moderadora es independiente una de otra, las mediciones del espectro se pueden realizar simultáneamente como lo menciona [Benites-Rengifo et al., \(2014\)](#), en su método planetario.

5.4 Monitor de área pasivo

El SECB pasivo de 5" con los resultados obtenidos en la figura 79, se comprueba que es una alternativa como un monitor de área pasivo para determinar el espectro de los neutrones con energía de 1 MeV, debido a que como lo reporta la literatura, los neutrones que se generan en los LINAC's que operan por encima de 8 MeV se encuentran alrededor de 1 MeV [Romero-Exposito *et al* 2015; Vega-Carrillo & Baltazar-Raigosa 2011], debido a que el SECB pasivo de 5" tiene una máxima eficiencia para esa energía de los neutrones como se observa en la Figura 80 .

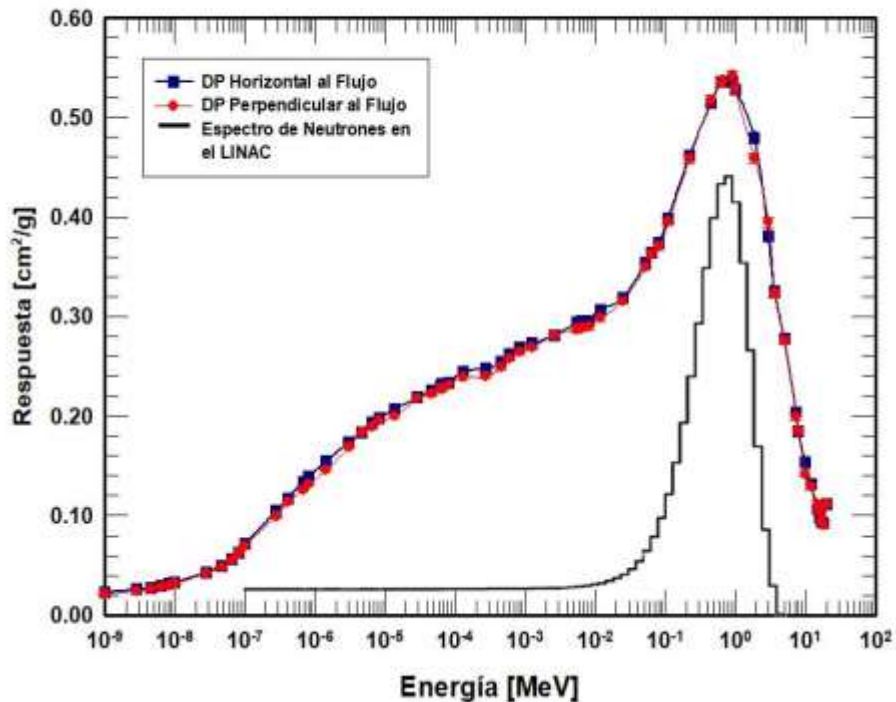


Figura 80. Espectro de fotoneutrones en los LINAC's y la respuesta de SECB pasivo de 5".

Con los resultados obtenidos y comprobados en las figuras 79 y 80 se justifica el uso del SECB pasivo de 5" como un monitor de área pasivo para emplearse en áreas de trabajo alrededor de los LINAC's

La caracterización de las áreas en las cuales se encuentran inmersos los neutrones en términos del espectro de la fluencia en cierto punto, es esencial para determinar las magnitudes dosimétricas como lo es $H^*(10)$, la D y con ésta la E [Bedogni *et al.*, 2016], para este caso en particular se utilizaron los coeficientes de conversión de fluencia a $H^*(10)$ y se comparó el resultado obtenido con el monitor de área comercial Berthold LB6411. Como se observa en la Figura 81, si bien es cierto la respuesta del SECB pasivo 5" no es exactamente igual a la obtenida con el Berthold LB6411, si se asemeja de tal forma que pueda servir como una alternativa de los monitores de área comerciales, tiene una menor eficiencia el SECB pasivo 5" con respecto al Berthold LB6411, debido a la tecnología y uso de materiales adicionales que usan los fabricantes para mejorar la respuesta.

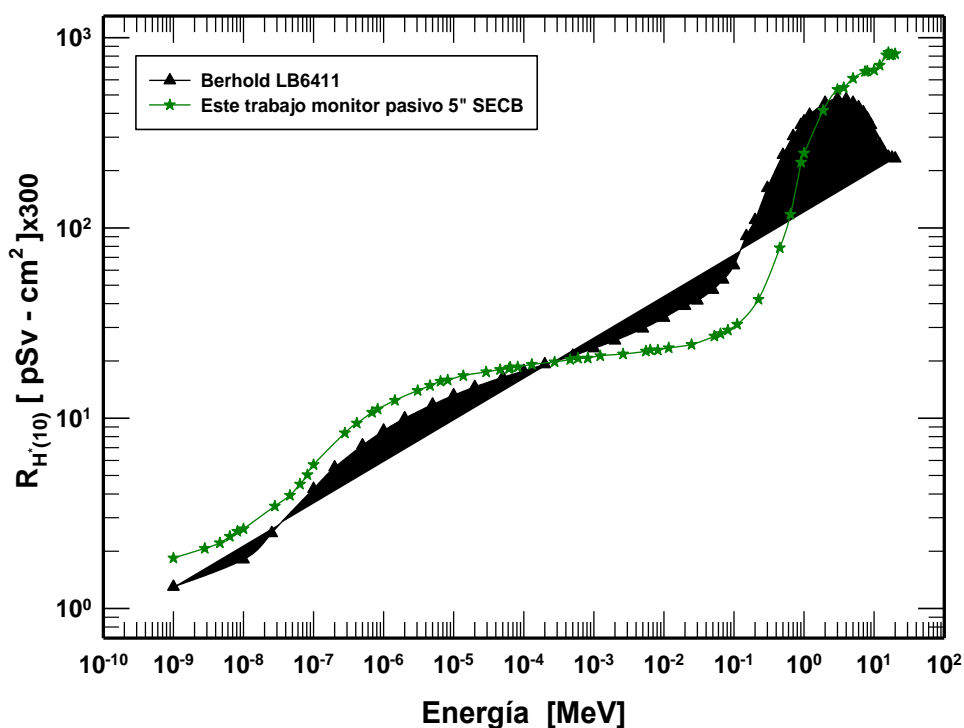


Figura 81. $H^*(10)$ Calculada por el SECB pasivo de 5" como monitor de área y el monitor de área Berthold LB6411.

6 CONCLUSIONES

Mediante métodos Monte Carlo se ha diseñado un espectrómetro de cubos Bonner, en el diseño se determinaron las funciones respuestas del SECB para un detector pasivo (laminilla de Au) y un detector de activo (detector proporcional de ^3He), así mismo su aplicación como un monitor de área pasivo.

Con base a los resultados obtenidos en el presente trabajo se concluye:

El diseño del SECB en modo pasivo y activo se presenta como una alternativa a los sistemas espectrométricos que existen en la actualidad para determinar los espectros de neutrones en ciertas áreas de interés, gracias a que muestra una respuesta similar al SEEB, incluso mejorando la del SEEB para algunas energías de los neutrones.

Tomando en consideración lo anterior se determina que el SECB es susceptible a patentarse, por lo que se presentó la solicitud ante el IMPI pasando a la primera fase con el número de registro **MX/a/2017/016597**.

La matriz respuesta del SECB pasivo demuestra que puede ser empleado como una gran herramienta para la medición de los espectros de neutrones en los LINACs en los cuales la literatura reporta que los fotoneutrones que se generan al interior de la salas de tratamiento tienen una energía alrededor de 1 MeV.

De acuerdo a la caracterización del SECB pasivo mediante un detector térmico para neutrones de laminillas de oro, el flujo de neutrones y las reacciones producidas sobre el detector no dependen de la posición en la cual se coloque el detector centrado al interior de cada moderador, las funciones respuesta obtenidas de la combinación detector-moderador no presentan diferencias considerables cuando el detector se coloca en posición vertical u horizontal, en un rango de neutrones térmicos a 20 MeV.

Así mismo valiéndose de la característica anterior y emplear la combinación de moderador-detector pasivo (Au) de 5" de arista se determinó que puede ser empleado como un monitor de área pasivo para determinar la $H^*(10)$ alrededor de los LINAC's, el cual presenta una muy buena eficiencia y un máximo para la medición de los neutrones con energía alrededor 1MeV.

Al sumar todas las funciones respuestas obtenidas para SECB pasivo y activo, con las combinaciones de moderador-energía, se obtiene una respuesta muy cercana a una función constante, lo que implica que la respuesta del sistema es independiente de la energía del neutrón incidente.

Así mismo, el SECB es versátil ya que el sistema de moderación es el mismo al usarlo en modo pasivo o activo, únicamente el holder es lo que se modifica, no es necesario tener un set diferente para cada detector a emplear para realizar las mediciones como lo es en el caso del SEEB, para el cual se requiere un set diferente de esferas para cada detector térmico.

El SECB en su diseño de anidación o encamisado a modo de quijadas de un moderador dentro de otro con base a un cubo pivote y/o central para incrementar el espesor de moderación lo hace innovador, debido a que en la mayoría de los casos se requiere que el detector térmico de los neutrones colocado al centro del sistema de moderación ya sea pasivo o activo, conserve su posición y no se desplace al cambiar de moderador, para realizar la siguiente medición.

Así mismo, el SECB al ser un sistema anidado de cada uno de los moderadores, su traslado se facilita debido a que se comporta como una sola pieza, mientras que el SEEB se tiene que trasladar cada esfera por separado, lo que lo hace más complicado, debido que se tiene que evitar que se deformen las esferas con el achatamiento de las mismas, ya que su respuesta isotrópica se alteraría y por lo tanto los resultados obtenidos no serían confiables.

Sin embargo, cada cubo del SECB es más pesado con respecto a su correspondiente de cada esfera del SEEB, debido a que es un volumen mayor en 90.98% como consecuencia de los vértices que tiene el volumen cúbico.

Por otra parte, al momento de realizar las mediciones en áreas como en los LINAC's con el SEEB se pueden realizar las mediciones en un solo disparo, gracias a que cada esfera es independiente una de otra, en cambio con el SECB como cada espesor de moderación depende de su antecesor las mediciones con cada moderador se tienen que realizar una a la vez.

REFERENCIAS

- Alevra, A.V.; Thomas, D.J. (2003) *Neutron spectrometry in mixed fields: multisphere spectrometers*. Radiation Protection Dosimetry. **107**: 37-72.
- Allan, J.M. (2008). *Genetic susceptibility to radiogenic cancer in humans*. Health Physics. **95**: 677-686.
- Amgarou, K.; Lacoste, V.; Martin, A.; Asselineau, B.; Donadille, L. (2009) *Neutron spectrometry with a passive bonner sphere system around a medical linac and evaluation of the associated unfolding uncertainties*. IEEE Transactions on Nuclear Science. **56**: 2885-2895.
- Atarod, M.; Shokrani, P.; Azarnoosh, A. (2013) *Out-of-field beam characteristics of a 6 MV photon beam: Results of a Monte Carlo study*. Applied Radiation and Isotopes. **72**: 182-194.
- Aza, E.; Dinar, N.; Manessi, G.P.; Silari, M. (2016). *A Bonner Sphere Spectrometer For Pulsed Fields*. Radiation Protection Dosimetry. **168**: 149-153.
- Birattari, C.; Dimovasili, E.; Mitaroff, A. and Silari, M. (2010). *A Bonner Sphere Spectrometer with extended response matrix*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. **620**: 260-269.
- Barquero, R.; Edwards, T.M.; Iñiguez, M.P.; Vega-Carrillo, H.R. (2005). *Monte Carlo simulation estimates of neutron doses to critical organs of a patient undergoing 18 MV x-ray LINAC-based radiotherapy*. Medical Physics. **32**: 3579-3587.

- Baumgartner, A.; Steurer, A.; Maringer, F.J. (2009) *Simulation of photon energy spectra from Varian 2100C and 2300C/D Linacs: Simplified estimates with PENELOPE Monte Carlo models*. Applied Radiation and Isotopes **67**: 2007-2012.
- Becker, J.; Brunckhorts, E.; Schmidt, R. (2007). *Photoneutron production of a Siemens Primus Linear accelerator studied by Monte Carlo methods and a paired magnesium and boron coated magnesium ionization chamber system*. Physics in Medicine and Biology. **52**: 6375-6387.
- Benites-Rengifo, J.L.; Vega-Carrillo, H.R.; Velazquez-Fernandez, J. (2014) *Photoneutron spectrum measured with a Bonner sphere spectrometer in planetary method mode*. Applied Radiation and Isotopes. **83**: 256-259.
- Bedogni, R.; Bortot, D.; Buonomo, B.; Esposito, A.; Gómez-Rios, J.M.; Introini, M.V.; Mazzitelli, G.; Moraleda, M.; Pola, A.; Romero, M. (2016). *A Single-Exposure, Multidetector Neutron Spectrometer For work place Monitoring*. **170**:326-330.
- Bedogni, R.; Gómez-Rios, J.M.; Pola, A.; Introini, M.V.; Esposito, A.; Gentile, A.; Mazzitelli, G.; Buonomo, B. (2015). *Neutron spectrometry from thermal energies to GeV with single-moderator instruments*. The European Physical Journal Plus. **130**: 1-4.
- Bedogni, R.; Domingo, C.; Roberts, N.; Thomas, D.J.; Chiti, M.; Esposito, A.; Garcia, M.J.; Gentile, A.; Liu, Z.Z. and De-San-Pedro, M. (2014). *Investigation of the neutrons spectrum of americium-beryllium sources by Bonner sphere spectrometry*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. **763**: 547 – 552.
- Bedogni, R. (2011) *Neutron spectrometry with bonner spheres for area monitoring in particle accelerators*. Radiation Protection Dosimetry. **146**: 383–394.

- Bedogni, R.; Esposito, A.; Andreani C.; Senesi, R.; De Pascale, M.P.; Picozza, P.; Pietropaolo, A.; Gorini, G.; D. Frost, C. and Ansell, S. (2009) Characterization of the neutron field at the ISIS-VESUVIO facility by means of a bonner sphere spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. **612**: 143-148.
- Bougamont, E.; Dastgheibi, A.; Derre, J.; Galan, J.; Gerbier, G.; Giomataris, I.; Gros, M.; Katsioulas, I.; Jourde, D.; Magnier, P.; Navick, X.F.; Papaevangelou, T.; Savvidis, I. and Tsiledakisa, G. (2017). *Neutron spectroscopy with the Spherical Proportional Counter based on nitrogen gas*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. **847**: 10-14.
- Buvat, I.; Castiglioni, I.; (2002) *Monte Carlo simulations in SPET and PET*. The quarterly journal of nuclear medicine and molecular imaging. **46**: 48-61.
- Burgett, E.A.; Hertel, N.E.; Howell, R.M. (2009) *Energy response and angular dependence of a Bonner sphere extension*. *IEEE Transactions on nuclear science*. **56**: 1325-1328.
- Chu, M.C.; Fung, K.Y.; Kwok,T.; Leung, J.K.C.; Lin, Y.C.; Liu, H.; Luk, K.B.; Ngai, H.Y.; Pun, C.S.J. & Wong, H.L.H. (2016). *Development of a Bonner Sphere neutron spectrometer from a commercial neutron dosimeter*. *Journal of Instrumentation*. **11**: 1-23.
- Çeçen, Y. (2013) Monte Carlo radiation transport in external beam radiotherapy. *Bitlis Eren University Journal of Science & Technology*. **1**: 1-5.
- Dalledone, P.T.S.; Yoriyaz, H.; Dos Santos, A.; Pascholati, P.R. (2008) *Numerical analysis of an incremented statistical sampling procedure in MCNP*. *Annals of Nuclear Energy*. **35**: 1073–1086

- Domingo, C.; García-Fusté, M.J.; Morales, E.; Amgarou, K.; Terrón, J.A.; Roselló, J.; Brualla, L.; Nuñez, L.; Colmenares, R.; Gómez, F.; Hartmann, G.H.; Sánchez-Doblado, F.; Fernández, F.; (2010) *Neutron spectrometry and determination of neutron ambient dose equivalents in different LINAC radiotherapy rooms*. Radiation Measurements. **45**: 1391-1397.
- Fernández, F.; Bouassoule, T.; Amgarou, K.; Domingo, C.; García, M.J.; Lacoste, V.; Gressier, V. and Muller, H. (2007) *Monte Carlo calculations and validation of gold foil-based Bonner Spheres System*. Radiation Protection Dosimetry. **126**: 366-370.
- Fernández, F.; Amgarou, K.; Domingo, C.; García, M.J.; Quincoces, G.; Martí-Climent, J.M. (2007) *Neutron spectrometry in a pet cyclotron with a Bonner sphere system*. Radiation Protection Dosimetry. **126**: 371-375.
- Fernández, F.; Domingo, C.; Amgarou, K.; Castelo, J.; Bouassoule, T.; García, M.J.; Luguera, E. (2007) *Neutron measurements in a Varian 2100C linac facility using a bonner sphere system based on passive gold activation detectors*. Radiation Protection Dosimetry. **126**: 371-375.
- Garnica-Garza, H.M. (2005). *Characteristics of the photoneutron contamination present in a high-energy radiotherapy treatment room*. Physics in Medicine and Biology. **50**: 531-539.
- Garny, S.; Mares, V and Rühm, W. (2009). *Response functions of a Bonner sphere spectrometer calculated with GEANT4*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. **604**: 612 - 617
- Ghiasi, H.; Mesbahi, A. (2010) *Monte Carlo characterization of photoneutrons in the radiation therapy with high energy photons: a comparison between simplified and full Monte Carlo models*. Iran. Journal Radiation Research. **8**: 187-193.

- Gómez, F.; Iglesias, A.; Sánchez-Doblado, F. (2010) *A new active method for the measurement of slow-neutron fluence in modern radiotherapy treatment rooms*. *Physics in Medicine and Biology*. **55**: 1025–1039.
- Gómez-Ros, J.M.; Bedogni, R.; Bortot, D.; Buonomo, B.; Esposito, A.; Gentile, G.; Lorenzoli, M.; Introini, M.V.; Mazitelli, G.; Moraleda, M.; Pola, A.; Sacco, D. (2015) *CYSP: A new cylindrical directional neutron spectrometer. Conceptual design*. *Radiation Measurements*. **82**: 47-51
- Hashemi, S.M.; Hashemi-Malayeri, B.; Raisali, G.; Shokrani, P.; Sharafi, A.A. (2007). *A study of the photoneutron dose equivalent resulting from a Saturne 20 medical linac using Monte Carlo method*. *Nukleonika*. **52**: 39-43.
- Hema, K. (2014) *Optimizing neutron moderation absorption using artificial neural network*. *International journal of scientific & technology research*. **3**: 79-84.
- Horst, F.; Czarnecki, D.; Zinck, K. (2015). *The influence of neutron contamination on dosimetry in external photon beam radiotherapy*. *Medical Physics*. **42**: 6529-6536.
- Hugtenburg, R.P. (2012) *Monte Carlo modelling of acute and late effects in radiation therapy*. *Applied Radiation and Isotopes*. **70**: 1113-1117.
- ICRP. (1996). *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation*. ICRP Publication 74. *Annals of the ICRP*, 26: 199.
- Jahangiri, M.; Hejazi, P.; Hashemi, S.M.; Haghparast, A.; Hajizadeh, B. (2015) *The effect of field size and distances from the field center on neutron contamination in medical linear accelerator*. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. **3**: 97-104.
- Juste, B.; Miró, R.; Campayo, J.M.; Díez, S.; Verdú, G. (2010) *Comparison of experimental 3D dose curves in a heterogeneous phantom with results obtained by MCNP5*

simulation and those extracted from a commercial treatment planning system. Applied Radiation and Isotopes. **68**: 913-917.

Kardan, M.R.; Setayeshi, S.; Koochi-Fayegh, R.; Ghiassi-Nejad, M. (2003) *Neutron spectra unfolding in bonner spheres spectrometry using neural networks.* Radiation Protection Dosimetry. **104**: 27-30.

Kim, Y.S.; Khazaei, Z.; Ko, J.; Afarideh, H.; Ghergherehchi, M. (2016). *Estimation of photoneutron yield in linear accelerator with different collimation systems by Geant4 and MCNPX simulation codes.* Physics in Medicine and Biology. **61**: 2762-2779.

Knoll, G.F. (2000). *Radiation Detection and Measurement.* Third Edition, Michigan, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Konefal, A.; Orlef, A.; Łaciaka, M.; Ciba, A.; Szewczuk, M. (2012) *Thermal and resonance neutrons generated by various electron and X-ray therapeutic beams from medical linacs installed in polish oncological centers.* Reports Of Practical Oncology And Radiotherapy. **17**: 339–346.

Konefal, A.; Orlef, A.; Dybek, M.; Maniakowski, Z.; Polaczek-Grelik, K.; Zipper, W. (2008). *Correlation between radioactivity induced inside the treatment room and the undesirable thermal/ resonance neutron radiation produced by linac.* Physica Medica. **24**: 212-218.

Konefal, A.; Dybek, M.; Zipper, W.; Lobodziec, W. and Szczucka, K. (2005). *Thermal and epithermal neutrons in the vicinity of the Primus Siemens biomedical accelerator.* Nukleonika. **50**: 73-81.

Konefal, A.; Polaczek-Grelik, K.; Zipper, W. (2008) *Undesirable nuclear reactions and induced radioactivity as a result of the use of the high-energy therapeutic beams generated by medical linacs.* Radiation Protection Dosimetry. **128**: 133-145.

- Králík, M.; Solc, J.; Vondrák, V.; Smoldasová, J. and Farkasova, E. (2015). *Spectral fluence of neutrons generated by radiotherapeutic linacs*. Radiation Protection Dosimetry. **163**: 373–380
- Kry, S.F.; Johnson, J.L.; White, R.A.; Howell, R.M.; Kudchadker, R.J.; Gillin, T. (2011) *Neutron-induced electronic failures around a high-energy linear accelerator*. Medical Physics. **38**: 34-39.
- Kuo-Wei, L.; Ming-Chen, Y.; Shiang-Huei, J.; Rong-Jiun, S. (2014) *Comparing standard Bonner spheres and high-sensitivity Bonner cylinders*. Radiation Protection Dosimetry. **161**: 233-236.
- Lee, K.W.; Sheu, R.J. (2015) *Spectral correction factors for conventional neutron doseimeters used in high-energy neutron environments*. Radiation Protection Dosimetry. **164**: 210-218.
- Lin, H.X.; Chen, W.L.; Liu, Y.H.; Sheu, R.J. (2016) *Characteristics and application of spherical-type activation detectors in neutron spectrum measurements at a boron neutron capture therapy (BNCT) facility*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. **818**: 94-99.
- Maciak, M.; Golnik, N.; Dworecki, K.; Domanski, S.; Tulik, O.; Araszkiwicz, A. (2015) *Passive multi-layer neutron spectrometer for neutron radiation dosimetry*. **9662**: 96622E-1-96622E-12.
- Maglieri, R.; Licea, A.; Evans, M.; Seuntjens, J.; Kildea, J. (2015) *Measuring neutron spectra in radiotherapy using the nested neutron spectrometer*. Medical Physics. **42**: 6162-6169.
- Marafini, M.; Patera, V.; Pinci, D.; Sarti, A.; Sciubba, A.; Spiriti, E. (2016). *MONDO: A neutron tracker for particle therapy secondary emission fluxes measurements*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. **824**: 210-211.

- Mesbahi, A.; Keshtkar, A.; Mohammadi, E.; Mohammadzadeh, M. (2010) *Effect of wedge filter and field size on photoneutron dose equivalent for an 18MV photon beam of a medical linear accelerator*. Applied Radiation and Isotopes. **68**: 84-89.
- Mesbahi, A. (2009) *A Monte Carlo study on neutron and electron contamination of an unflattened 18-MV photon beam*. Applied Radiation and Isotopes. **67**: 55-60.
- Mesbahi, A. (2007) *Dosimetric characteristics of unflattened 6MV photon beams of a clinical linear accelerator: A Monte Carlo study*. Applied Radiation and Isotopes. **65**: 1029-1036.
- Mirzajani, N.; Ciolini, R, DiFulvio, A.; Esposito, J. and Errico F. (2014). *Application of a Bonner sphere spectrometer for the determination of the angular neutron energy spectrum of an accelerator-based BNCT facility*. Applied Radiation and Isotopes. **88**: 216–220
- Mohammadi, A.; Afarideh, H.; .Abbasi Davani, F.; Ghergherehchi, M. and Arbabi A. (2016). *Monte Carlo study of neutron-ambient dose equivalent to patient in treatment room*. Applied Radiation and Isotopes. **118**: 140-148.
- Mohammadi, N.; Hakimabad, H.M.; Motavalli, L.R. (2015) *Neural network unfolding of neutron spectrum measured by gold foil-based Bonner sphere*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry **303**: 1687-1693.
- Newhauser, W.D.; Durante, M. (2011) *Assessing the risk of second malignancies after modern radiotherapy*. Nature Reviews Cancer. 1-11.
- Ongaro, C.; Zanini, A.; Nastasi, U.; Ródenas, J.; Ottaviano, G.; Manfredotti, C. (2000). *Analysis of photoneutron spectra produced in medical accelerators*. Physics in Medicine and Biology. **45**: 55-61.

- Patil, B.J.; Chavan, S.T.; Pethe, S.N.; Krishnan, R.; Bhoraskar, V.N.; Dhole, S.D. (2012) *Design of 6 Mev linear accelerator based pulsed thermal neutron source: FLUKA simulation and experiment*. Applied Radiation and Isotopes **70**: 149-155.
- Patil, B.J.; Chavan, S.T.; Pethe, S.N.; Krishnan, R.; Dhole, S.D. (2010) *Measurement of angular distribution of neutron flux for the 6MeV race-track microtron based pulsed neutron source*. Applied Radiation and Isotopes **68**: 1743-1745.
- Pena, J.; Franco, L.; Gómez, F.; Iglesias, A.; Pardo, J.; Pombar, M. (2005). *Monte Carlo study of Siemens PRIMUS photoneutron production*. Physics in Medicine and Biology. **50**: 5921-5933.
- Pioch, C.; Mares, V.; Vashenyuk, E.V.; Balabin, Y.V. and Rühm, W. (2011). Measurement of cosmic ray neutrons with Bonner sphere spectrometer and neutron monitor at 79o N. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. **626-627**: 51-57.
- Polaczek-Grelík, K.; Karaczyn, B.; Konefal, A. (2012) *Nuclear reactions in linear medical accelerators and their exposure consequences*. Applied Radiation and Isotopes. **70**: 2332-2339.
- Polaczek-Grelík, K.; Orlef, A.; Dybek, M.; Konefal, A. and Zipper, W. (2010). *Linear accelerator therapeutic dose-induced radioactivity dependence*. Applied Radiation and Isotopes. **68**: 763-766.
- Reginatto, M. (2009) *What can we learn about the spectrum of high-energy stray neutron fields from Bonner sphere measurements?*. Radiation Measurements. **44**: 692-699.
- Rebello, W.F.; Silva, A.X.; Facure, A. (2008) *Multileaf shielding design against neutrons produced by medical linear accelerators*. Radiation Protection Dosimetry. **128**: 227-233

- Rogers D.W.O. (2006). *Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics*. *Physics in Medicine and Biology*, **51**: 287-301.
- Romero-Exposito, M.; Sánchez-Nieto, B.; Terrón, J.A.; Lopes, M.C.; Ferreira, B.C.; Grishchuk, D.; Sandín, C.; Moral-Sánchez, S.; Melchor, M.; Domingo, C.; Gómez, F. and Sánchez-Doblado, F. (2015). *Commissioning the neutron production of a Linac: Development of a simple tool for second cancer risk estimation*. *Medical Physics*. **42**: 276-281.
- Sánchez-Reyes, A.; Hernandez, V.; Oulad Ben Tahar H.; Asenjo, J. and Sempau, J. (2001). *Simulación mediante el método Montecarlo de campos conformados de electrones de un acelerador lineal de terapia*. *Revista de Física Médica*, **2**: 29- 34.
- Santos, J.A.L.; Silva, E.R.; Ferreira, T.A.E.; Vilela, E.C. (2012) *Unfolding neutron spectra obtained from BS-TLD system using genetic algorithm*. *Applied Radiation and Isotopes*. **71**: 81-86
- Shaikh, A.M. (2008) *Development of neutron detectors and neutron radiography at Bhabha Atomic Reserch Centre*. *Journal of Physics*. **71**: 663-672.
- Thomas, D. (2005) *Uncertainties in radiation measurements*. *Radiation Protection Dosimetry*. **117**: 343-345.
- Thomas, D.J. and Alevra, A.V. (2003) *Bonner sphere spectrometers- a critical review*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. **476**: 12-20.
- Travis, L.B.; Ng, A.K.; Allan, J.M.; Pui, C.H.; Kennedy, A.R.; Xu, X.G.; Purdy, J.A.; Applegate, K.; Yahalom, J.; Constine, L.S.; Gilbert, E.S.; Boice, J.D. (2014) *Second malignant neoplasms and cardiovascular disease following radiotherapy*. *Health Physics*. **106**: 229-246.
- Tsoufanidis, N. (2010). *Measurement and Detection of Radiation*. Third Edition, United States of America: CRC Press Taylor & Francis Group.

- Turner, J.E. (2004). *Interaction of ionizing radiation with matter*. Health Physics. **86**: 228-252.
- Vaz, P. (2010). *Monte Carlo methods and techniques status and prospects for future evolution*. Applied Radiation and Isotopes. **68**: 536-541.
- Valero-Luna, C.; Guzmán-García, K.A.; Borja-Hernández, C.G.; Hernández-Dávila, V.M.; Vega-Carrillo, H.R. (2012). *Neutron área monitor with passive detector*. Revista Mexicana de Física. **58**: 262-264.
- Vega-Carrillo, H.R.; Hernández-Dávila, V.M.; Rivera, T. and Sánchez, A. (2014) *Nuclear and dosimetric features of an isotopic neutron source*. Radiation Physics and Chemistry. **95**: 122-124.
- Vega-Carrillo, H.R.; Martínez-Ovalle, S.A.; Lallena, A.M.; Mercado, G.A.; Benites-Rengifo, J.L. (2012) *Neutron and photon spectra in LINACs*. Applied Radiation and Isotopes. **71**: 75-80.
- Vega-Carrillo, H.R.; Ortiz-Rodríguez, J.M. and Martínez-Blanco, M.R. (2012). *NSDUAZ unfolding package for neutron spectrometry and dosimetry with Bonner spheres*. Applied Radiation and Isotopes. **71**: 87-91.
- Vega-Carrillo, H.R.; Baltazar-Raigosa, A. (2011). *Photoneutron spectra around an 18 MV LINAC*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. **287**: 323-327.
- Vega-Carrillo, H.R.; Ortíz-Hernandez, A.; Hernández-Dávila, V.M.; Hernández-Almaraz, B.; Rivera-Montalvo, T. (2010a). *H*(10) and neutron spectra around linacs*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. **283**: 537-540.
- Vega-Carrillo, H.R.; Hernández-Almaraz, B.; Hernández-Dávila, V.M. and Ortíz-Hernandez, A. (2010b). *Neutron spectrum and doses in a 18 MV LINAC*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. **283**: 261-265.

- Vega-Carrillo, H.R.; Donaire, I.; Gallego, E.; Manzanares-Acuña, E.; Lorente, A.; Iñiguez, M.P.; Martin-Martin, A.; Gutierrez-Villanueva, J.L. (2008). *Calculation of Response matrix of a BSS with ^6Li scintillator*. *Revista Mexicana de Física*. **54**: 57-62.
- Vega-Carrillo, H.R.; Manzanares-Acuña, E.; Hernández-Dávila, V.M.; Mercado-Sánchez, G.A. (2005) *Response matrix of a multisphere neutron spectrometer with an ^3He proportional counter*. *Revista Mexicana de Física S*. **51**: 47-52.
- Verhaegen, F. and Seuntjens, J. (2003). *Monte Carlo modelling of external radiotherapy photon beams*. *Physics in Medicine and Biology*. **48**: 107-164.
- Vukovic, B.; Poje, M.; Varga, M.; Radolic, V.; Miklavcic, I.; Faj, D.; Stanic, D.; Planinic J. (2010) *Measurements of neutron radiation in aircraft*. *Applied Radiation and Isotopes*. **68**: 2398-2402.
- Wang, Z.; Hutchinson, J.D.; Hertel, N.E.; Burgett, E.; Howell, R.M. (2008) *Study of a gold-foil-based multisphere neutron spectrometer*. *Radiation Protection Dosimetry*. **128**: 289-293.
- Wiegel, B.; Agosteo, S.; Bedogni, R.; Caresana, M.; Esposito, A.; Fehrenbacher, G.; Ferrarini, M.; Hohmann, E.; Hranitzky, C.; Kasper, A.; Khurana S.; Mares, V.; Reginatto, M.; Rollet, S.; Rühm, W.; Schardt, D.; Silari, M.; Simmer, G.; Weitzenegger, E. (2009) *Intercomparison of radiation protection devices in a high-energy stray neutron field, part II; Bonner sphere spectrometry*. *Radiation Measurements*. **44**: 660-672.
- Xin, W.; Hui, Z.; Zhen, W.; Zhi, Z.; Jun-Li, L.; Rui, Q. and Chun-Yan, L. (2014). *Development of spectrum unfolding code for multi-sphere neutron spectrometer using genetic Algorithms*. *Nuclear Science and Techniques*. 25, S010503.

- Xu, X.G.; Berdnardz, B.; Paganetti, H. (2008). *A review of dosimetry studies on external-beam radiation treatment with respect to second cancer induction*. *Physics in Medicine and Biology*. **53**: R193-R241.
- Zabihzadeh, M.; Ay, R.M.; Allahverdi, M.; Mesbahi, A.; Mahdavi, R.S.; Shahriari, M. (2009). *Monte Carlo estimation of photoneutrons contamination from high-energy X-ray medical accelerators in treatment room and maze: A simplified model*. *Radiation Protection Dosimetry*. **135**: 21-32.
- Zaidi, H.; Xu, X.G. (2007). *Computational Anthropomorphic Models of the Human Anatomy: The Path to Realistic Monte Carlo Modeling in Radiological Sciences*. *Annual Review of Biomedical Engineering*. **9**: 1.1 – 1.30.
- Zat'ko, B.; Sedlacková, K.; Dubecky, F.; Boháček, M.; Sekáčová and Necas, V. (2011). *Detection of fast neutrons using detectors based on semi-insulating GaAs*. *Journal of Instrumentation*. **6**: 3-7.

APÉNDICE

Founded 1964

LND, INC.

3230 LAWSON BLVD., OCEANSIDE, NEW YORK 11572

E-mail: info@lndinc.com Web Site: <http://www.lndinc.com>
1-516-678-6141 Fax: 1-516-678-6704

Designers & Manufacturers of Nuclear Radiation Detectors

25019 Cylindrical He3 Neutron Detector

GENERAL SPECIFICATIONS

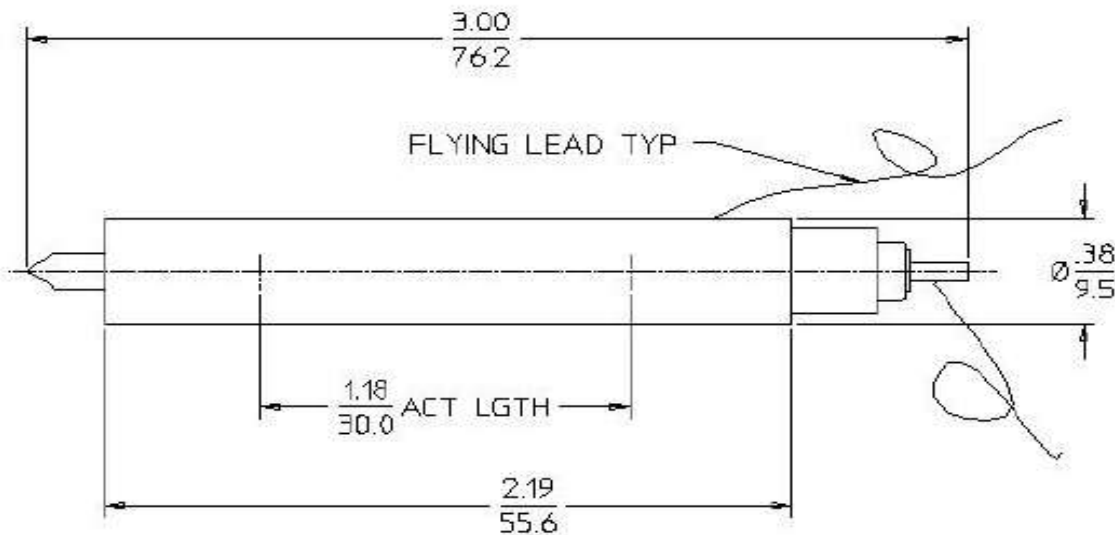
| | |
|-------------------------------------|-----------------|
| Gas pressure (torr) | 7600 |
| Cathode material | Stainless Steel |
| Maximum length (inch/mm) | 3.00/76.2 |
| Effective length (inch/mm) | 1.18/30.0 |
| Maximum diameter (inch/mm) | 0.38/9.5 |
| Effective diameter (inch/mm) | 0.26/6.60 |
| Connector | Flying Lead |
| Effective volume (cm ³) | 1.03 |
| Operating temperature range °C | -50 to +100 |

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

| | |
|---|------------|
| Recommended operating voltage (volts) | 850 |
| Operating voltage range (volts) | 750 - 1000 |
| Maximum plateau slope (% / 100 volts) | 1 |
| Maximum resolution (% fwhm) | 10 |
| Tube capacitance (pf) | 4 |
| Weight (grams) | 30 |

THERMAL NEUTRON SENSITIVITY

| | |
|------------------------|-----|
| Sensitivity (cps / nv) | 0.6 |
|------------------------|-----|



CURRICULUM

1. DATOS PERSONALES



Nombre: Antonio Baltazar Raigosa.

Licenciatura: Ingeniero en Comunicaciones y electrónica.

Maestría: Maestro en Ciencias Nucleares (Orientación Ingeniería Nuclear).

Fecha de nacimiento: 03 de Mayo de 1981.

Nacionalidad: Mexicano.

Lugar de nacimiento: Zacatecas, Zac.

Edad: 37 Años

Dirección: Colina de San Jerónimo #203, Fracc. Las Colinas, C.P. 98098.

Teléfono: (01492) 92 4 15 44.

Celular: 044 492 146 4811.

Disponibilidad de viajar: Si.

Residencia: Zacatecas.

Correo Electrónico: raigosa.antonio@hotmail.com

2. DOCUMENTACIÓN

| | |
|---|---------------------------------|
| CURP: | BARA810503HZSLGN07 |
| Cartilla del Servicio Militar: | C-4200787 Clase 1981 (liberada) |
| Cédula profesional Licenciatura: | 4263219. |
| Cédula profesional Maestría: | 6786353. |
| C.V.U. CONACYT: | 266721. |

3. ANTECEDENTES ACADÉMICOS

- Secundaria** Secundaria Federal No 2, Salvador Vidal
Periodo: 1993 – 1996 (Zacatecas, Zac.) 3 Años
Graduado con mención honorífica, obteniendo el primer lugar de la generación 9.7.
- Preparatoria** Colegio de Bachilleres del Estado de Zacatecas.
Periodo: 1996-1999 (Zacatecas, Zac.) 3 Años
Graduado con mención honorífica, obteniendo el primer lugar de la generación (9.69).
- Ingeniería** Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”. Unidad Académica de Ingeniería. Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica
Periodo: 1999 – 2004 (Zacatecas, Zac.) 5 Años
Titulación a través del examen general para egreso de la licenciatura aplicado por el Centro Nacional de Evaluación para la Educación Superior (CENEVAL), obteniendo cuarto lugar a nivel nacional. Mención honorífica como segundo lugar de la generación (Promedio 9.71).
- Maestría** Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”. Unidad Académica de Estudios Nucleares. Maestría en Ciencias Nucleares, Orientación: Ingeniería Nuclear. Tesis: **Efecto de los materiales que rodean a un LINAC de 18 MV en los espectros de neutrones y H*(10).**
Periodo: 2008 – 2010 (Zacatecas, Zac.) 2 Años. **(Promedio 9.73).**
- Doctorado** Universidad Autónoma de Zacatecas “Francisco García Salinas”. Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Doctorado en Ingeniería y Tecnología Aplicada. Tesis: **Espectrómetro pasivo y activo para Neutrones.**
Zacatecas, Zac. 3 Años. **(En proceso de Titulación).**

4. DIPLOMADOS

- ⇒ **“Gestión de la Tecnología”**, Cámara Nacional de la Industria de Transformación y Premio Nacional de Innovación Tecnológica. Desarrollo de proyectos. Ene 2015 – Diciembre 2015.
- ⇒ **“Desarrollo de Actividades Tutoriales”**. Coordinación de Docencia de la Universidad Autónoma de Zacatecas, 120 hrs (22 Nov-2013 al 22 Ene-2014).
- ⇒ **“Mecanismos de financiamiento de Sistemas Fotovoltaicos conectados a la red”**. Zacatecas, 9 y 10 de Abr 2008.
- ⇒ **“Ingles”**. Unidad de Idiomas de la Universidad Autónoma de Zacatecas (Ago. 1999 – Jul 2001).

5. IDIOMAS

- **Inglés** (10 Trimestres en el Centro de Idiomas de la Universidad Autónoma de Zacatecas).
- **Francés** (2 Trimestres en el Centro de Idiomas de la Universidad Autónoma de Zacatecas).

6. PROTECCIÓN INTELECTUAL

- Patente en Trámite ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, con número de expediente: MX/a/2017/016597. “Espectrómetro de Cubos Bonner”.

- Derechos de Autor, “Cálculo del Factor Multiplicador Proporcional Para Un Detector Pasivo Mediante MC Para Obtener el Espectro Neutrónico” No de **Registro: 03-2017-0918125340000-01**. Autores: Antonio Baltazar Raigosa, Héctor René Vega Carrillo, Rodrigo Castañeda Miranda, José Manuel Ortiz Rodríguez, Luis Octavio Solís Sánchez.
- Derechos de Autor, “Cálculo del Factor Multiplicador Proporcional Para Un Detector Activo Mediante MC Para Obtener el Espectro Neutrónico” No de **Registro: 03-2017-072111504600-01**. Autores: Antonio Baltazar-Raigosa, Héctor René Vega-Carrillo.

7. LIBROS PUBLICADOS

- Fotoneutrones y $H^*(10)$ en un LINAC de 18 MV de uso médico; Efecto de los materiales del entorno; Editorial Académica Española; ISBN: **978-3-659-04688-9**; Autores: Antonio Baltazar-Raigosa, Héctor René Vega-Carrillo.

8. ARTÍCULOS

- Soto-Bernal, T.G.; Baltazar-Raigosa, A.; Medina-Castro, D. & Vega-Carrillo, H.R. Applied Radiation and Isotopes. *Neutron production during the interaction of monoenergetic electrons with a Tungsten foil in the radiotherapeutic energy range*. Vol. **139** (2018): 46-52. DOI: 10.1016/j.nima.2017.06.027, (ISSN: 0168-9002).

- Soto-Bernal, T.G.; Baltazar-Raigosa, A.; Medina-Castro, D. & Vega-Carrillo, H.R. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. **Neutron production during the interaction of monoenergetic electrons with a Tungsten foil in the radiotherapy range.** Vol. 868 (2017): 27-38. DOI: 10.1016/j.nima.2017.06.027, (ISSN: 0168-9002).
- Vega-Carrillo, H.R. & Baltazar-Raigosa, A. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, *Photoneutron spectra around an 18 MV LINAC.* Vol. 287 (2011): 323-327. DOI: 10.1007/s10967-010-0696-0, (ISSN 0236-5731).
- Artículo de Divulgación Científica; **Las Radiaciones Ionizantes, sus efectos y aplicación**, Vol. 5, Ago. – Sep. 2016 eek' Revista de Divulgación Científica del COZCYT.

9. MEMORIAS IN EXTENSO

- **Matriz Respuesta de Volúmenes Regulares de Moderador con detector de ^3He Mediante Métodos Monte Carlo**, XVII International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD) Santo Domingo, República Dominicana, (Sep 26th to 30th, 2017).
- **Producción de neutrones en la interacción de electrones con una laminilla dispersora**, XVII International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD) Santo Domingo, República Dominicana, (Sep 26th to 30th, 2017).
- **Comportamiento de los neutrones bajo diferentes espesores de moderación.** XVI International Symposium on Solid State Dosimetry, (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.

- **Neutron production during the interaction of monoenergetic electrons with a thin tungsten target. XVI International Symposium on Solid State Dosimetry**, (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.
- **Cálculo de espectros de neutrones y dosis en un reactor nuclear subcrítico a base de Torio. XVI International Symposium on Solid State Dosimetry**, (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.
- **Espectro neutrónico y $H^*(10)$ alrededor de un LINAC de 18 MV convencional. XI Seminario de Investigación de la UAA** (May 18-21, 2010, Ags.) Diciembre 2010. *ISSN 1870-492*.
- **Evaluación de los blindajes de una sala de radioterapia mediante métodos Monte Carlo. XI Seminario de Investigación de la UAA** (May 18-21, 2010, Ags.) Diciembre 2010. *ISSN 1870-492*.
- **Validación de la Teoría Especial de la Relatividad por Dispersión Compton. XI Seminario de Investigación de la UAA** (May 18-21, 2010, Ags.), Diciembre 2010. *ISSN 1870-492*.
- **La cantera como blindaje contra los rayos gamma de 662 keV. XI Seminario de Investigación de la UAA** (May 18-21, 2010, Ags.) Diciembre 2010. *ISSN 1870-492*.
- **Optimización de un arreglo experimental de PGNAA. XI Seminario de Investigación de la UAA** (May 18-21, 2010, Ags.) Diciembre 2010. *ISSN 1870-492*.
- **Determinación del ^{40}K para estimar la concentración de Potasio total. XI Seminario de Investigación de la UAA** (May 18-21, 2010, Ags.) Diciembre 2010. *ISSN 1870-492*.

- **^{40}K Determination to Estimate the Concentration of Total Potassium** 17th Pacific Basin Nuclear Conference Cancún, Q.R., México, October 24-30, 2010.
- **Testing Special Relativity Theory using Compton Scattering** 17th Pacific Basin Nuclear Conference Cancún, Q.R., México, October 24-30, 2010.
- **Shielding Features of Quarry Stone** 17th Pacific Basin Nuclear Conference Cancún, Q.R., México, October 24-30, 2010.

10. PONENCIAS Y CARTELES

- Ponencia "**Diseño de un Monitor de Área Pasivo para medir la $\text{H}^*(10)$ de los neutrones producidos en LINACs de uso médico**". International Symposium on Solid State Dosimetry, ISSSD 2018 (Aceptado para su presentación en Septiembre de 2018, Oaxaca, Oax.).
- Ponencia "**Síntesis y caracterización dosimétrica de dosímetros termoluminiscentes con base en $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy}$ y $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy, Na}$** ". International Symposium on Solid State Dosimetry, ISSSD 2018 (Aceptado para su presentación en Septiembre de 2018, Oaxaca, Oax.).
- Ponencia "**Respuesta de un Monitor de Área de Geometría Regular para Medir la $\text{H}^*(10)$ de los Fotoneutrones Producidos en LINACs de uso Médico**". Segunda Reunión sobre las Aplicaciones de la Ingeniería Física en la Biomedicina. Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías (7,8 y 9 May. 2018, León, Gto.).
- Ponencia "**Fotones y neutrones producidos durante la interacción de electrones de 18 y 12 MeV con una laminilla Dispersora**". Segunda Reunión sobre las Aplicaciones de la Ingeniería Física en la Biomedicina. Universidad de Guanajuato, División de Ciencias e Ingenierías (7,8 y 9 May. 2017, León, Gto.).

- Ponencia **“Comportamiento de los neutrones en diferentes espesores de moderación para su detección”**, Jornadas de Investigación UAZ-2017, XXIV Semana Nacional de Ciencia y Tecnología, (30 – 31 Oct 2017). Zacatecas, Zac.
- Cartel **“Producción de neutrones en la interacción de electrones con una laminilla dispersora”**, Jornadas de Investigación UAZ-2017, XXIV Semana Nacional de Ciencia y Tecnología, (30 – 31 Oct 2017). Zacatecas, Zac.
- Ponencia **“Los Linac’s y los fotoneutrones”**. Universidad Metropolitana del Centro, (Oct 2017) Jerez, Zacatecas.
- Ponencia **Los fotoneutrones y los LINACs. XXIV Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (27 Oct, 2017, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.
- Cartel **Matriz Respuesta de Volúmenes Regulares de Moderador con detector de ^3He Mediante Métodos Monte Carlo**, XVII International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD) Santo Domingo, República Dominicana, (Sep 26th to 30th, 2017).
- Cartel **“Producción de neutrones en la interacción de electrones con una laminilla dispersora”**, XVII International Symposium on Solid State Dosimetry (ISSSD) Santo Domingo, República Dominicana, (Sep 26th to 30th, 2017).
- Ponencia **Moderación de los Neutrones para su Detección**, 18 Seminario de Investigación de la UAA (May, 2017, Ags.).
- Ponencia **Neutrones producidos durante la interacción de electrones monoenergéticos en una laminilla dispersora**. 18 Seminario de Investigación de la UAA (May, 2017, Ags.).

- Ponencia **Neutrones y los LINACs. 23a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (04 Nov, 2016, Zac.). Instituto Tecnológico Superior de Jerez, Zacatecas.
- Ponencia **Aplicaciones de las Radiaciones Ionizantes. 23a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (03 Nov, 2016, Zac.) Instituto Tecnológico Superior de Jerez, Zacatecas.
- Conferencia **Las Energías Alternas y La Sociedad. 23a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (27 Oct, 2016, Zac.) Universidad Politécnica de Zacatecas, Sede Fresnillo.
- Ponencia **Los Neutrones y los LINACs. 23a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (24 Oct, 2016, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.
- Ponencia **Las Radiaciones Ionizantes: Un Beneficio para la Sociedad**, (25 Oct, 2016, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.
- Ponencia **Las Energías Alternas y La Sociedad, Las Energías Alternas y La Sociedad** (26 Oct, 2016, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.
- Cartel **Comportamiento de los neutrones bajo diferentes espesores de moderación. 23a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (24 Oct, 2016, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.
- Cartel **Neutron production during the interaction of monoenergetic electrons with a thin tungsten target. 23a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (24 Oct, 2016, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.

- Cartel **Cálculo de espectros de neutrones y dosis en un reactor nuclear subcrítico a base de Torio**, (24 Oct, 2016, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación, CONACYT.
- Paper **Comportamiento de los neutrones bajo diferentes espesores de moderación. XVI International Symposium on Solid State Dosimetry**, (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.
- Paper **Neutron production during the interaction of monoenergetic electrons with a thin tungsten target. XVI International Symposium on Solid State Dosimetry**, (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.
- Paper **Cálculo de espectros de neutrones y dosis en un reactor nuclear subcrítico a base de Torio. XVI International Symposium on Solid State Dosimetry**, (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.
- Ponencia **Neutrones en aceleradores Lineales. 22a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**, (Oct 19-23, 2015, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- Ponencia **Energías Alternas y Sociedad. 22a Semana Nacional de Ciencia y Tecnología**. (Oct 19-23, 2015, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Consejo Zacatecano de Ciencia, Tecnología e Innovación.
- Ponencia **Las energías alternas y la sociedad. XIX semana Nacional de Ciencia y Tecnología**. (Sep 28, 2012, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

- Ponencia **Las energías alternas y la sociedad. XIX semana Nacional de Ciencia y Tecnología.** (Sep 28, 2012, Jerez, Zac.). La Universidad Metropolitana del Centro.
- Ponencia **Las energías alternas y la sociedad. XIX semana Nacional de Ciencia y Tecnología.** (Sep 25, 2012, Zac.). Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Ponencia **Sistemas fotovoltaicos y celdas solares. XIX semana Nacional de Ciencia y Tecnología.** (Sep 25, 2012, Calera, Zac.). Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos del Edo de Zacatecas.
- Ponencia **Espectro neutrónico y $H^{*}(10)$ alrededor de un LINAC de 18 MV convencional.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 18-21, 2010, Ags.). *Mejor ponencia en la sesión temática denominada ciencias naturales y exactas.*
- Ponencia **Evaluación de los blindajes de una sala de radioterapia mediante métodos Monte Carlo.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 18-21, 2010, Ags.) *Mejor ponencia en la sesión temática denominada ingenierías y tecnologías.*
- Ponencia **Validación de la Teoría Especial de la Relatividad por Dispersión Compton.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 18-21, 2010, Ags.).
- Ponencia **La cantera como blindaje contra los rayos gamma de 662 keV.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 18-21, 2010, Ags.).
- Ponencia **Optimización de un arreglo experimental de PGNAA.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 18-21, 2010, Ags.).
- Ponencia **Determinación del ^{40}K para estimar la concentración de Potasio total.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 18-21, 2010, Ags.).

- Se presentó el cartel titulado **Changes in the neutron spectra inside an 18 MV LINAC treatment room**, en el VI International Symposium on Radiation Physics (Mar 7 – 10, 2010, Zac).

11. GESTIÓN

- Se organizó y coordinó la segunda fase de la etapa estatal de la XXIII Olimpiada de Biología, Nov. 2013. Unidad Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Coordinación y organización de la Exporienta 2013 de la Unidad Académica de Ciencias Biológicas.
- Se organizó y coordinó la segunda fase de la etapa estatal de la XXII Olimpiada de Biología, Nov. 2012. Unidad Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Se organizó y coordinó el diplomado de Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la red, Consejo Zacatecano de Ciencia y Tecnología 2008.

12. RECONOCIMIENTOS

- **Miembro del Comité Técnico del XXIX Congreso Anual de la Sociedad Nuclear Mexicana MÉRIDA 2018.** Sociedad Nuclear Mexicana, 2 al 5 Julio 2018.
- ***Mejor ponencia en la sesión temática denominada ciencias naturales y exactas. “Diseño de un monitor pasivo de área para la medición de la $H^*(10)$ de los fotoneutrones producidos en los LINACs de uso médico”.*** 19º Seminario de Investigación de la UAA (May 30, 2018, Ags.).

- **Moderator during the scientific sessions of the XVI International Symposium on Solid State Dosimetry**, (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.
- **Perfil PROMEP (Programa de Mejoramiento del Profesorado), México 23 de Jul 2013 – 23 Jul de 2016.**
- Reconocimiento por haber obtenido un **promedio general de 9.73, siendo el tercer lugar de la generación 2008-2010 en aprovechamiento académico.** Unidad Académica de Estudios Nucleares. Universidad Autónoma de Zacatecas.
- **Mejor ponencia en la sesión temática denominada ciencias naturales y exactas. “Espectro neutrónico y H*(10) alrededor de un LINAC de 18 MV convencional”.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 20, 2010, Ags.).
- **Mejor ponencia en la sesión temática denominada ingenierías y tecnologías. “Evaluación de los blindajes de una sala de radioterapia mediante métodos Monte Carlo”.** XI Seminario de Investigación de la UAA (May 19, 2010, Ags.).
- Segundo lugar de la Generación 1999- 2004 de la Licenciatura en Electrónica y Comunicaciones con un **promedio de 9.72**
- Primer Lugar de Aprovechamiento académico en la generación 1996-1999 En el Plantel COBAEZ Zacatecas 01 con un **promedio de 9.69.**
- **Segundo lugar** en la XII olimpiada de matemáticas 15 May 1998.

13. CURSOS Y CAPACITACIONES

- **El congreso científico como instrumento de comunicación y formación del investigador.** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2018, 11-26 Jul 2018; Universidad Autónoma de Zacatecas, (50Hrs).
- **Introducción al método Monte Carlo.** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2018, 11-26 Jul 2018; Universidad Autónoma de Zacatecas, (60Hrs).
- **La gestión bibliográfica una herramienta para la elaboración de trabajos de investigación.** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2018, 11-26 Jul 2018; Universidad Autónoma de Zacatecas, (50Hrs).
- **La publicación científica.** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2018, 11-26 Jul 2018; Universidad Autónoma de Zacatecas, (60Hrs).
- **El congreso científico como instrumento de aprendizaje y formación del investigador.** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2017, 15-30 Jun 2017; Universidad Autónoma de Zacatecas, (60Hrs).
- **Matemáticas para papá y mamá.** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2017, 15-30 Jun 2017; Universidad Autónoma de Zacatecas, (20Hrs).
- **Curso de Dosimetría Termoluminiscente aplicada a la física médica. XVI International Symposium on Solid State Dosimetry,** (24 to 28 Sep, 2016, Zac.). The Mexican Society of Irradiation and Dosimetry. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas Mexico.
- **Recursos Digitales como soporte para la investigación.** Escuela Internacional de Verano UAZ-SPAUAZ 2016, Jun – Jul 2016; Universidad Autónoma de Zacatecas, (40Hrs).

- **Matemática^(R) para las Ciencias Nucleares.** Escuela Internacional de Verano UAZ-SPAUAZ 2016, Jun - Jul 2016; Universidad Autónoma de Zacatecas, (50Hrs).
- **Taller para el avance de los proyectos de investigación.** Escuela Internacional de Verano UAZ-SPAUAZ 2016, Jun - Jul 2016; Universidad Autónoma de Zacatecas, (40Hrs).
- **Taller Modelo de negocio, Innovación y Rentabilidad,** Programa de fortalecimiento empresarial para la generación de capacidades tecnológicas y de innovación en MIPYMES de Zacatecas. Fundación México - Estados Unidos para la Ciencia. (Oct 24, 2015, Zac).
- **Estructuración de cursos en línea en la plataforma electrónica institucional de aprendizaje,** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2014, Jun - Jul 2014; Universidad Autónoma de Zacatecas, (50Hrs).
- **Blindaje y dosimetría de equipos de rayos x para odontología,** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2014, Jun - Jul 2014; Universidad Autónoma de Zacatecas, (30Hrs).
- **La intervención del tutor: ejercicio de integración de experiencias,** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2014, Jun - Jul 2014; Universidad Autónoma de Zacatecas, (20Hrs).
- **Diseño curricular por competencias e innovación curricular,** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2014, Jun - Jul 2014; Universidad Autónoma de Zacatecas, (20Hrs).
- **Didáctica como praxis. Cómo pasar de la planeación a la construcción de aprendizajes en el aula,** Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2014, Jun - Jul 2014; Universidad Autónoma de Zacatecas, (20Hrs).

- **Mapas conceptuales y mentales como estrategias de pensamiento crítico**, Escuela de Verano UAZ-SPAUAZ 2014, Jun – Jul 2014; Universidad Autónoma de Zacatecas, (20Hrs).
- **Integración y Fortalecimiento de cuerpos académicos**, Escuela de Verano 2013; Universidad Autónoma de Zacatecas; Jul 2013.
- **Desarrollo de Sitios WEB institucionales en base a LIFERAY**; Escuela de Verano 2013; Universidad Autónoma de Zacatecas; Jul 2013.
- **Integración de las carpetas para la acreditación mediante CIEES**; Escuela de Verano 2013; Universidad Autónoma de Zacatecas; Jul 2013.
- **Curso de Administración de Redes de Computo Básico**; Universidad Autónoma de Zacatecas; Capacitación Telecomunicaciones UAZ; 5 al 16 Nov 2012.
- **Seguridad nuclear y protección radiológica**, Escuela de Verano 2011; Universidad Autónoma de Zacatecas; 27 de Jun al 08 de Jul 2011.
- **Actualización para personal de la SSP y sus órganos desconcentrados**, Policía Federal, Instalaciones Base CONTEL, México D.F., 09 al 13 de Ago. 2010.
- **Redacción de artículos científicos**, Escuela Internacional de Verano 2010, Universidad Autónoma de Zacatecas, 21 al 25 de Jun 2010.
- **Método Monte Carlo aplicado al transporte de la radiación**, Escuela de verano internacional de la UAZ-SPAUAZ 2010 del 21 al 25 de junio 2010.
- **Administración del tiempo**, Secretaria de Seguridad pública, Policía Federal, Zacatecas, Zac. 28 al 2 de Oct 2009.
- **Encuentro estatal de comisiones de seguridad y salud en el trabajo**, ISSSTE Zacatecas, Zac. 28 al 30 de Oct 2009.

- **Seminario Nuclear and Radiation Engineering**, Unidad Académica de Estudios Nucleares, Universidad Autónoma de Zacatecas. 23 y 24 Oct 2008.
- **Taller Mecanismos de financiamiento de Sistemas Fotovoltaicos conectados a la red**. Zacatecas, 9 y 10 de Abr 2008.
- **Seguridad nuclear y protección radiológica**, Escuela de Verano 2011; Universidad Autónoma de Zacatecas; 27 de Jun al 08 de Jul 2011.
- **Proceso de aceptación como proveedor de JATCO México S.A. de C.V.**, Guadalupe, Zac; 11 y 12 de Jul 2007.
- **Capacitación en control numérico de las computadoras de centros de maquinado de piezas automotrices FANUC** (Del día 26 al 29 de Nov. del 2007; 40 horas).
- **Capacitación en mantenimiento y maquinado de piezas automotrices en la empresa Ahresty establecida en Wilmington, Ohio, Estados Unidos** (Del 28 de Feb. al 01 de May. del 2007).
- **Curso de Ensamble y Fabricación de partes automotrices** en la empresa Ahresty Mexicana S.A. DE C.V. (Del 12 de Feb. al 15 de May. del 2007).
- **Tercer Congreso Internacional de Mecatrónica; Automatización y Tecnología** del día 6 al 9 de Abril del 2005 en el tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey.
- **Curso de capacitación operativa y administrativa para el funcionamiento del Centro Interactivo de Ciencias Zig - Zag**, impartida en el Museo del Papalote de la ciudad de México, D.F. del día 13 al 17 de Diciembre del 2004.

- **AutoCAD 2002 Avanzado 3D**; Centro de Computo de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas. (20 horas Ago. 2004 – Sep. 2004).
- **Congreso de The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)** Sección Guadalajara (2 de Abr. 2004).
- **1er Congreso Nacional de Electrónica y Automatización** en la Universidad Tecnológica del Estado de Zacatecas (11 y 12 de Mar. 2004).
- **Taller: Técnicas Modernas de Administración**, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas. 25 Horas (Abr. 2002).
- **Estructura de Datos de la Especialidad en Computación**; Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Zacatecas. (Primer semestre del 2000).
- **Mantenimiento Preventivo y Correctivo de PC's**, Centro de Computo de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas. (50 horas Ene. 2000).
- **AutoCAD Básico R14**, Centro de Computo de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas. (45 horas Oct. 1999).
- **Programación Básica en Visual Basic**; Centro de Computo de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas. (40 horas Oct. 1999).
- **AutoCAD Intermedio R14** Centro de Computo de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas. (20 Horas Nov.1999).

14. EXPERIENCIA PROFESIONAL

- **Coordinador de Soporte Técnico y Comunicaciones de la Procuraduría de la Defensa del Contribuyente, Delegación Zacatecas.** Responsable de la seguridad de la red de voz y datos, mantenimiento de equipos de cómputo y telefonía IP, así mismo del enlace tecnológico Zona Norte a nivel nacional.
- **Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias Biológicas (Agosto 2012 – Mayo 2014):**
 - **Encargado de la red de voz y datos de la Unidad Académica.**
 - **Coordinador de Tutorías de la UACB del Consejo Institucional de Tutoría de la UAZ (2012-2016).**
 - **Responsable servicio Social (Febrero 2014).**
 - **Responsable del área de vinculación y Tutorías Estudiantiles (Marzo 2013).**
 - **Miembro del comité de acreditación ante CIEES (Febrero 2013).**
 - **Materias Taller de tesis e investigación 7 Prácticas de cómputo y biología (Febrero 2013).**
 - **Responsable del área de Videoconferencias en la UACB (Noviembre 2012).**
 - **Responsable de la Pagina WEB de la UACB (Noviembre 2012).**
 - **Apoyo organizacional de los laboratorios de Biología Celular, Bioquímica, Microbiología, Computación, Fisicoquímica (Agosto 2012).**
- **Encargado de Soporte Técnico Zacatecas en la Coordinación Estatal Zacatecas de la Secretaria de Seguridad Pública Federal – Policía Federal, Gobierno Federal,** brindar soporte técnico preventivo y correctivo al equipo de cómputo (red y periféricos, formateo, configuración, seguridad, cableado,

instalación), audio, radio, telecomunicaciones, telefonía (análoga y digital IP) y video, así como de los sistemas de comunicaciones y videograbación de las radio-patrullas, así mismo en manejo de armas y táctica policial.

- **Supervisor de Mantenimiento y Producción** en procesos de maquinado de partes Automotrices en Ahresty Mexicana S.A. de C.V.(Empresa Japonesa dedicada a la exportación); Iniciando como supervisor de mantenimiento, contando con personal a mi cargo, desempeñando labores como **elaboración de hojas de procedimientos, mejora de procesos, programación de procesos, control de calidad, mantenimiento preventivo y correctivo de los centros mecánicos y automatizados de trabajo (motores, herramientas de corte, diseños arquitectónicos, reajustes para la mejora del proceso dentro de los centros de maquinado.**
- **Área administrativa y de docencia en el área de aula de medios** en la **Secretaría de Educación y Cultura para el sistema de Telesecundarias**, desempeñando mis servicios en la Escuela Telesecundaria “Juan Escutia” del municipio de Trancoso, Zac. **También se realizó el proyecto de la mejora de la red eléctrica para el programa de Enciclomedia.**
- **Coordinador del departamento de Ingeniería y Mantenimiento del Centro Interactivo Ciencias Zig Zag en conjunto con el Consejo Zacatecano de Ciencia y Tecnología del Gobierno del Estado de Zacatecas**; Encargado del **mantenimiento correctivo y preventivo tanto del inmueble (instalaciones eléctricas, hidráulicas, obra civil, así como el desarrollo de proyectos relacionados con el uso de energías renovables), como de las exhibiciones del museo (electrónica, mecánica, eléctrica, informática) , así como control de inventarios**, lo cual consistía en licitación de

proveedores para la compra de consumibles; **atención al público y manejo de personal.**

- **R&B Comunicaciones.** Mantenimiento de redes de voz y datos, así como de equipo de cómputo, al igual que soporte de radio comunicación, también se realizaba instalación de conmutadores telefónicos así como la programación de extensiones.

M.C. Antonio Baltazar Raigosa