

Trabajo de fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Diseño preliminar de un sistema de detección de neutrones

MEMORIA

Autora: Mariana Montoliu Losada
Director: Ariel Esteban Tarifeño Saldivia
Ponent: Francisco Calviño Tavares
Convocatòria: Enero 2018-Junio 2018



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**



Resumen

El grupo de Física Nuclear Experimental de la UPC, en conjunto con el grupo de espectroscopía gamma del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), están desarrollando un sistema de detección de neutrones con capacidades espectrométricas. Dicho sistema está compuesto por un arreglo de detectores de neutrones que usan material plástico (HDPE) de distintas geometrías para ajustar la sensibilidad del sistema a diferentes energías de neutrones. Un prototipo preliminar de este sistema ha sido construido en el CERN, en el marco de una colaboración científica, usando materiales preexistentes.

En el presente trabajo se acabará de completar el diseño de este prototipo preliminar construido en el CERN. Para ello se realizará primero una caracterización de los materiales moderadores que componen el arreglo de detectores. Esta caracterización ha sido posible gracias al análisis de datos para medidas con fuentes de ^{252}Cf y $^{241}\text{AmBe}$. A partir de estos datos, de simulaciones Monte-Carlo y de medidas de eficiencias se ha podido determinar la fracción de Boro en peso que posee el material de los moderadores. Finalmente, una vez obtenida la composición del material y mediante un cálculo por Monte Carlo se ha realizado el cálculo de la respuesta a fluencia del sistema.

Índice

RESUMEN.....	iii
ÍNDICE.....	v
GLOSARIO.....	8
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....	10
1.1. Objetivo principal.....	10
1.2. Objetivos generales.....	10
1.3. Alcance del proyecto.....	11
2. <u>CONCEPTOS BÁSICOS</u>.....	12
2.1. Espectrometría de neutrones.....	12
2.2. Radiación de neutrones.....	12
2.2.1. <u>Definición</u>	12
2.2.2. <u>Interacción con la materia</u>	13
2.3. Fuentes de neutrones.....	14
2.3.1. <u>Radiactividad</u>	14
2.3.2. <u>Tipos de fuentes de neutrones</u>	15
2.4. Sección eficaz microscópica y macroscópica.....	15
2.5. Moderación de neutrones.....	16
2.6. Detección de neutrones térmicos.....	16
2.7. Detección de neutrones rápidos.....	19
3. <u>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN</u>.....	21
3.1. Detector del laboratorio y equipo de electrónica asociado.....	21
3.2. Sobre los cinco detectores contador-moderador.....	22
3.3. Detector con lámina de Cadmio y conversor de Plomo.....	23
3.4. Procedimientos para identificar la posible presencia de boro.....	24
3.4.1. <u>Análisis de densidades</u>	24
3.4.2. <u>Análisis químico-superficial</u>	26
3.4.3. <u>Aproximación de la posible concentración de boro</u>	26
4. <u>CÓDIGOS DE CÁLCULO Y ANÁLISIS DE DATOS</u>.....	29

4.1.	Simulaciones Monte Carlo y Géant4.....	29
4.2.	Código ParticleCounter.....	29
4.3.	ROOT.....	31
5.	<u>MEDIDAS EXPERIMENTALES.....</u>	32
5.1.	Medidas de la tasa de conteo en el LIN. Mayo 2016.....	32
5.1.1.	<u>Consideraciones previas.....</u>	32
5.1.2.	<u>Montaje experimental.....</u>	33
5.1.3.	<u>Reordenación de datos y análisis con ROOT.....</u>	34
5.1.4.	<u>Simulaciones con ParticleCounter.....</u>	37
5.1.4.1.	Simulación para polietileno puro.....	37
5.1.4.2.	Simulación para polietileno borado.....	40
5.2.	Compleción a las medidas de la tasa de conteo. Mayo 2018.....	41
6.	<u>MEDIDAS DE TASAS DE CONTEO EN EL CERN.....</u>	44
6.1.	Introducción.....	44
6.2.	Validación del método. Simulación de los detectores de PE.....	46
6.3.	Estimación de la fracción de Boro.....	50
6.3.1.	<u>Cálculo de la diferencia de eficiencias.....</u>	50
6.3.2.	<u>Simulación con ParticleCounterVexp.....</u>	51
6.3.3.	<u>Método de cálculo.....</u>	52
6.3.4.	<u>Resultados.....</u>	54
7.	<u>CÁLCULO DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA DE DETECCIÓN....</u>	57
7.1.	Qué es una curva de respuesta.....	57
7.2.	Caracterización de los detectores.....	57
7.3.	Comparación de la función respuesta con un sistema sin boro.....	60
8.	<u>PLANIFICACIÓN, COSTE E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....</u>	63
8.1.	Planificación.....	63
8.2.	Coste.....	64
8.3.	Impacto medioambiental.....	64
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65

AGRADECIMIENTOS.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	68
ANEXO.....	70
Anexo 1: Cálculos para obtener la densidad del material de los detectores.....	70
Anexo2: Archivos para el funcionamiento correcto de ParticleCounter.....	71
Anexo 3: SCRIPT para realizar simulaciones en GEANT4.....	74
Anexo 4: Archivo ASCII obtenido a partir de medidas experimentales.....	80
Anexo 5: Visualización de geometrías con ParticleCounter.....	81
Anexo 6: Características de la fuente de Californio.....	82
Anexo 7: Análisis de sensibilidad: Boro, temperatura y espectro.....	83
Anexo 8: Resultado para el cálculo diferencia de eficiencias.....	84

GLOSARIO

α . Núcleo de helio (^4He)

ASCII. American Standard Code for Information Interchange. Sistema de codificación de caracteres alfanuméricos

CERN. Consejo Europeo para la investigación nuclear.

cpn. Cuentas por neutrón

cps. Cuentas por segundo

Cuentas. Eventos detectados

Eff. Eficiencia

Evento. Neutrón procesado

HDPE. Polietileno de alta densidad

IFIC: Instituto de Física Corpuscular

INTE: Instituto Nacional de técnicas estadísticas.

LIN. Laboratorio de Instrumentación Nuclear

MC. Monte-Carlo

nTOF. The neutron time-of-flight facility. Instalación situada en el CERN.

n. neutrón

p. protón

UPC. Universidad Politécnica de Cataluña

^{252}Cf . Fuente de Californio 252.

$^{241}\text{AmBe}$. Fuente Americio-Berilio 241.



1. INTRODUCCIÓN

El Departamento de Física Nuclear de la UPC ha desarrollado un equipo de detección de neutrones cuya construcción se ha llevado a realizar en el CERN. El sistema de detección está compuesto por ocho detectores diferentes, todos ellos incluyen un *contador de neutrones térmicos* en su interior.

1.1. **Objetivo principal**

El objetivo principal del presente trabajo es el de caracterizar este sistema de detección. ¿Cómo se caracteriza un sistema de detección de neutrones? Pues, mediante su *función respuesta* que se obtendrá mediante *simulaciones Monte Carlo*. A partir de la caracterización se podrá realizar una evaluación del sistema.

1.2. **Objetivos específicos**

- Caracterizar el material que compone los detectores. Sin la composición del material no se puede realizar dicha caracterización.
- Análisis de diferentes metodologías para realizar una estimación en cuanto a la composición del material de los detectores.
- Organización, procesamiento y validación de datos experimentales.
- Cálculo de *tasas de conteo* de neutrones a partir de medidas experimentales.
- Familiarización con el código C++ y otros códigos informáticos que facilitan la realización de simulaciones.
- Cálculo de eficiencias a partir de simulaciones.
- Realización de medidas experimentales en el Laboratorio de Instrumentación Nuclear de la UPC.
- Evaluación de la respuesta del sistema de detección.
- Proponer futuras mejoras/recomendaciones para el sistema de detección.



1.3. Alcance del proyecto

La parte troncal del trabajo se halla en los cinco capítulos centrales. (del capítulo dos al capítulo seis, ambos incluidos).

En el segundo capítulo se introducirán los conceptos básicos y necesarios para entender el trabajo realizado, algunos de los cuáles ya han sido mencionados y se han destacado en cursiva. El tercer capítulo describe los elementos del sistema de detección. En el cuarto capítulo encontramos una explicación sobre los códigos de cálculo usados para realizar las simulaciones y otras ayudas informáticas para el análisis de datos. En el quinto capítulo están explicadas las medidas experimentales en el LIN. El sexto capítulo incluye los cálculos realizados a partir de las medidas adicionales realizadas en el CERN. Finalmente el sexto capítulo incluye la caracterización del sistema de detección.

Se debe comentar que una parte importante del trabajo ha sido la investigación sobre el material del cual se compone el arreglo de detectores. Esta parte ha sido esencial para lograr el objetivo principal ya que no se disponía de ninguna información sobre el material por parte de los proveedores. A partir de diferentes etapas progresivas se ha realizado una estimación de la composición aproximada del material. Posteriormente se ha realizado la caracterización del sistema.

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. **Espectrometría de neutrones**

Hoy en día la producción de neutrones está presente en numerosas aplicaciones médicas, industriales y científicas, como centrales nucleares, reactores de fusión, la producción de radiofármacos, etc. Por esta razón es necesario disponer de dispositivos que permitan determinar con precisión las condiciones de exposición, las medidas de protección radiológica, monitorizar flujos de neutrones, etc. Es en este tipo de aplicaciones donde los espectrómetros de neutrones pueden ser de gran ayuda [1].

Antes de todo conviene saber qué es exactamente la espectrometría de neutrones. Consiste en una técnica que trata de contabilizar los neutrones, presentes en un espacio, distribuidos en función de sus energías. Así pues, un espectrómetro de neutrones es un dispositivo mediante el cual se puede obtener el espectro de neutrones. Esto es, determinar con precisión las energías de los neutrones que presentes en un ambiente determinado.

2.2. **Radiación de neutrones**

2.2.1. Definición de radiación neutrónica

La radiación neutrónica es una clase de radiación ionizante basada en neutrones libres provenientes de reacciones nucleares o de materiales radiactivos. Las fuentes de neutrones, que más adelante se verán con más detalle, emiten radiación neutrónica. Según la energía que posea el neutrón este es catalogado con un nombre [2] y generalmente se realiza la siguiente clasificación:

Neutrones	Energía
Térmicos	< 0.5 eV
Intermedios	0.5 eV – 10 keV
Rápidos	10 keV-10 MeV
Relativistas	>10 MeV



2.2.2. Interacción con la materia

Esta radiación de neutrones interactúa con la materia y estas interacciones pueden clasificarse en dos grandes grupos [3]

- Scattering (dispersión si se traduce al español, pero en la presente memoria nos referiremos con el término en inglés). Este fenómeno se produce cuando un núcleo atómico, después de haber colisionado con un neutrón, emite otro neutrón. La reacción neta es como si el neutrón hubiera rebotado contra el núcleo de dicho átomo.

El scattering puede ser elástico o inelástico. En el primer caso no hay transferencia de energía entre neutrón y núcleo. Por tanto se conservan tanto la energía cinética y la cantidad de movimiento. En el caso de scattering inelástico el neutrón es absorbido por el núcleo. Posteriormente, el núcleo emite un neutrón con una energía cinética inferior, cosa que deja al núcleo golpeado en un estado de excitación.

- Reacciones de absorción. Se trata de la pérdida de un neutrón conjuntamente con la producción de una partícula cargada o de un rayo gamma. Dentro de este tipo de reacciones están la captura radiactiva, eyección de partículas y la fisión.

En la captura radiactiva, se produce la absorción de un neutrón por parte de un núcleo resultando en un núcleo excitado y éste posteriormente a emite radiación gamma para recuperar la estabilidad.

En la eyección de partículas, de manera similar a la anterior reacción el núcleo excitado en vez de emitir rayos gamma emite una nueva partícula.

Por último encontramos la fisión, en la cual un núcleo se divide en dos partes similares después de haber absorbido un neutrón.

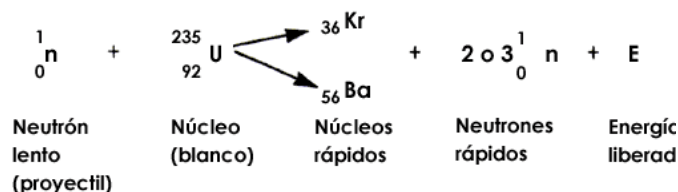


Figura 1: Ejemplo de la reacción de fisión del Uranio al ser golpeado por un neutrón lento [4]

Al tener carga nula, la radiación de neutrones es difícil de parar y además posee un elevado poder penetrante. Sin embargo, los neutrones rápidos pueden atenuarse de dos maneras diferentes: a partir de scattering o a partir de la absorción.

En el caso de scattering elástico, después del choque, parte de la energía cinética del neutrón se transmite al núcleo y como consecuencia el neutrón irá más lento después de la interacción. Cuanto más parecida sea la masa del núcleo a la masa del neutrón, esta reacción resulta más efectiva, si el objetivo es reducir la velocidad del neutrón incidente (se puede comprobar fácilmente aplicando la ley de conservación de la cantidad de movimiento). Por eso los materiales hidrogenados suelen ser los más utilizados si lo que se busca es la atenuación de neutrones.

En scattering inelástico pasa algo similar sólo que además de aportar energía cinética el neutrón aporta al núcleo energía interna, cosa que lo deja en un estado de excitación superior al que estaba.

Finalmente, en reacciones de absorción el neutrón es absorbido por el núcleo del átomo. El neutrón es 'capturado' y el núcleo se queda en un estado excitado, dando como resultado uno de los tres procesos explicados anteriormente.

2.3. Fuentes de neutrones

2.3.1. Radiactividad

La radioactividad es la propiedad que poseen ciertos materiales de emitir, de manera natural, partículas o radiación gamma. En la presente memoria nos centraremos en los materiales radiactivos que son capaces de emitir neutrones, ya que la mayoría de fuentes neutrónicas se basan en este fenómeno.

La radiactividad se mide generalmente por la actividad que posee una muestra. Esta corresponde a la tasa de decaimiento de dicha muestra y se mide como el número de desintegraciones por segundo. La relación entre la actividad el número de átomos y la constante de decaimiento de un material es la siguiente:

$$A=N\cdot\lambda$$

A: actividad en desintegraciones por segundo

N: número de átomos

λ : constante de decaimiento en s^{-1}



Las unidades usadas para medir la radiactividad son el Curie (Ci) y el Becquerel (Bq). Un becquerel equivale a una desintegración por segundo, pero actualmente lo más usado es el Curie. La conversión entre ambas unidades es la siguiente: 1 Curie= 3.7e10 Becquerels. [3]

Con el tiempo la radioactividad varía, concretamente la actividad de un material radiactivo disminuye a lo largo del tiempo. El número de átomos presente se reduce de manera exponencial siguiendo la siguiente ley:

$$N=N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

N: número de átomos actual

N_0 : número de átomos inicial

λ : constante de decaimiento

2.3.2. Tipos de fuentes de neutrones

Existen varios tipos de fuentes neutrónicas. Sin embargo, las son de interés en este el trabajo son:

- Las fuentes tipo $(\alpha, n)_1$. Los neutrones se producen mediante la interacción de una partícula alfa emitida por un elemento radiactivo de alto número atómico con un elemento de bajo número atómico con el que está mezclado homogéneamente. Entre este tipo de fuente destacan las de Americio-Berilio y las de Radio-Berilio.
- Las que se obtienen a partir de un material radiactivo. Por ejemplo el Californio-252 (es la que se dispone en el laboratorio). Este material emite neutrones de manera natural con una tasa de aproximadamente $2e12$ neutrones por segundo y por gramo de material. Se trata del resultado de una fisión espontánea.

Otras fuentes se pueden obtener a partir de aceleradores o reactores nucleares.

2.4. **Sección eficaz**

Sección eficaz microscópica (σ). Es la probabilidad de que una reacción en particular ocurra entre un neutrón y un núcleo. Esta sección eficaz varía según la energía que posea el neutrón. También se la puede definir como el área efectiva que un sólo núcleo presenta para que partícula la bombardee. Por eso la unidad con la que se mide es una unidad de superficie. La unidad utilizada es el Barn, 1 Barn equivale a 10^{-24} cm².

Sección eficaz macroscópica (E). Esta representa el área efectiva total que se presentan

todos los núcleos contenidos en 1 cm^3 de material. Se obtiene multiplicando la sección eficaz microscópica por la densidad atómica del material, N (átomos/ cm^3): $E=N \cdot \sigma$. La unidad es el cm^{-1} .

Como el neutrón solo puede interactuar con un núcleo mediante scattering o mediante absorción, la sección microscópica total será la suma de la sección microscópica de absorción más la sección microscópica de scattering ($\sigma_T = \sigma_A + \sigma_S$) [5].

2.5. Moderación de neutrones

Los neutrones que provienen de la fisión inmediatamente empiezan a ralentizarse como consecuencia de numerosas colisiones. Llega un punto en el que la energía de estos neutrones es casi igual a la de las moléculas presentes en el medio donde se haya producido la reacción de fisión. Esta energía es del orden de 0.025 eV a 20 °C y se le suele llamar energía térmica, y estos neutrones pasan a ser neutrones térmicos.

Un buen moderador reduce significativamente la velocidad de los neutrones con un número pequeño de colisiones, pero no tiene que absorberlos en un grado significativo. Por tanto, el moderador ideal debe poseer las tres propiedades siguientes:

- Amplia sección eficaz para las reacciones de scattering (colisiones).
- Sección eficaz pequeña para las reacciones de absorción.
- Elevada pérdida energética en cada colisión.

2.6. Detección de neutrones térmicos

Generalmente, la técnica para detectar neutrones térmicos es mediante reacciones nucleares que dan como resultado partículas cargadas como protones, partículas alfa, etc. La energía de estas reacciones puede ser medida mediante un detector de radiación. Entonces, cada tipo de detector combina un material (material de llenado del detector) que después de interactuar con el neutrón llevará a cabo una reacción determinada, la energía de la cual puede ser capturada mediante un detector de radiación [6].

Cuando se buscan reacciones que sean de utilidad varios factores deben considerarse:

- Primero de todo la sección eficaz de la reacción debe ser elevada, para que detectores eficientes puedan construirse en pequeñas dimensiones.



- Por otro lado, la abundancia isotópica dicho nucleido en el elemento natural debe ser elevada en el elemento natural.
- Además, en muchas reacciones los rayos gamma están siempre presentes junto con neutrones. Entonces es importante poder discriminarlos durante el proceso de detección.

En la reacción lo más importante la energía liberada, es el llamado valor Q de la reacción. Cuanto más elevada sea esta, mejor ya que los productos poseerán más energía y será más fácil distinguir los rayos gamma usando una simple discriminación de amplitudes.

En general, todas las reacciones son lo suficientemente exotérmicas como para que la energía cinética de los productos esté determinada por el valor Q de la reacción. Si se quiere capturar la energía cinética de los productos al completo, el volumen activo del detector debe asegurar la detención completa de las partículas y que éstas depositen su energía en el material de llenado. Esta operación resulta más fácil cuando el material de llenado del detector está en estado sólido que en estado gas [6]. La respuesta para un detector ideal sería similar a la siguiente gráfica:

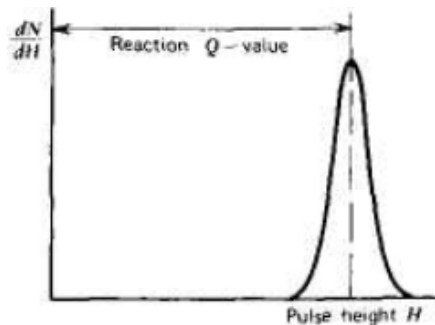


Figura 2: El pulso energético se produce justo en el valor Q de la reacción

Sin embargo, en realidad pasa algo diferente. Lo más común es que un número significativo de eventos inducidos neutrónicamente no deposite toda la energía cinética al completo. A esta gráfica se le habría de añadir un continuo de energías menores (eventos en los que no se ha depositado toda la energía al completo), es decir a la izquierda del pulso principal de la reacción. Algunos ejemplos de reacciones comunes son $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, $^6\text{Li}(n,\alpha)$, $^3\text{He}(n,p)$, reacciones de fisión inducidas por neutrones, etc.

Según la reacción que se lleve a cabo y cómo se deposite el material en el detector existen diferentes tipos de detectores. Por ejemplo, el material se puede encontrar en estado gas dentro de un tubo o bien se puede encontrar recubriendo las paredes del tubo en estado

sólido. El detector del que dispone el laboratorio pertenece al primer ejemplo mencionado. Es un contador proporcional basado en ^3He y se basa en siguiente reacción:

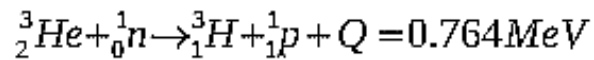


Figura 3: El Helio al ser bombardeado por un neutrón térmico resulta en una molécula de tritio (hidrógeno formado por 2 neutrones, 1 protón y un electrón) y un protón. Éstos disponen de las siguientes energías cinéticas: $E_p = 0.573\text{ MeV}$ y $E^3\text{H} = 0.191\text{ MeV}$. Y la suma de estas es la energía liberada en dicha reacción (Q), si ambos productos se paran al completo.

Al tratarse de un gas noble, el Helio, el material debe estar en estado gas dentro del tubo. Lo que esperamos que ocurra dentro del detector es que cada reacción deposite una energía de 764 keV sobre el gas. Sin embargo, las dimensiones del tubo juegan un papel muy importante ya que se produce el efecto pared:

- Si las reacciones ocurren lo suficientemente alejadas de la pared del detector la energía cinética se depositará al completo a través del gas.
- Si el tubo no es lo suficientemente grande comparado con el rango de productos algunos eventos, estos ya no depositarán toda la energía de la reacción en el gas. Lo que pasa es que alguno de estos choca con la paredes y pulsos de menor energía aparecerán en el espectro (correspondientes a las energías cinéticas o bien del protón o del tritón). Por ejemplo, si el tritón choca contra la pared, será el protón el que depositará toda su energía en el gas. Si en cambio es el protón el que choca contra la pared será el tritón el que deposite su energía. Es por esto que, el espectro esperado para un detector de un tamaño típico, tiene un pico en en 764 keV. Además, debido al efecto pared, vemos otros dos picos que se corresponden a las energías cinéticas de protón (573 keV) y del tritón (191 keV).

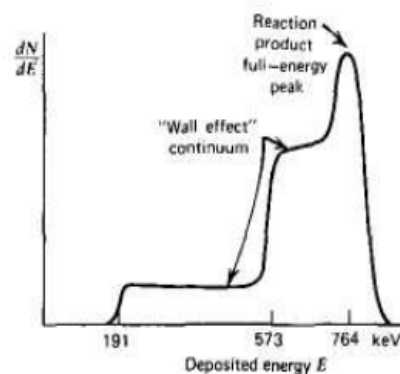


Figura 4: Espectro típico de un detector de He3 con un efecto pared significativo.



2.7. Detección de neutrones rápidos

El tipo de detectores mostrado hasta el momento sólo sirven para detectar neutrones térmicos. Entonces, ¿Cómo se pueden detectar neutrones con energías mayores?

Una de las maneras más comunes se basa en la moderación de neutrones. Si el detector se recubre de un material hidrogenado (polietileno por ejemplo), como mencionado anteriormente eficaz para atenuar neutrones, será posible detectar neutrones con mayor energía. Estos neutrones sufrirán un número de colisiones (scattering) antes de penetrar en el detector, y como consecuencia perderán parte de la energía cinética que llevan. Entonces, algunos ya podrán ser detectados por el detector.

Es muy importante controlar el grosor de esta capa de material hidrogenado. Si se hace muy gruesa se corre el riesgo de que el neutrón ni si quiera sea capaz de llegar al detector. Además, como la sección eficaz para las reacciones de absorción es mayor para energías menores, cuanto mayor sea el grosor mayor es la probabilidad de que ocurra la absorción neutrónica. Consecuentemente, dependiendo de la energía del neutrón será interesante usar un grosor u otro. Por ejemplo, para detectar energías del orden de keV unos pocos centímetros ya bastan. Pero si se quieren detectar energías del orden de MeV el espesor deberá ser del orden de decenas de cm.

Los investigadores Bramblett, Ewing y Bonner [6], con el objetivo de desarrollar un espectrómetro neutrónico (capaz de detectar todos los tipos de energías) investigaron el efecto de situar el detector en el centro de esferas moderadoras de polietileno de diferentes diámetros. El comportamiento general de estos detectores se puede ver en la siguiente figura:

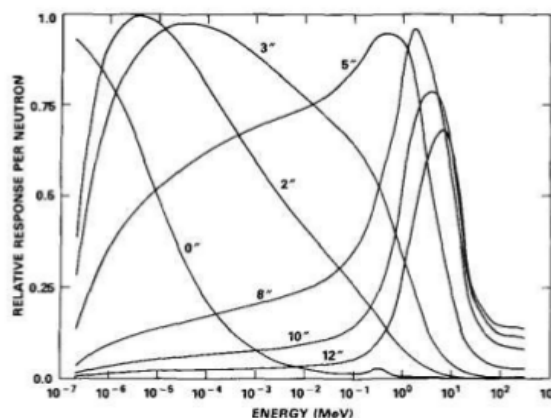


Figura 5 : Se observa la dependencia energética (eje X) para la eficiencia de detección relativa para detectores de varios diámetros (esferas de Bonner) [6]

La diferencia que vemos en la posición de los máximos en cada curva sirve como base para usar un set de esferas de diferentes tamaños como un simple espectrómetro neutrónico. Este sistema de moderadores esféricos es generalmente conocido con el nombre de Bonner spheres, haciendolo referencia a uno sus autores.



3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN

El sistema de detección que se desea caracterizar está formado por ocho detectores diferentes. El equipo de detección está formado por los siguientes elementos: el contador de neutrones térmicos, ocho detectores diferentes (cinco son una combinación detector-moderador de material plástico, otro rodeado en una lámina de cadmio, otro envuelto por un conversor de plomo y por último el detector sin nada. Todos estos elementos se explicarán con detalle en este capítulo. También se realizará una breve descripción del funcionamiento del equipo electrónico del laboratorio.

3.1. Detector del laboratorio de física nuclear y equipo electrónico del laboratorio.

Se trata de un tubo contador de neutrones modelo LND basado en el conador proporcional de ^3He . Sus características se muestran en la siguiente tabla:

Nombre	Presión de trabajo [atm]	Diámetro interior [cm]	Longitud activa [cm]	Longitud total [cm]	Diámetro exterior [cm]	Voltaje aplicado [V]
LND 252289	10	2.54	5.13	12.6	2.75	1100



Imagen 1: Detalle del contador de neutrones térmicos

A partir del equipo electrónico del laboratorio podemos visualizar e interpretar las señales que detecta el detector de radiación. El tubo de Helio funciona aplicándole una diferencia de potencial de 1100V y a partir de un sistema de procesamiento de pulsos se pueden registrar las señales provenientes del detector. Concretamente se usa un preamplificador y posteriormente un amplificador. La salida del amplificador es un pulso lineal cuya amplitud lleva la información de interés. Estas señales se pueden almacenar en un sistema de registro MCA (ordenador) para posteriormente poder ser analizadas.

3.2. Sobre los cinco detectores contador-moderador

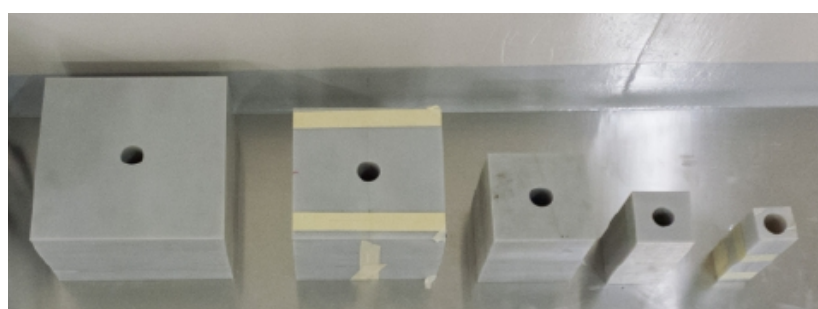
Se trata de cinco matrices moderadoras rectangulares. Todas poseen una longitud de 15 cm y una cara cuadrada de diferentes dimensiones: 4.5x4.5 cm², 7x7cm², 12x12cm², 18x18cm² y 22.5x22.5cm². Se llevaron a construir en el CERN y de ahora en adelante las se les llama detectores nTOF.

Es en la cara cuadrada, ver Ilustración 8, donde está situado el agujero circular, de profundidad 11,5 cm, por donde se introduce el detector de radiación. En la siguiente tabla se muestran las medidas para cada moderador.

Moderador	Lado 1 [cm]	Lado 2[cm]	Altura [cm]	Profundidad orificio [cm]	Diámetro orificio [cm]
4,5x4,5	4.48	4.45	14.99	11.43	2.75
7x7	6.80	6.90	14.99	11.45	2.72
12x12	11.99	11.91	14.91	11.43	2.67
18x18	18.00	18.00	15.00	11.49	2.79
22x22	22.41	22.50	15.00	11.54	2.72

Tabla 1: Dimensiones de cada moderador nTOF

Como explicaremos más adelante, las primeras medidas experimentales se llevaron a cabo usando estos cinco detectores. Estas medidas fueron realizadas en mayo de 2016 en el LIN y se explicarán con más detenimiento en el capítulo 4.



22.5 x 22.5 18 x 18 12 x 12 7 x 7 4.5 x 4.5

Imagen 2: Los cinco detectores nTOF ordenados por tamaño

Por otro lado, es en esta etapa del trabajo es donde nos surge la gran incógnita que ha ocupado la mayor parte del presente estudio. Pues, normalmente si se habla de polietileno puro el material suele ser de color blanco y un tanto translúcido. Sin embargo, como se puede apreciar en las imágenes el color del material es más bien grisáceo cosa que genera la sospecha de que pueda contener otro elemento adicional. Normalmente, cuando se añade un agente colorante es para indicar la presencia de Boro. [7]



Generalmente, si se añade Boro en una proporción superior al 5% el objetivo principal es el de blindaje radiológico, ya que el boro posee una elevada sección eficaz para la captura neutrónica. [8].

En el polietileno borado el boro se mezcla de manera homogénea con el HDPE durante el proceso de fabricación y normalmente se añade a partir de un compuesto. Este suele ser carburo de boro o óxido bórico [7].

3.3. Detector rodeado de Cadmio natural, conversor de Plomo y detector desnudo.

Adicionalmente de las medidas de los cinco moderadores, se han realizado medidas experimentales, en el laboratorio de instrumentación de física nuclear, para tres tipos de detectores diferentes. Realizadas en mayo 2018 en el LIN se encuentran explicadas en el capítulo 4 también.

El primero se trata de un detector rodeado de una lámina de Cadmio de 1 mm de grosor (Imagen 2). Este elemento se emplea con gran eficacia para blindaje contra neutrones térmicos, ya que posee una gran sección eficaz para la absorción de neutrones térmicos.

El segundo es un detector envuelto por un un conversor de plomo. La función de este conversor es básicamente transformar (de aquí el nombre de conversor) energías neutrónicas elevadas a energías neutrónicas térmicas. Entonces, en este caso el detector podrá detectar neutrones con alta energía. El montaje realizado para obtener esta protección es el siguiente: la coraza de plomo (de 2 cm de grosor) se sitúa alrededor de la matriz nTOF 18x18cm² y luego se vuelve envuelve con polietileno puro (2.5 cm de grosor) . Se muestra en la Imagen 1.

Finalmente, se estudiará también el comportamiento del detector desnudo, es decir sin nada. Con estos tres detectores más ya completamos el sistema de detección formado por ocho detectores.

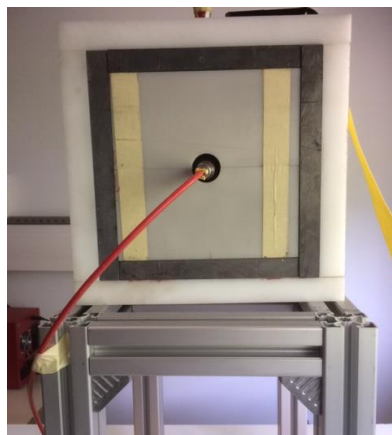


Imagen 3: Vista frontal del detector con conversor de plomo

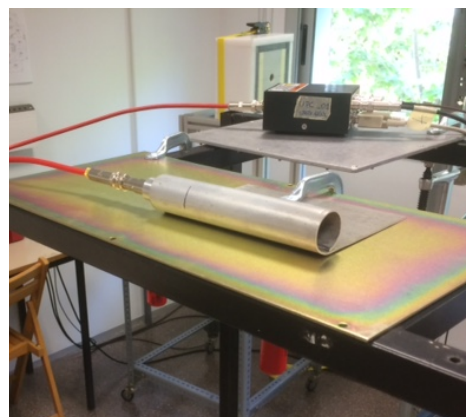


Imagen 4 : Envoltorio de Cadmio

3.4. Procedimientos para identificar la posible presencia de boro

Volviendo al tema de los detectores nTOF, después de la sospecha de que pudiesen contener Boro y además sin disponer de ninguna ficha técnica sobre su material se han llevado a cabo diferentes métodos de análisis.

3.4.1. Análisis de densidades

Con el objetivo de determinar si realmente los moderadores nTOF poseían boro primero se realizó un análisis de densidades para cada tamaño. Se usó el material de metrología del laboratorio de instrumentación nuclear para realizar las mediciones geométricas. También, se han usado las básculas, localizadas en el INTE con el objetivo de medir las masas con la mayor precisión posible. El resultado es el siguiente:

Moderador	Vtotal [cm ³]	Masa [g]	Densidad [g/cm ³]
4,5x4,5	230.95	230.5	1.00
7x7	636.80	651.9	1.02
12x12	2065.16	2048.0	0.99
18x18	4789.75	4728.2	0.99
22x22	7496.32	7060.0	0.94
Densidad media PE borado [g/cm ³]			0.99
Densidad efectiva PE borado [g/cm ³]			0.97

Tabla 2: Densidad media: se ha realizado la media aritmética de las 5 densidades calculadas previamente. Densidad efectiva: se han sumado por separado las masas y se han dividido entre la suma de volúmenes

Como se puede observar existe una gran disparidad entre las densidades de cada moderador. Este factor se atribuye mayoritariamente a varios factores como: geometrías complejas y difíciles de medir con exactitud, la precisión de la masa medida disminuye al aumentar el volumen del moderador (se ha de usar otra báscula de menos precisión), posibles errores geométricos en las piezas (cilindricidad, paralelismo, etc.) que llevan a errores en el cálculo del volumen, presencia de rebabas o redondeos, etc.

Consecuentemente el error que poseen estos cálculos es elevado, cosa que también se puede



Imagen 5: Medición de las dimensiones de los detectores



apreciar por la diferencia significativa entre la densidad media y la densidad efectiva. La efectiva tiene en cuenta el error de cada densidad medida. Así pues la densidad efectiva es inferior a la densidad media ya que la pieza con más error es la más grande (22,5x22,5) y es la que posee la densidad media más baja.

De todas maneras, a pesar de las inexactitudes es importante apreciar que esta densidad es más elevada que la de un polietileno convencional, que oscila entre 0.94 y 0.97 g/cm³.

Así pues, con el objetivo de minimizar el error se procedió a medir la densidad para 4 piezas extraídas de estos moderadores de geometrías más manejables y de menor masa. Se trata de dos cilindros interiores a dos moderadores (que funcionan como 'tapa') y las dos mitades de la matriz más pequeña. Los resultados de de este segundo cálculo se muestran en la siguiente tabla:

	Volumen [cm ³]	Masa [g]	Densidad
Cilindro 1	21.52	21.07	0.979
Cilindro 2	21.34	20.96	0.982
Mitad 1	108.35	104.70	0.966
Mitad 2	107.69	104.30	0.969
Densidad media [g/cm ³]			0.974
Densidad efectiva [g/cm ³]			0.970

Tabla 3: Densidades para los dos cilindros y las dos piezas rectangulares

Finalmente, se decidió tomar como buena la media resultante de 0.974 g/cm³, al diferir en las milésimas de la densidad efectiva y sigue siendo más elevada que la del polietileno convencional.

Adicionalmente se han calculado las densidades para el material de dos planchas del laboratorio de instrumentación, que éstas si que se sabe que son de polietileno puro. La razón de este cálculo es que de este material sí que disponemos de ficha técnica, concretamente estas planchas poseen una densidad nominal de 0.95 g/cm³. Además, observando la diferencia entre la densidad calculada y la nominal nos hacemos una idea del error que podamos estar cometiendo. Se cogieron 4 planchas rectangulares, también de fácil medición y de poca masa. La densidad resultante es de 0.952 g/cm³. Los cálculos realizados están en en el Anexo 1.

3.4.2. Análisis químico-superficial

Con la ayuda de un miembro del equipo, se pudo determinar el % atómico de los elementos que pueda contener el material mediante EDS. Esta es una técnica de análisis químico-superficial basada en la espectrometría de dispersión de energía de rayos X.

Se analizaron tres muestras: la primera es una muestra que no contiene boro (M1), procedente de una pieza de polietileno puro del LIN. Las otras dos muestras proceden de los detectores nTOF. Sorprendentemente en una de las muestras de los detectores (M2) se ha encontrado un 0.5 % de boro pero en la otra muestra (M3) no se ha encontrado boro. Los resultados de este análisis químico se muestran en la siguiente tabla:

Muestra	Elemento	% Concentración Atómica
M1	Carbono	93,0
	Oxígeno	7,0
M2	Carbono	91,7
	Oxígeno	7,8
	Boro	0,5
M3	Carbono	95,8
	Oxígeno	4,2

Tabla 4: Resultados del análisis superficial

No se sabe exactamente si la inconsistencia de este resultado se debe a que una de la muestra pudiera estar más sucia que la otra, o a la localización que puedan tener dentro de los detectores. De todas maneras, aún es una incógnita que está por resolver y se cree que a través de simulaciones se pueda ajustar el porcentaje de Boro con exactitud.

3.4.3. Aproximación de la concentración de boro a partir de la densidad calculada

Tomando como referencia la segunda densidad calculada, de 0.974 g/cm³, se realiza un cálculo aproximado del porcentaje de boro que pueda contener nuestro material. Normalmente, el boro se suele incorporar al polietileno en forma de de óxido de boro (B₃O₂) o de carburo de boro (BC₄) [9]. Para estimar la posible presencia de boro en el material se ha llevado a cabo el siguiente proceso:

1. Se han escogido tres densidades convencionales de PE de 0.94, 0.95 y 0.97 g/cm³.



2. Para cada una de ellas se ha calculado la fracción de óxido y de carburo de boro (α). Esta se ha calculado usando la siguiente fórmula [10]:

$$\rho_{total} = \frac{M_{total}}{\frac{\alpha \times M_{total}}{\rho_a} + \frac{(1-\alpha) \times M_{total}}{\rho_b}}$$

Donde:

M_{total} es la masa total, se anula porque está tanto en el denominador como numerador

ρ_{total} es la densidad total que en nuestro caso vale 0.974 g/cm³

ρ_a es la densidad de B₃O₂ o de BC₄ que puede valer 2.47 g/cm³ y 2.52 g/cm³ respectivamente

ρ_b es la densidad de polietileno puro que puede valer 0.94, 0.95 o 0.97 g/cm³

alfa es la fracción de B₃O₂ o de BC₄ en el material.

De aquí se encuentra el factor alfa que es justamente la fracción en que dicho compuesto (óxido de boro o carburo de boro) colabora en la densidad total del material.

3. Entonces, sabiendo la relación estequiométrica del boro en cada uno de ambos compuestos se ha calculado el porcentaje de boro en el material en función de la densidad de polietileno escogida y en función del compuesto escogido.

Los resultados se pueden ver en las siguientes tablas, donde se recogen los valores numéricos de los datos utilizados, y también podemos observar el correspondiente gráfico.

DATOS	
Densidad de nuestro material (experimental) [g/cm ³]	0.974
Densidad PE I [g/cm ³]	0.94
Densidad PE II [g/cm ³]	0.95
Densidad PE III [g/cm ³]	0.97
Densidad Óxido de Boro [g/cm ³]	2.46
Densidad Carburo de Boro [g/cm ³]	2.52
Fracción estequiométrica de Boro en B ₂ O ₃	0.3106
Fracción estequiométrica de Boro en B ₄ C	0.7826

Tabla 5: Datos utilizados para el cálculo del porcentaje de Boro

Densidad PE [g/cm ³]	% de Óxido de Boro	% de Boro para Óxido de Boro
0.95	5.65%	1.75%
0.96	4.01%	1.25%
0.97	0.68%	0.21%
Densidad PE [g/cm ³]	% de Carburo de Boro	% de Boro para Carburo de Boro
0.95	5.57%	4.36%
0.96	3.96%	3.10%
0.97	0.67%	0.52%

Tabla 6: Cálculo de la fracción de Boro para cada compuesto y para cada densidad

Se ha puesto mucho énfasis en la densidad del material porque es necesario de cara a realizar una simulación acorde con la realidad de nuestro sistema de detección. Por lo tanto este parámetro es esencial para la caracterización del sistema, y por lo tanto para el objetivo principal del trabajo.

Porcentaje de Boro en función del compuesto escogido y en función de la densidad de polietileno

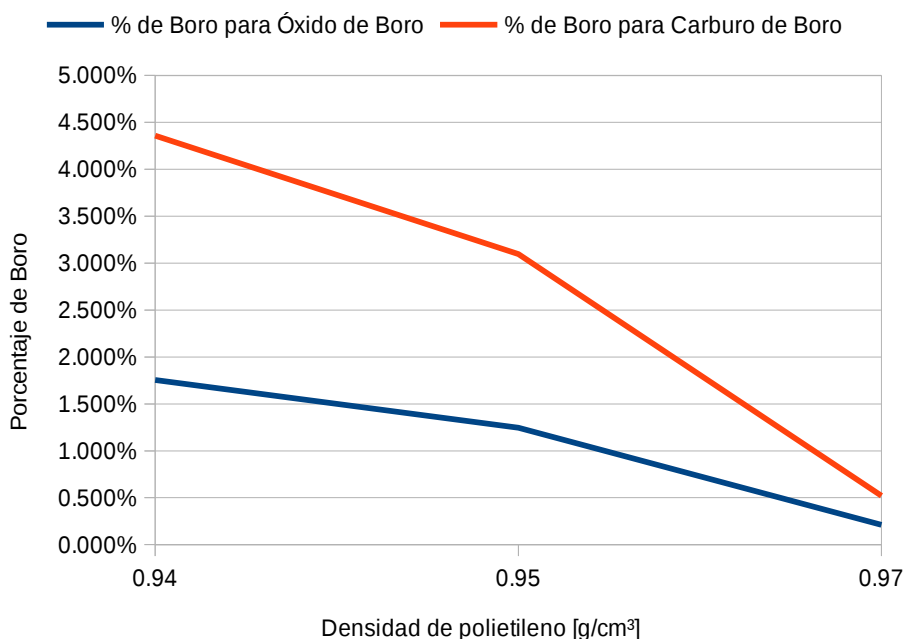


Gráfico 1: Porcentaje de Boro en función de la densidad de PE para cada compuesto



4. **CÓDIGOS DE CÁLCULO DE EFICIENCIAS Y ANÁLISIS DE DATOS**

Con el objetivo de determinar las respuestas, eficiencias, de los detectores y otros parámetros como las intensidades de las fuentes se han realizado un conjunto de simulaciones Monte Carlo. Entonces, es conveniente introducir en qué consisten como también explicar el concepto de eficiencia de un detector. A lo largo del trabajo también se han usado otros soportes de ayuda informática, los cuáles también se describirán brevemente.

4.1. **Simulaciones Monte Carlo: GEANT4**

Para describir el comportamiento de los neutrones en un medio cualquiera existen dos posibilidades. Una aproximación consiste en describir la componente dinámica global de la población de neutrones considerada como entidad estadística. En términos de probabilidad y a través de una ecuación de transporte se puede expresar la manera en la que los neutrones nacen, se propagan y mueren. Otra posibilidad, la usada en el presente estudio, es usar el método Monte Carlo. Esta consiste en seguir el neutrón sobre la base de las leyes mecánicas del movimiento. [11].

El método Monte Carlo permite simular procesos de tipo aleatorio y está bastante bien adaptado a este tipo de fenómenos. Hoy en día se dispone de varios códigos de simulación por Monte Carlo, el que se usará será GEANT4. Así pues, todas las simulaciones del trabajo a partir del paquete de librerías C++ GEANT4 en el que se pueden construir códigos específicos. Basada en el método Monte Carlo, esta herramienta nos permite realizar una simulación del paso de partículas a través de la materia [12].

4.2. **ParticleCounter**

Adicionalmente, el Laboratorio de Instrumentación Nuclear de la facultad ha desarrollado un código llamado ParticleCounterV02 [13] que basado en las librerías de GEANT4 y permite realizar las simulaciones de los ocho detectores de estudio. Gracias a este código las características de cada situación pueden ser modificadas de manera fácil y rápida. También es posible realizar una visualización y consecuentemente se puede validar por ejemplo, las geometrías de lo que GEANT4 va a simular.

Este código necesita varios archivos básicos para su funcionamiento (ver Anexo 2) Modificando los parámetros contenidos en estos archivos se puede cambiar la geometría

del objeto de estudio, su posición en la sala, la temperatura de la sala, la densidad del material usado, la energía de la partícula emitida, el espectro de la fuente, el tipo de detector, el número de eventos a lanzar, etc.

Debido a la necesidad de estudiar la fracción de Boro en el material hubo que implementar una extensión al código. Este, llamado ParticleCounterVexp, permite además de todo lo nombrado anteriormente, incluir el porcentaje en peso de boro que contribuye a la densidad del material. Variando este parámetro, y como veremos en los próximos capítulos, determinaremos la fracción de Boro que contiene el material.

En definitiva, las simulaciones aportadas por estas herramientas son esenciales para realizar el presente estudio y realizar el cálculo de eficiencias. Généricamente la eficiencia de detección se define como la probabilidad de que un espectrómetro detecte la radiación que le llega. En el presente trabajo esto se traduce al número de cuentas por unidad de neutrones que han atravesado el volumen del detector.

De esta manera, la eficiencia se ha calculado de la siguiente manera: a partir de un número de eventos (concretamente neutrones, el cual se inicializa en el valor deseado a partir del código) el programa realiza la simulación. Es decir, a partir de Monte Carlo, simula el comportamiento de estos neutrones dentro del volumen activo del detector (choques, absorciones...). Y también calcula el número de neutrones detectados por detector (cuentas). El cálculo de la eficiencia se ha realizado como el cociente entre el número de cuentas (eventos detectados) y el número de neutrones iniciales. Se mide en cuentas por neutrón (cpn). La siguiente ecuación muestra el cálculo genérico:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{número de eventos detectados}}{\text{número total de eventos}}$$

En estas simulaciones se han llevado a cabo diferentes hipótesis con tal de simplificar la realidad. Primero de todo se ha trabajado, en la mayoría de casos y aunque nos pueda llevar más tiempo, con una fuente que emite neutrones en 4pi direcciones, es decir en todo el espacio. Segundo, cuando se ha simulado la fuente de Californio252 y la de Americio-Berilio241 se han usado espectros que ya estaban estandarizados y que procuran ser lo más preciso con las energías de los neutrones que realmente emiten estas dos fuentes [18a]. Finalmente, hay factores que la simulación no puede abarcar, como el scattering, el llamado fondo, etc. Estos conceptos se introducirán en el siguiente capítulo.

El objetivo de las simulaciones es la obtención de unas eficiencias con una incertidumbre



relativamente baja. Cuantos más eventos se procesan más estadística obtendremos, y menor error en la simulación, ya que se detectarán más eventos. Consecuentemente, como que el tiempo que tarda en realizarse una simulación es proporcional al número de eventos a simular, la parte de simulación ha llevado una buena parte del tiempo del estudio. En cierto punto se han tenido que usar ordenadores de cálculo potentes.

Finalmente, se han implementado códigos y templates que ayudan tanto a realizar el cálculo de la simulación como a extraer los datos calculados de una manera más sistemática. Complementados con plantillas en hojas de cálculo excel que facilitan los cálculos de las eficiencias y sus respectivos errores (ver Anexo 3).

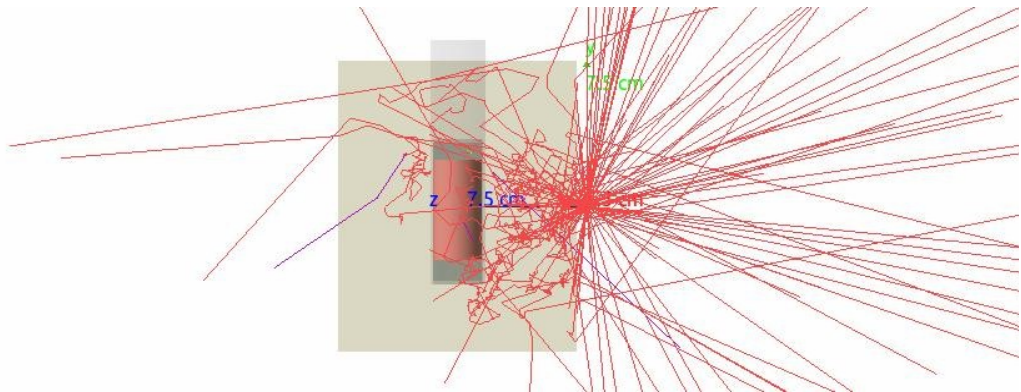


Figura 6: Visualizador de ParticleCounter para el moderador 12x12 cm² usando una fuente 4pi situada en una de las caras laterales del moderador. Géant4 realiza el cálculo de las trayectorias que seguirá cada neutrón (líneas rojas) y calcula cuantos de estos han llegado al detector, es decir, se han detectado

4.3. ROOT

Desarrollado por el CERN, se trata de un programa escrito en C++ que permite realizar análisis estadísticos de datos gran escala [14]. Permite también la visualización de datos y su proceso. Los archivos de las mediciones se han analizado a partir de este software.

5. MEDIDAS EXPERIMENTALES

5.1. **Medidas de la tasa de conteo en el LIN. Mayo 2016**

5.1.1. Consideraciones previas

Durante el mes de mayo de 2016 se llevaron a cabo las medidas experimentales para los cinco detectores nTOF. Tuvieron lugar en el laboratorio de instrumentación nuclear de la facultad y su objetivo era el de determinar la tasa de conteo total o 'rate' para cada combinación detector-moderador correspondiente. La tasa de conteo del detector corresponde al número de neutrones detectados unidad de segundo, cuentas por segundo (cps). En la presente memoria se calcula como:

$$tasa\ de\ conteo = \frac{número\ de\ cuentas}{tiempo\ vivo\ de\ experimentación}$$

Así pues, se realizaron un total de diez medidas, empleando el equipo electrónico explicado en el capítulo dos. Cinco de ellas consisten en el detector (se dispone de cinco diferentes) y la fuente de Californio-252 situada en una de las caras laterales del detector, más adelante se explicará detalladamente el montaje. Las otras cinco medidas consisten en el detector pero está vez sin fuente, con el objetivo de medir el famoso 'background' o fondo.

Se le llama fondo a la existencia natural de radioactividad en el ambiente [6]. Todos los detectores siempre detectarían algo de este llamado fondo. La naturaleza del fondo depende mayoritariamente del tamaño y tipo de detector, es decir, del tipo de matriz moderadora. En nuestro caso tomaremos una medida de fondo constante para cada matriz. La magnitud de este parámetro determina el nivel mínimo de radiación detectable por el detector que puede llegar a ser significativo en aplicaciones que incluyan fuentes de baja actividad, precisamente nuestro caso. Diversas razones provocan que este fenómeno esté siempre presente. Entre algunas ellas encontramos:

- La radiactividad natural de los materiales que constituyen el propio detector
- La radiactividad natural de los materiales que constituyen el espacio donde se realiza la medida como por ejemplo las estructuras de soporte, materiales que se hallan en su proximidad, materiales de construcción del propio laboratorio, etc.



- Radiación proveniente de la superficie terrestre, llamada radiación terrestre.

Por lo tanto, como el objetivo principal de estas medidas es el de determinar la tasa de conteo total [medida en cuentas por segundo] para cada detector, es necesario realizar el cálculo de la tasa de conteo de la fuente + fondo y la tasa de conteo solo para el fondo. Restando estos dos parámetros se obtiene la tasa de conteo total para cada moderador.

5.1.2. Montaje experimental

Para situar cada combinación moderador-detector se utilizaron estructuras metálicas de soporte como las mostradas en la Imagen 6. La intención es que éstas sean altas y delgadas, y a la vez robustas, con la intención de afectar lo menos posible al comportamiento del detector.



Imagen 6: Estructuras de soporte utilizadas en el LIN

Con afectar lo menos posible al detector nos referimos principalmente a intentar reducir la componente de scattering, que afectará al conteo del detector. El scattering se produce principalmente por el rebote de los neutrones provenientes de la fuente, con las paredes, suelo, techo y otras estructuras de la sala. Como se puede observar, en las instalaciones de la facultad la presencia de scattering es inevitable, pero conviene minimizarla. Por esta razón la altura donde situar el detector es un parámetro de gran

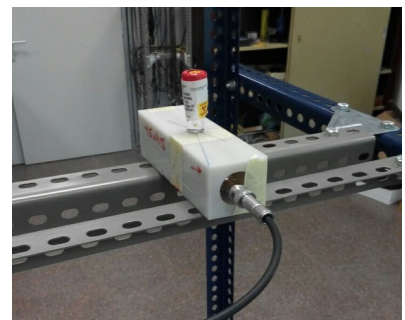


Imagen 7: Detalle del montaje para la matriz 4,5x4,5 con la fuente de ^{252}Cf

importancia. El montaje deberá estar situado a una altura que corresponda más o menos a la mitad de la altura total del laboratorio, es decir a igual distancia del techo que del suelo. También conviene que el montaje esté centrado en la sala de experimentación.

Para las medidas que incluyen la fuente de californio, está se situó, de la misma manera para cada detector: en el centro de una de las caras laterales (ver Imagen 7). En las medidas que no incluyen la fuente, simplemente se debe guardar dicha fuente y realizar la medida sin ella.

5.1.3. Reordenación de datos y análisis con ROOT

Las medidas fueron recopiladas en diez archivos ASCII en los que aparecía el nombre aparecía de la siguiente manera: *nTOFarray_meas01Jun16*. Es decir, se muestra el número de la medida y la fecha en qué fue realizada la medida. Cada identificador corresponde a una medición experimental determinada, es decir, para cada detector y una situación diferente (con o sin fuente). En cada línea de estos archivos hay un número, que corresponde al número de cuentas, para un canal determinado (anexo 4).

Por eso, el primer paso del análisis es realizar el histograma para cada archivo, a través de la herramienta ROOT. Este histograma muestra el número de cuentas en función del canal. Como podemos ver al principio del histograma hay un número elevado de cuentas que se corresponde al ruido.

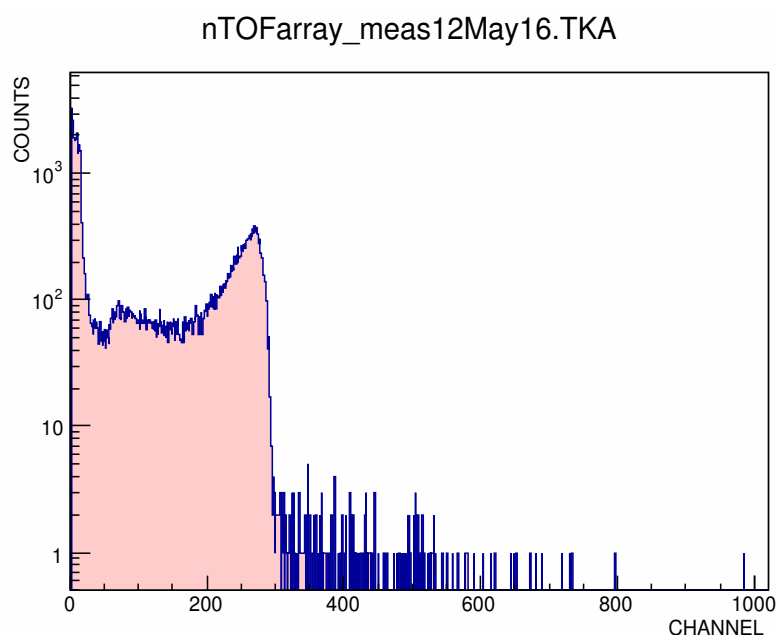


Figura 7: Histograma que muestra el número de cuentas en función del canal para un archivo determinado

El segundo paso es el de transformar cada uno de estos histogramas en otro en el que aparezca el número de cuentas en función de la energía. Simplemente a través de un factor corrector se puede modificar el eje horizontal de dichos gráficos. Es decir, si nos



remontamos al capítulo 1 (ver figura 4), en un contador proporcional de Helio 3 el pico de cuentas deberá estar alrededor del 764 keV. Por lo tanto, los picos que se ven en estos histogramas deberán estar situados en una energía de 764 keV.

Para realizar dicha transformación se multiplica el eje horizontal por el siguiente factor: $764\text{keV}/N_{\text{máx}}$. Donde $N_{\text{máx}}$ corresponde al valor del canal donde se halla el máximo del número de cuentas se encuentra el pico, por ejemplo en la imagen adjunta parece que está alrededor del canal 280.

Para ser más precisos y tener más estadística, a través de ROOT, se ha realizado la suma de todos los histogramas. Luego mediante un ajuste, concretamente usando la función gaussiana, se puede determinar el canal donde se encuentra el pico de cuentas. El resultado es el canal 270. Luego, se calcula el valor del factor corrector como $764/270=2.83$. Se utilizará el mismo factor para transformar cada archivo.

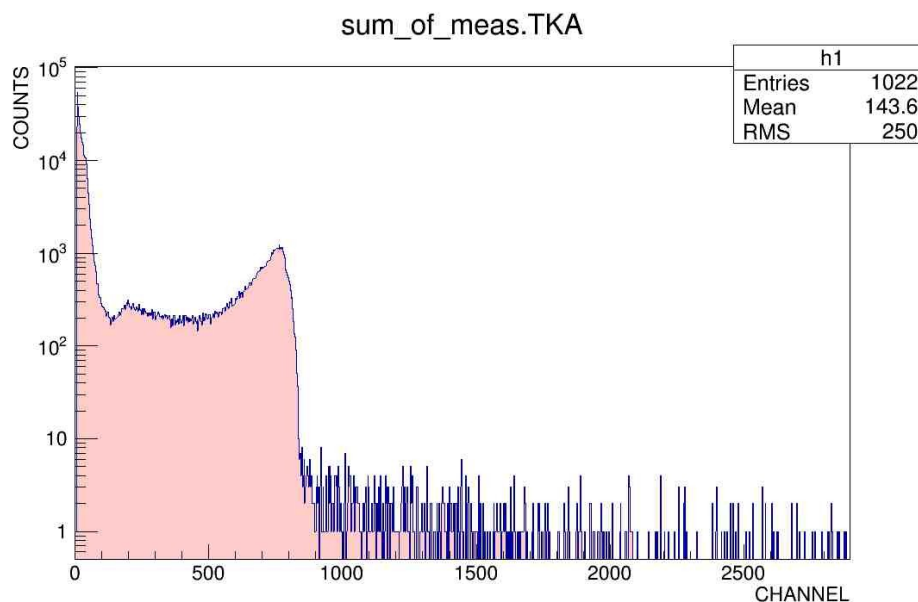


Figura 8: Resultado de la suma de histogramas para las diez medidas, usando ROOT

Finalmente, podemos transformar todos los histogramas para que en el eje horizontal nos aparezcan valores de energías. Después de la transformación, se realiza una acotación, con la intención de eliminar el ruido. Para todos los gráficos se ha acotado desde la energía de 160 keV hasta 840keV. Luego, se realiza la integral de la gráfica acotada y de esta manera obtenemos el número de cuentas para esa medida determinada.

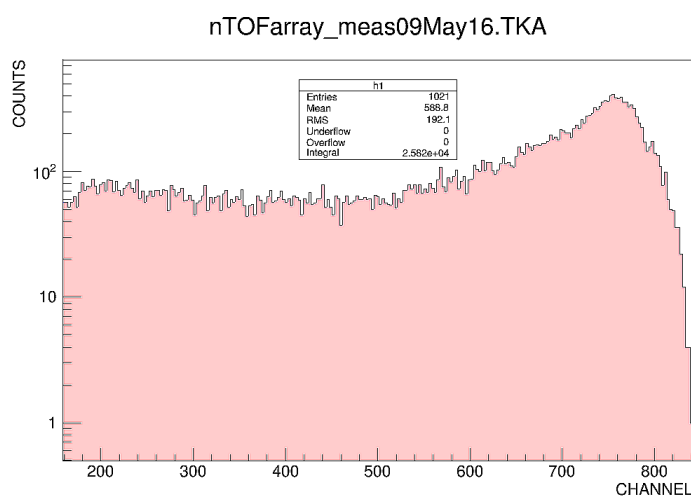


Figura 9: Acotación del histograma para una medida experimental. Haciendo la integral correspondiente se calcula el número de cuentas.

En cada archivo también aparece el tiempo vivo del experimento, entonces realizamos el cálculo de la tasa de conteo teniendo en cuenta la fórmula anterior. Los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Fuente 252Cf				
Matriz	Cuentas	Tiempo vivo [s]	Tasa [cps]	Error [cps]
4,5x4,5	1909	19684	0.097	0.0022
7x7	27410	92513	0.296	0.0018
12x12	25820	99663	0.259	0.0016
18x18	16730	150066	0.111	0.0009
22x22	8846	171813	0.051	0.0005

Tabla 7: Resultados de las tasas de conteo de las medidas con fuente

Background				
Matriz	Cuentas	Tiempo vivo [s]	Tasa [cps]	Error absoluto [cps]
4,5x4,5	1688	242189	0.0070	0.00017
7x7	967	182694	0.0053	0.00017
12x12	1150	320447	0.0036	0.00011
18x18	784	316721	0.0025	0.00009

Tabla 8: Resultados de las tasas de conteo para las medidas sin fuente

Total			
Matriz	Tasa total [cps]	Error absoluto [cps]	Error relativo
4,5x4,5	0.090	0.00223	2.47%
7x7	0.291	0.00180	0.62%
12x12	0.255	0.00162	0.63%
18x18	0.109	0.00087	0.79%
22x22	0.049	0.00055	1.12%

Tabla 9: Resultados de las tasas totales



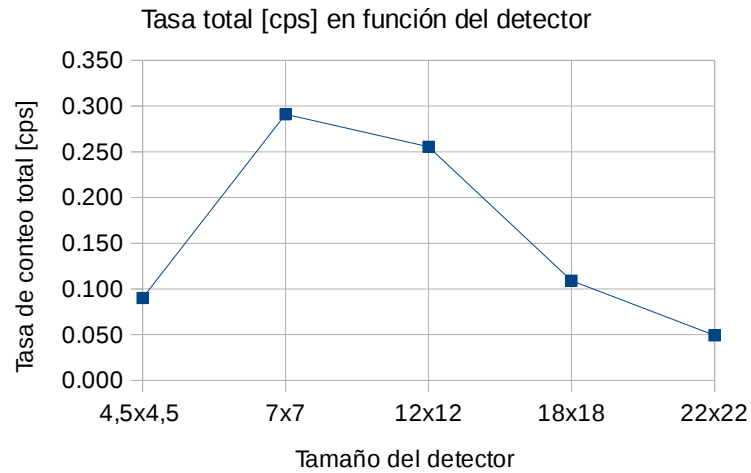


Gráfico 2: Representación de la tasa de conteo total en función del tipo de detector

5.1.4. Simulaciones con ParticleCounter

5.1.4.1. Simulaciones tomando como material polietileno puro

Después de haber obtenido las rates totales de manera experimental, se han realizado simulaciones para cada detector utilizando un espectro de Californio 252 simulando la fuente del laboratorio. Gracias a ParticleCounterV02 podremos simular cada situación.

Lo primero de todo es crear la geometría de cada pieza y verificar mediante el visualizador que sea correcta. (ver anexo 5). Para empezar se ha simulado cada detector utilizando una fuente esférica (4π) que se ha situado en el centro de una de las caras laterales del detector (tal y como se puso el día de la medida experimental). El espectro usado, tal y como se ha comentado, es el de Californio 252. Se ha intentado ser lo más fiel posible a la realidad estudiada. El material escogido, en esta primera tanda de simulaciones, es el polietileno pero cogiendo la densidad de 0.974 calculada de manera experimental.

Una vez hecha la preparación previa ya se pueden ejecutar las simulaciones. Los resultados para el cálculo de eficiencias se muestran en la siguiente tabla.

Matriz	Eventos [n]	Detectados [c]	Eficiencia [cpn]	Error absoluto [cpn]	Error relativo
4,5x4,5	33100000	66008	0.0020	8.0E-06	0.40%
7x7	9100000	78462	0.0086	3.1E-05	0.36%
12x12	9100000	106467	0.0117	3.6E-05	0.31%
18x18	12000000	75336	0.0063	2.3E-05	0.37%
22x22	18000000	59345	0.0033	1.4E-05	0.42%

Tabla 10: Resultado de las eficiencias para polietileno puro.

El objetivo de esta primera simulación es poder comparar estas eficiencias con la tasa de conteo experimental. Si suponemos que las rates experimentales siguen la siguiente ecuación: $R=I \cdot eff$. La tendencia de estas dos variables debería ser la misma ya que como la intensidad de la fuente es constante la relación entre estas dos variables debe ser lineal.

Por lo tanto si se plasman ambas variables, en función de cada detector, en un gráfico y se ajusta la escala la forma debería ser similar. Sin embargo, como se puede ver en la Imagen 18, esto no se cumple. Parece ser que entre los moderadores de 7x7 y 12x12 hay una inconsistencia entre la forma de ambos gráficos. ¿Qué está pasando?

Varias razones pueden explicar este fenómeno

- La principal razón es que no se está teniendo en cuenta la presencia del boro en el material. Es decir, se ha escogido como material el polietileno puro. Por lo tanto este factor seguro que está afectando al cálculo de eficiencias por simulación.
- Se ha de destacar que las tasas de conteo para el fondo son significativas en comparación a las tasas de conteo totales (ver tablas 6 y 7). Es decir, la fuente del laboratorio tiene una actividad relativamente baja, y consecuentemente, para obtener buenas estadísticas las medidas experimentales deberían durar más tiempo. Cosa que no sale rentable, ya que cuanto más tiempo se experimente el efecto fondo será más significativo. Entonces, las tasas obtenidas tienen una estadística relativamente baja.



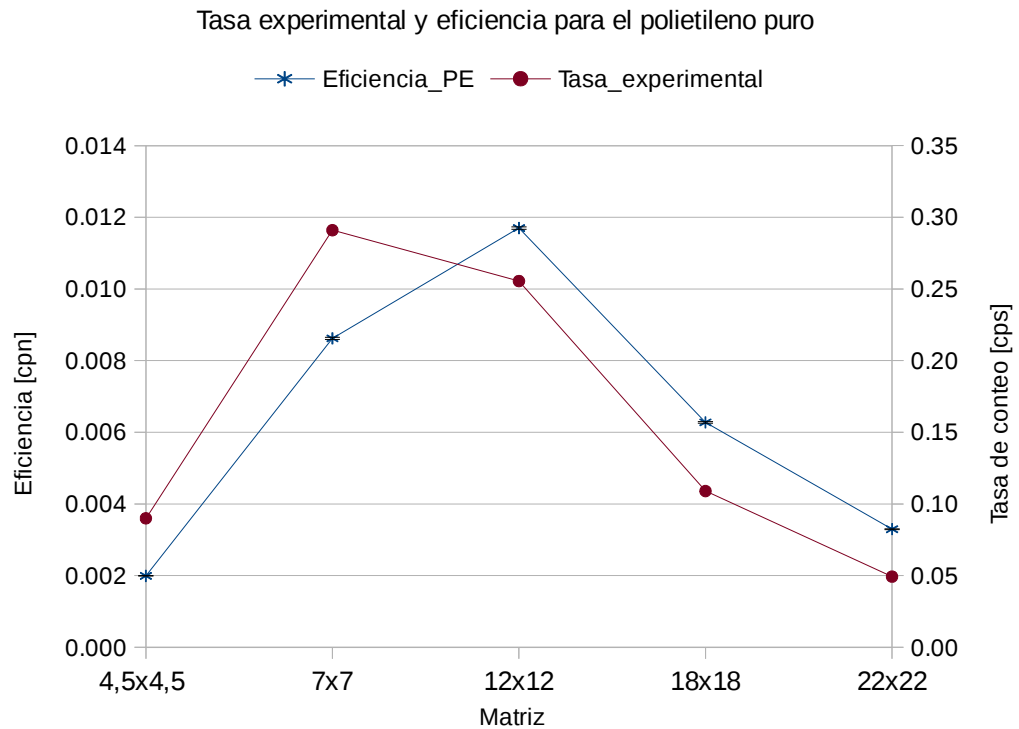


Gráfico 3: Gráfico donde se ven las tasas de conteo experimentales y las eficiencias calculadas por simulación, en función de la matriz moderadora.

Para comprobar que realmente el factor de boro está afectando al cálculo se realiza la siguiente comprobación: el cálculo de la intensidad de la fuente para cada caso. Pues esta debería ser constante, y entonces los resultados de este cálculo deberían fluctuar alrededor de un valor constante. Para realizar el cálculo simplemente despejamos I de la anterior ecuación usando los datos calculados experimentalmente y por la simulación.

Como que los experimentos se realizaron en días diferentes y como ya hemos visto en el capítulo uno, que la actividad de la fuente, al igual que su intensidad, disminuye de manera exponencial con el paso del tiempo también se empleará un factor corrector para ajustar el cálculo de esta intensidad.

Este factor corrector se ha calculado a partir de las características (constante de decaimiento, actividad inicial, factores de conversión, etc) de la fuente ^{252}Cf , mostradas en el Anexo 6. Así pues, se toma como fecha de referencia la de la primera medida experimental, que como vemos en la siguiente tabla corresponde con la matriz de 12x12. Las otras intensidades tendrán que dividirse por el factor corrector poder ser comparadas con la intensidad de referencia y comparadas entre ellas.

PE Matriz	Fecha_experimental	Dias	Factor corrector	Intensidad [n/s]	Error [n/s]
4,5x4,5	05/13/16	4	0.9971	45.27	1.12
7x7	05/12/16	3	0.9978	33.83	0.24
12x12	05/09/16	0	1.0000	21.84	0.15
18x18	05/10/16	1	0.9993	17.38	0.16
22x22	05/17/16	8	0.9942	15.04	0.19
MEDIA PONDERADA				20.76	
MEDIA ARITMÉTICA				26.67	

Tabla 11: Resultados del cálculo de intensidades

Efectivamente, como se puede apreciar las intensidades no fluctúan alrededor de una intensidad constante, sino que ésta va variando. Además la variación más significativa la vemos en los 3 primeros detectores. Por lo tanto, concluimos definitivamente que se debe incluir el boro en nuestros cálculos.

En conclusión, en el gráfico de la ilustración 18, parece que la matriz más eficiente es la de 7x7 (tiene la tasa de conteo experimental más elevada) pero sin embargo en las simulaciones obtenemos que la que posee una eficiencia más elevada es la de 12x12.

5.1.4.2. Simulaciones tomando como material polietileno borado

Es en este punto donde se va a utilizar el código ParticleCounterVexp a partir del cual se puede añadir una fracción de boro al material. Se simularán las cinco mismas situaciones pero ahora con el nuevo código. Se usarán los siguientes porcentajes: 0.1 %, 0.15 %, 0.20 % y 0.25 % de boro. Los resultados del cálculo se muestran en el Anexo 7.

El siguiente gráfico muestra las eficiencias, para cada porcentaje, en función de cada detector. También se han añadido las tasas de conteo experimental. Adicionalmente a este estudio se realizaron simulaciones para los cinco detectores variando la temperatura y el espectro utilizado. Los resultados no fueron significativos pero se pueden visualizar también en el Anexo 7.



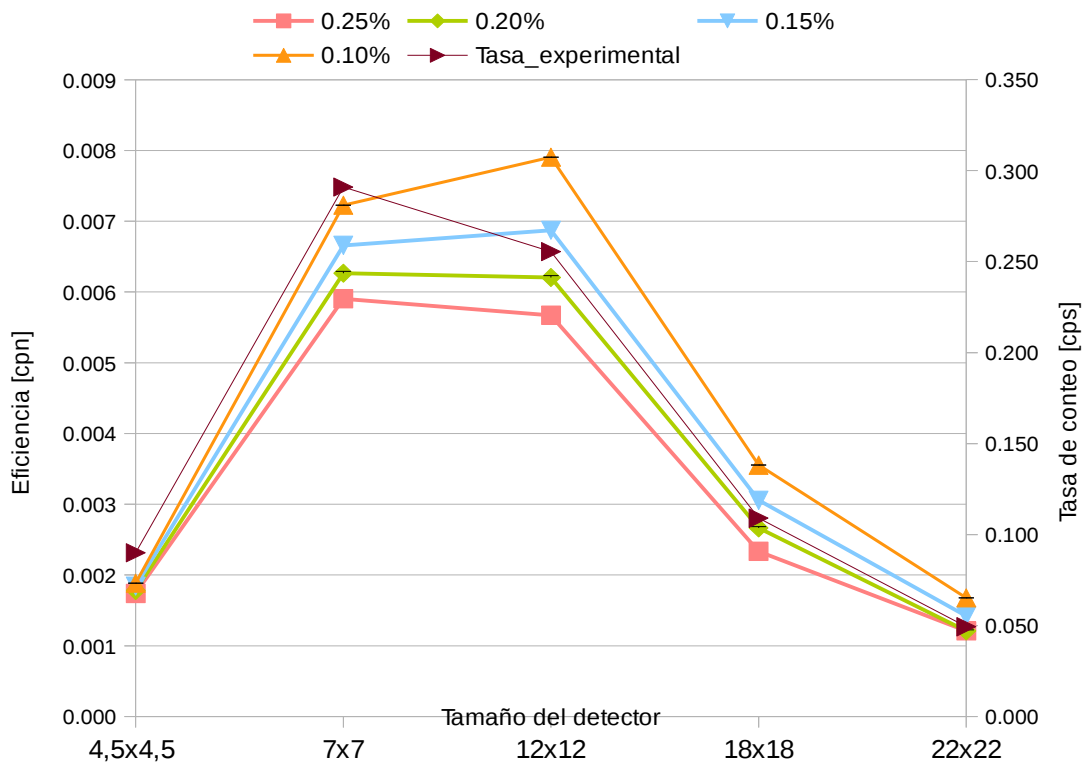


Gráfico 4: Eficiencias para cada porcentaje diferente de boro en función de la matriz moderadora. También están plasmadas las tasas de conteo experimentales

Efectivamente, al aumentar el porcentaje de boro en el material se aprecia claramente un cambio en la forma de la curva ajustándose cada vez mejor a la curva experimental. Curiosamente el porcentaje de este elemento afecta mayoritariamente al detector de 12x12 cm².

Como que en el LIN no se ha conseguido la estadística suficiente, a causa de factores que ya hemos expuesto, a partir de este estudio preliminar no podremos determinar con exactitud el porcentaje de boro del material. Sin embargo, ha sido de gran utilidad para verificar mediante simulaciones la presencia de este elemento en el material. Entonces, ¿cómo se puede determinar el porcentaje de boro? En el siguiente capítulo se verá la técnica finalmente utilizada.

5.2. Compleción de medidas experimentales. Mayo 2018.

Por otro lado, con el objetivo de completar el cálculo de las tasas experimentales se han realizado las tres medidas que faltaban: detector con lámina de Cadmio, detector más conversor de Plomo y detector sin nada. Para estas tres situaciones, al no haber moderador y además al tener materiales con secciones eficaces elevadas para la absorción neutrónica,

se espera que las tasas de conteo sean significativamente bajas.

El montaje se ha realizado de manera similar al primer montaje, siendo un poco más complicado para caso el plomo, ya que debido a su elevada densidad se han tenido que usar unas estructuras más robustas. La fuente de californio se ha situado tocando a la mitad del tubo de helio para las medidas con Cadmio y sin nada, y en una cara lateral para el Plomo. (ver imágenes).



Imagen 8: Montaje para el detector desnudo y con fuente



Imagen 9: Posicionamiento de la fuente para el detector con convertor de Plomo

Se han realizado un total de seis medidas, con fuente y sin fuente con la intención de medir el fondo. La metodología de análisis es la misma que en el apartado 4.1.3. Se han recopilado las cuentas en función del canal, se han transformado a los correspondientes gráficos y posteriormente han calculado las tasas de conteo totales. Los resultados se pueden ver en la siguiente tabla y su correspondiente gráfica.

Total			
Tipo de moderador/c oversor	Tasa total [cps]	Error absoluto [cps]	Error relativo
4,5x4,5	0.090	0.0022	2.47%
7x7	0.291	0.0018	0.62%
12x12	0.255	0.0016	0.63%
18x18	0.109	0.0009	0.79%
22x22	0.049	0.0006	1.12%
Cadmio	0.005	0.0002	3.82%
Desnudo	0.005	0.0008	14.57%
Plomo	0.016	0.0003	2.17%

Tabla 12: Resultados de la tasa de conteo



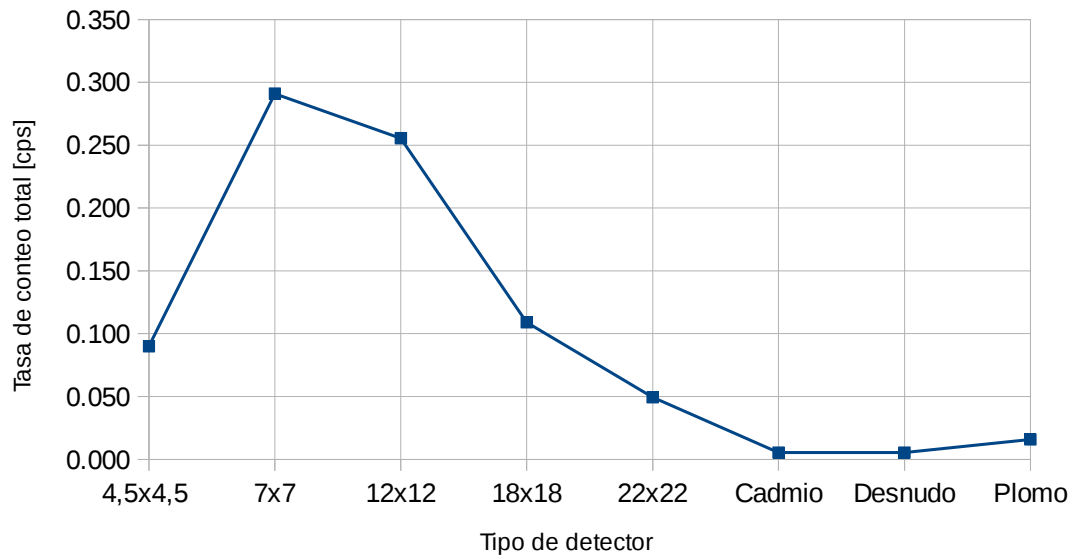


Gráfico 5: Tasa de conteo total en función de cada tipo de detector

Como era de esperar las tasas de conteo para los tres detectores restantes son bajas debido a las razones comentadas anteriormente.

6. MEDIDAS DE TASA DE CONTEO EN EL CERN

6.1. Introducción

Como no se tenía estadística suficiente que la incógnita del boro seguía presente se procedió a realizar medidas experimentales en el CERN. Se aprovechó una de las estancias de un miembro del equipo para realizar unas medidas adicionales en sus instalaciones, donde se en tiempos de experimentación relativamente cortos se puede conseguir la estadística suficiente.

Al ver que los detectores más afectados por la concentración de boro eran la de $4.5 \times 4.5 \text{cm}^2$, $7 \times 7 \text{cm}^2$, $12 \times 12 \text{cm}^2$ y además debido a la elevada masa y volumen de los restantes, las medidas experimentales se realizaron usando sólo estos tres tamaños. Además, se utilizaron tres réplicas de estos tres, pero esta vez fabricadas en polietileno puro, que también se llevaron al CERN.

Ahí se realizaron dos tipos de medidas para las seis matrices: detector en contacto con la fuente y detector a 30 cm de la fuente. Un total de doce medidas: seis para el material nTOF y otras seis para el polietileno puro. Adicionalmente se usaron dos fuentes de neutrones diferentes, una de Californio-252 (^{252}Cf) y otra de Americio-Berilio ($^{241}\text{AmBe}$). En la Tabla 11 se muestra de manera más clara las mediciones llevadas a cabo, junto a los resultados experimentales.

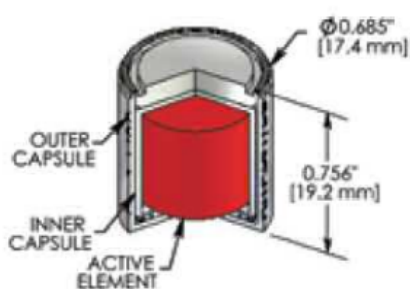


Figura 10: Detalle de la fuente de $^{241}\text{AmBe}$ utilizada en la experimentación. Como se puede apreciar se trata de una fuente cilíndrica.

Detector	Material	Distancia [cm]	Fuente	Tasa [cps]	Error [cps]
4.5x4.5 cm ²	nTOF	0	241AmBe	12.77	0.18
			252Cf	40.5	0.4
		30	241AmBe	0.29	0.01
			252Cf	0.86	0.01
	PE	0	241AmBe	17.17	0.17
			252Cf	49.76	0.41
30		241AmBe	0.43	0.01	
		252Cf	1.16	0.01	
7x7 cm ²	nTOF	0	241AmBe	42.23	0.29
			252Cf	119.89	0.64
		30	241AmBe	0.9	0.03
			252Cf	-	-
	PE	0	241AmBe	83.12	0.58
			252Cf	262.5	0.82
30		241AmBe	1.88	0.05	
		252Cf	-	-	
12x12 cm ²	nTOF	0	241AmBe	43.53	0.31
			252Cf	117.22	0.66
		30	241AmBe	1.46	0.04
			252Cf	3.85	0.09
	PE	0	241AmBe	136.03	0.66
			252Cf	352.89	1.14
30		241AmBe	4.65	0.09	
		252Cf	11.94	0.15	

Tabla 13: Visualización de manera esquemática de las medidas experimentales llevadas a cabo en el CERN

Como se puede ver en la tabla adjunta finalmente se realizaron un total de veintidós medidas. Pues para de tamaño de 7x7 cm², tanto para el polietileno como el material nTOF, no se realizó la medida a 30 cm con la fuente 252Cf.

Sin embargo, para la matriz 7x7 de polietileno, se realizó una medida a 50 cm de la fuente de 241AmBe, de manera adicional (no aparece en la tabla superior pero se ha usado en los cálculos). El resultado de esta medida es una tasa de 0.92 +/- 0.04 cps.

Es decir, se tienen ahora veintitrés tasas experimentales, esta vez con más estadística que antes con las cuales se podrá realizar cálculos con un error menor.

El objetivo principal de esta etapa, mediante estas tasas experimentales y mediante simulaciones, es estimar la fracción de Boro efectiva para el material. Este procedimiento ha seguido las siguientes etapas (explicados con detalle en los apartados 5.2 y 5.3):

- Simulaciones Monte Carlo para las matrices de polietileno puro. En esta parte, usando eficiencias calculadas a partir de simulaciones y las tasas experimentales,

se han calculado y validado las intensidades de las fuentes de ^{252}Cf y $^{241}\text{AmBe}$, usadas en la experimentación.

- A partir de estas intensidades calculadas y de las tasas experimentales para las matrices nTOF, se han calculado las eficiencias que deben poseer los detectores nTOF. En otras palabras, mediante el cálculo de eficiencias a partir de simulaciones Monte Carlo se ha aproximado el tanto por ciento de boro mediante el ajuste de dichas eficiencias.

6.2. Validación del método. Simulaciones con ParticleCounter para los tres detectores de polietileno puro

En este apartado, se ha simulado en GEANT4 las cinco situaciones siguientes:

- Detector 4,5x4,5 en contacto y a 30 cm de la fuente ^{252}Cf y $^{241}\text{AmBe}$.
- Detector 7x7 en contacto de la fuente ^{252}Cf y $^{241}\text{AmBe}$, a 30 cm de la fuente $^{241}\text{AmBe}$.
- Detector 12x12 en contacto y a 30 cm de la fuente ^{252}Cf y $^{241}\text{AmBe}$.

A partir de cada simulación se ha realizado el cálculo de la eficiencia para cada situación, buscando que la incertidumbre sea lo más baja posible. A partir de estas eficiencias y de las tasas experimentales se ha creado un sistema de ecuaciones a partir del cual se ha podido determinar la intensidad de cada fuente. La ecuación usada para cada situación es la siguiente:

$$R_{ijk} = e_{ijk} \times I_i + C_{ik}$$

Donde:

R es la tasa de conteo experimental [cps]

e es la eficiencia calculada por simulaciones [cpn]

C , constante que incluye el scattering y fondo que pueda contribuir a la tasa de conteo experimental

i corresponde al tipo de fuente (1 = $^{241}\text{AmBe}$ y 2 = ^{252}Cf)

j corresponde a la distancia (1 = en contacto, 2 = 30 cm)

k al tamaño del moderador (1 = 4.5x4.5cm², 2 = 7x7cm² y 3 = 12x12cm²)



Hipótesis consideradas:

- C , depende del tamaño del detector (k) y del tipo de fuente (i) pero no de la distancia a la que se ha realizado la medida. Es condición necesaria que la constante sea positiva.
- Las eficiencias calculadas por simulación y las tasas de conteo experimental se dan por válidas al poseer incertidumbres bajas.

Entonces, para una misma matriz k , tendremos cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas: I_1 , I_2 , C_{1k} , C_{2k} . Lo demás es conocido. Restando las dos ecuaciones correspondientes a las dos distancias diferentes pero con el mismo tipo de fuente, conseguimos eliminar C_{ik} y de aquí podemos calcular la intensidad correspondiente a la fuente I_i y posteriormente la constante C_{ik} . Este sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{aligned} R_{11k} &= e_{11k} \times I_1 + C_{1k} & I_1 &= \frac{R_{11k} - R_{12k}}{e_{11k} - e_{12k}} \\ R_{12k} &= e_{12k} \times I_1 + C_{1k} & C_{1k} &= R_{11k} - e_{11k} \times I_1 \\ R_{21k} &= e_{21k} \times I_2 + C_{2k} & I_2 &= \frac{R_{21k} - R_{22k}}{e_{21k} - e_{22k}} \\ R_{22k} &= e_{22k} \times I_2 + C_{2k} & C_{2k} &= R_{21k} - e_{21k} \times I_2 \end{aligned}$$

De esta manera tenemos tres puntos (tres sistemas de ecuaciones para cada matriz k cuando la fuente es $^{241}\text{AmBe}$) a partir de los cuáles, realizando la media ponderada, podremos estimar la intensidad de la fuente de $^{241}\text{AmBe}$ (I_1). También realizamos el cálculo de las tres constantes, que varían para cada uno de los tres tamaños y una misma intensidad. Adicionalmente, se decidió añadir la medida del detector $7 \times 7 \text{ cm}^2$ a 50 cm de la fuente, para así obtener más estadística. De esta manera tendremos un punto más para la estimación de la intensidad.

Por otro lado, para estimar la intensidad de la fuente de ^{252}Cf sólo disponemos de dos puntos (dos sistemas de ecuaciones para los tamaños 4.5×4.5 y 12×12 , ya que como hemos comentado no disponemos de la tasa de la matriz 7×7 a 30 cm de dicha fuente). A partir de los cuales se realizará la media ponderada para calcular la emisión de neutrones del ^{252}Cf , I_2 . También se calcularán las dos constantes.

Los resultados para todas las eficiencias, cálculo de constantes e intensidades, se muestran en la siguiente tabla:

Espectro	Distancia	Matriz	Tasa [cps]	Error [cps]	Eficiencia [cpn]	Error [cpn]	Intensidad [n/s]	Error [n/s]	Constante [n/s]
241AmBe	contact	4.5x4.5	17.17	0.17	0.00087	2.06E-06	19564.34	204	0.21
241AmBe	30 cm	4.5x4.5	0.43	0.01	0.00001	8.95E-08			
241AmBe	contact	7x7	83.12	0.58	0.00418	5.81E-06	19807.02	146	0.30
241AmBe	30 cm	7x7	1.88	0.05	0.00008	6.22E-07			
241AmBe	50 cm	7x7	0.92	0.04	0.00003	2.54E-07	19798.05	1368	0.31
241AmBe	contact	12x12	136.03	0.66	0.00705	9.16E-06	19227.29	101	0.45
241AmBe	30 cm	12x12	4.65	0.09	0.00022	6.22E-07			
252Cf	contact	4.5x4.5	49.76	0.41	0.00129	3.28E-06	38192.33	334	0.45
252Cf	30 cm	4.5x4.5	1.16	0.01	0.00002	1.31E-07			
252Cf	contact	7x7	262.50	0.82	0.00632	8.89E-06	-	-	-
252Cf	30 cm	7x7	-	-	0.00013	1.27E-04	-	-	-
252Cf	contact	12x12	352.89	1.14	0.00958	1.09E-05	36753.85	131	0.90
252Cf	30 com	12x12	11.94	0.15	0.00030	7.30E-07			

Tabla 14: Resultado del cálculo de intensidades y constantes para cada configuración diferente

Fuente	Configuración	Intensidad [n/s]	Error [n/s]
241AmBe	45x45	19564.34	203.8
	70x70a	19807.02	145.6
	70x70b	19798.05	1368.4
	120x120	19227.29	101.0
	Media ponderada	19437.84	76.7
252Cf	45x45	38192.33	333.6
	120x120	36753.85	131.5
	Media ponderada	36947.21	122.3

Tabla 15: Resultados de las intensidades de cada fuente

Ahora se deben validar estos resultados. Primero de todo vayamos a comparar estos valores, con los valores estimados de emisión.

La vida media del 241AmBe es muy elevada y su actividad y emisión neutrónica se consideran constantes durante sus primeros años de vida. De la fuente usada en el experimento, se nos ha proporcionado su emisión neutrónica, de 2,4e04 n/s.

Výsledky zkoušek / Source test report*								
výrobní číslo serial number	měření measurement			zkouška těsnosti leakage test		zkouška povrchové kontaminace contamination test		vizuální zkouška visual test
	kód code	výsledek result	datum date measured	č. no.	datum date passed	č. no.	datum date passed	datum date passed
4618RP 041/14	E	2.2 E+04 n.s-1	08.07.14	2	08.07.14	1	08.07.14	08.07.14
042/14 4625RP	E	2.4 E+04 n.s-1	08.07.14	6	08.07.14	1	08.07.14	08.07.14

Imagen 10: Prospecto proporcionado por el proveedor de la fuente de AmBe, del cual no tenemos más información. La fuente con la que se realizó la medida es la que se halla en la segunda fila.



Sin embargo, no se sabe si este es un valor medido o es simplemente nominal ya que no disponemos de la incertidumbre de dicho valor en su prospecto. Sospechamos que se trata de un valor nominal y no se sabe si comparable a nuestro valor calculado. No obstante, damos por válido el cálculo, ya que los cuatro valores tienen una fluctuación pequeña alrededor del promedio calculado (ver gráfico 6), por eso podemos afirmar que es un valor consistente.

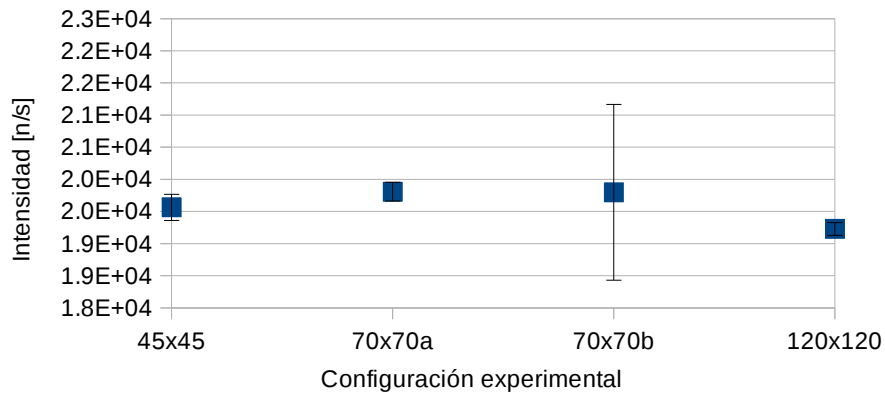


Gráfico 6: Fluctuación de los cuatro valores para la intensidad de la fuente de $^{241}\text{AmBe}$.
Comentarios: en la medida 70x70b el error es elevado porque justamente se trata del punto calculado con la medida a 50 cm de la fuente. A más distancia de la fuente, más error incluye la medida.

Para la fuente ^{252}Cf la emisión esperada para el 18 de junio del 2002 era de $2.3\text{e}6$ n/s, a partir de las características de este fuente, mostradas en la tabla 1, se calcula la emisión esperada el día del experimento. Esta es de 35400 n/s con un error de 400 n/s. El valor promedio calculado es de 36947.21 n/s. Por lo tanto, se observa que se encuentra cerca del valor esperado.

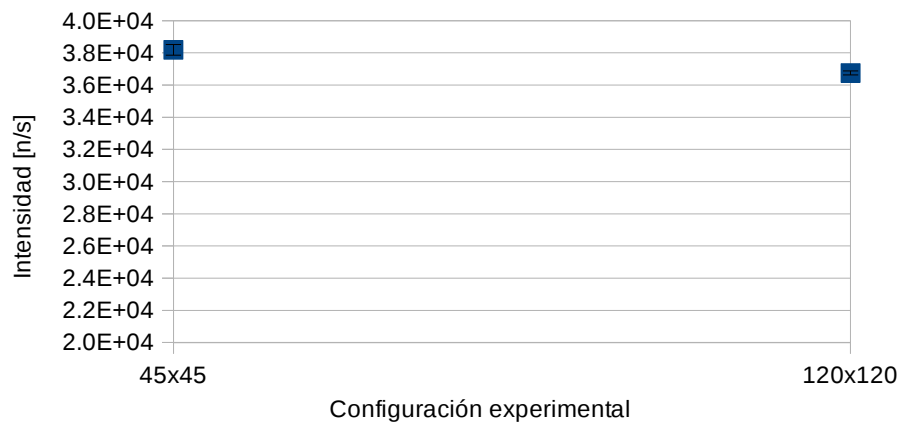


Gráfico 7: Intensidades para la fuente ^{252}Cf presentan también una fluctuación pequeña. La diferencia no es significativa.

Concretamente la desviación ($|valor\ calculado - valor\ esperado| / valor\ esperado \times 100$) representa un 4 %. Además, en este caso también se observa que, a pesar de tener menos puntos en este caso, ambos valores poseen una fluctuación pequeña alrededor del valor promedio. Así pues también damos por válido este resultado.

6.3. Estimación de la fracción de Boro.

En este apartado a partir de las tasas experimentales para las matrices nTOF y a partir de las intensidades calculadas en la anterior sección se va a realizar una estimación del porcentaje de Boro.

6.3.1. Cálculo de la diferencia de eficiencias

Al no poseer el porcentaje de boro del material, ahora no se podrá realizar un cálculo directo de las eficiencias, de cada detector, a partir de simulaciones. Primero de todo, a partir de las ecuaciones ya mostradas anteriormente se va a realizar el cálculo de la diferencia de eficiencias que deberían poseer cada uno de los detectores nTOF. Esta diferencia consiste en restar la eficiencia del detector en contacto con la fuente menos la eficiencia del detector a treinta centímetros. Este cálculo se realizará pues para cada detector k y para cada tipo de fuente, exceptuando el de 7x7 cm² con la fuente de californio.

$$e_{11k} - e_{12k} = \frac{R_{11k} - R_{12k}}{I_1} \quad e_{21k} - e_{22k} = \frac{R_{21k} - R_{22k}}{I_2}$$

Figura 11: Fórmulas utilizadas para el cálculo de diferencias de eficiencias para un mismo detector k y los dos tipos de fuentes. Por lo tanto tendremos 2 valores por detector, exceptuando el de 7x7 cm² para la fuente de 252Cf.

Entonces, como ya se ha comentado, a partir de las tasas y de las intensidades se obtendrán cinco valores de diferencia de eficiencias: tres de estas corresponden a los tres tamaños diferentes y la fuente de 241AmBe y las otras dos corresponden a los tamaños de 4.5x4.5cm² y 12x12cm² y la fuente de 252Cf. Los resultados de estos cálculos se encuentran en el Anexo 9. A partir de estos cinco valores se construye una curva experimental (basada en simulaciones y las medidas experimentales) que representa la diferencia de eficiencias para la concentración de boro correcta, que designaremos como ΔEff %, en función de cada configuración (tendremos cinco configuraciones diferentes) . Esta curva es la siguiente:



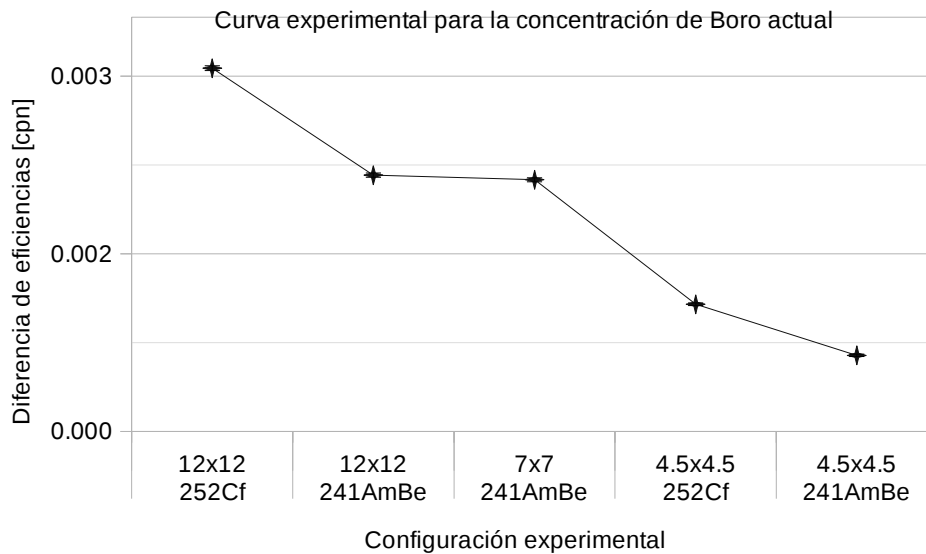


Gráfico 8: Gráfico donde se ve la diferencia de eficiencias para la concentración de Boro correcta. Está ordenado de manera descendente para que la posterior comparación sea más entendible.

6.3.2. Simulación con ParticleCounterVexp1

A partir del código de ParticleCounterVexp1 que nos permite incorporar el porcentaje de boro realizaremos el mismo cálculo de eficiencias, a partir de simulaciones, que habíamos realizado anteriormente para las matrices de polietileno (punto 5.2). No obstante, en este caso no se sabe si la eficiencia calculada es la correcta o no. Es decir, el porcentaje de boro es el correcto.

Lo que se va a realizar es la construcción de diferentes curvas que representan la diferencia de eficiencias en función de cada configuración para un porcentaje de Boro determinado. Es decir, la misma curva que se acaba de ver, pero ahora a partir de simulaciones y además 'jugando' con diferentes porcentajes de boro. Luego se plasmarán todas las curvas en un mismo gráfico, donde se podrá observar cuál se ajusta mejor a la curva experimental ΔEff %.

Para esto, se ha realizado un 'barrido' por diferentes concentraciones de boro, concretamente 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1 %. También se ha añadido el valor de 0.55 %. Los valores del porcentaje han sido escogidos de manera orientativa. Por una parte la curva de eficiencias vista en el capítulo 3 empezaba a modificar su forma a partir de un 0.25%. Por otra parte a partir de información sobre diferentes proveedores de polietileno borado indicaban que por ejemplo para una densidad nominal de 1.01 g/cm³ de polietileno

borado el porcentaje de boro era del 5% [15]. Como la densidad calculada experimentalmente es de 0.974 g/cm³ se intuye que el porcentaje d boro estará más bien hacia el 1 %.

Así pues se han llevado a cabo las simulaciones para cada configuración diferente (tipo de matriz, tipo de fuente, distancia a la fuente) con cada una de estas proporciones de boro. Luego se ha realizado la diferencia de eficiencias, para cada porcentaje y se han plasmado estos puntos en la curva que se ha enseñado anteriormente. El resultado se puede ver en el siguiente gráfico:

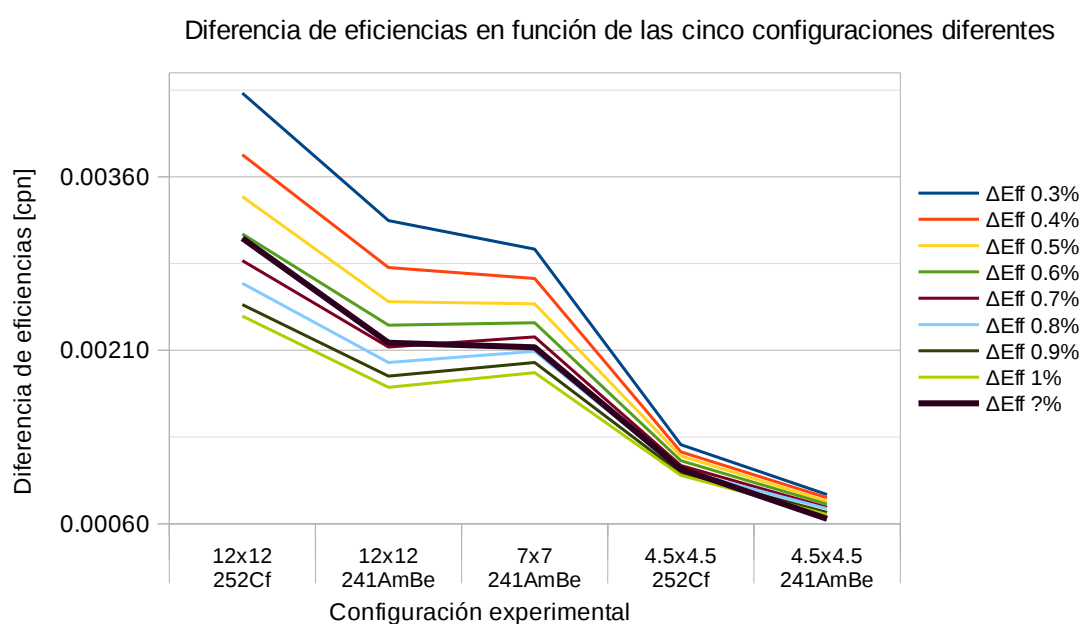


Gráfico 9: Gráfico donde vemos las diferentes curvas, para la diferencia de eficiencias, en función de cada configuración y en función del porcentaje de boro

Como se puede apreciar, vemos que la curva va 'bajando' a medida que aumentamos el tanto por ciento de boro. Es entre el 0.6% (curva de color verde) y el 0.7% (curva color granate) donde la curva experimental $\Delta\text{Eff } ?\%$ (de color negro) parece que se ajusta mejor.

6.3.3. Método de cálculo del porcentaje de Boro

Para estimar cuál es el porcentaje de Boro que mejor se ajusta a nuestra curva experimental se ha seguido el siguiente procedimiento.

Primero se ha calculado la distancia, por mínimos cuadrados, que hay entre cada curva de diferente porcentaje de boro y la curva del porcentaje correcto. Este es el resultado:



Aproximación del porcentaje de Boro por mínimos cuadrados	
%Boro	Distancia por mínimos cuadrados
0	6.4E-05
0.3	3.5E-06
0.4	1.4E-06
0.5	4.3E-07
0.55	2.1E-07
0.6	9.1E-08
0.7	5.7E-08
0.8	1.9E-07

Tabla 16: Tabla que recoge la distancia por mínimos cuadrados existente entre cada curva, para cada porcentaje, y la curva experimental.

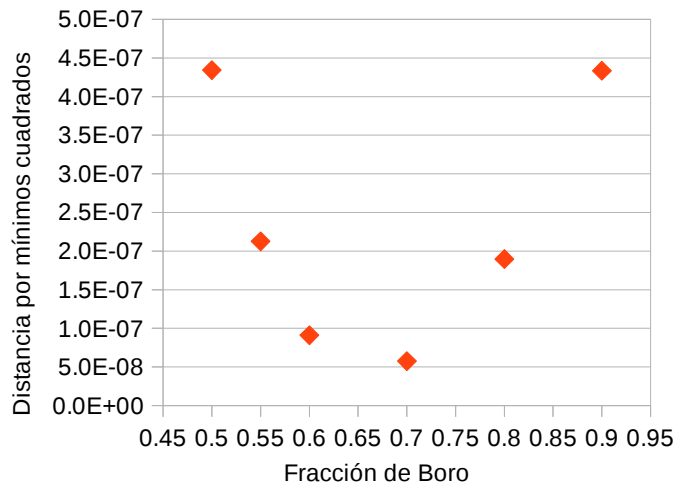


Gráfico 10: Dispersión de puntos donde se ve la distancia por mínimos cuadrados en función del porcentaje de Boro. Los puntos extremos de 0%, 0.3%, 1 % no se han considerado ya que, viendo los resultados del anterior gráfico se sabe que el porcentaje de Boro está alrededor de un 0.6-0.7%.

A partir de este gráfico de dispersión vemos que parece ser que la mínima distancia se encuentra alrededor del 0.7% de boro. Es decir, que la curva que mejor se ajusta a la curva experimental es la que corresponde a un porcentaje de Boro de alrededor del 0.7 %. Pero, ¿Cómo se aproxima este valor? Pues, se han considerado tres métodos diferentes para el cálculo de donde se encuentra el mínimo de esta gráfica. Estos son los siguientes:

1. Cálculo de la línea de tendencia que sigue esta dispersión, se ha escogido una función polinómica de tercer grado que es la que mejor se ajusta a estos puntos. Derivamos dicha función y la igualamos a cero. Encontramos el valor de x que hace que la función sea mínima.
2. Método de Newton-Raphson para optimización de funciones. Este se basa en acotar, de manera iterativa, el intervalo donde se encuentra el mínimo de una función a partir de su función derivada [16]. Como no partimos de ninguna función específica emplearemos la definición de derivada local en un punto para encontrar tanto la primera derivada como la segunda derivada:

$$f'(x) = \frac{f(x+\Delta h) - f(x-\Delta h)}{2\Delta h} \quad f''(x) = \frac{f'(x+\Delta h) - f'(x-\Delta h)}{2\Delta h}$$

Luego, a partir de la siguiente expresión,

$$x_{k+1} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)}$$

se encuentra el siguiente punto con el que empezaría la siguiente iteración. Sin embargo, nos quedaremos en este primer paso ya que no disponemos de más valores de la función. Por lo tanto, escogeremos el el valor x_{k+1} , con la mayor convergencia, como el valor que hace mínima la función. Para evaluar la convergencia nos basaremos en que la distancia entre el punto k y el punto k+1 sea la más pequeña de todas.

3. Método de la secante. Método parecido al método de Newton, trata también de ir acotando intervalos para aproximar donde se halla la raíz de una función derivada [16]. En este caso también calcularemos las primeras y segundas derivadas de la misma manera que anteriormente. El siguiente punto de la iteración (x') se calcula como muestra la siguiente expresión.

$$x' = x_q - \frac{f'(x_q)(x_q - x_p)}{f'(x_q) - f'(x_p)}$$

Se escogerá el valor que converja más rápido, es decir el que cumpla la condición explicada anteriormente.

6.3.4. Resultados

El resultado de la primera metodología se encuentra derivando la línea de tendencia cuya fórmula se muestra en el gráfico 11. El valor encontrado como valor mínimo que hace mínima la función es el 0.6671 %.



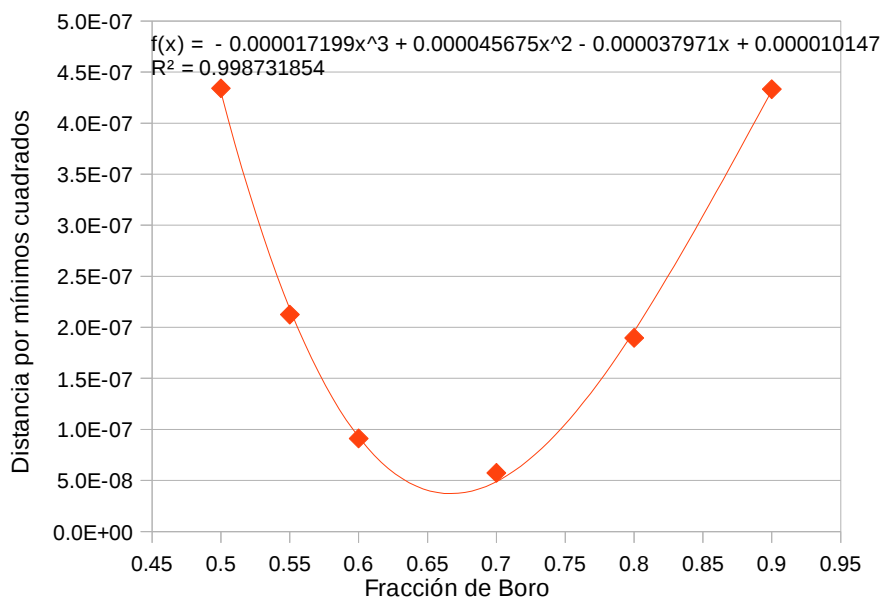


Gráfico 11: Línea de tendencia que se ajusta a los puntos que representan la distancia por mínimos cuadrados.

Los resultados de la primera y segunda metodología se muestran en la siguiente tabla:

Datos				Método 2		Método 3	
x	f(x _k)	f'(x _k)	f''(x _k)	x _{k+1}	(x _{k+1})-x _k	x _{k+1}	(x _{k+1})-x _k
0.3	3.5E-06						
0.4	1.4E-06	-1.5E-05				0.5697	0.1697
0.5	4.3E-07	-6.3E-06	6.73E-05	0.5936	0.0936	0.6426	0.1426
0.6	9.1E-08	-1.9E-06	3.40E-05	0.6554	0.0554	0.6793	0.0793
0.7	5.7E-08	4.9E-07	1.88E-05	0.6738	0.0262	0.6644	0.0356
0.8	1.9E-07	1.9E-06	9.18E-06	0.5953	0.2047	0.3825	0.4175
0.9	4.3E-07	2.3E-06					
1	6.6E-07						

Tabla 17: Resultados para el segundo y tercer método. En la parte de datos, vemos el valor de la primera y segunda derivada de la función. Se destacan en amarillo los valores escogidos para la estimación de la fracción de Boro

A partir de estos tres valores se ha realizado la media aritmética. El resultado obtenido a partir de esta estimación es del 0.67% en peso de Boro con una dispersión del 0.003 %. Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

Método	Resultado
1	0.6671
2	0.6738
3	0.6644
Media muestral	0.67
Desviación estándar muestral	0.005
Error estándar	0.003

*Tabla 18: Resultados de cálculo para las tres metodologías.
Se ha decidido redondear el resultado a dos decimales*



7. CÁLCULO DE LA RESPUESTA DE DETECCIÓN

7.1. Qué es una función de respuesta y cómo se construye

La función o curva respuesta de un detector nos permite saber la respuesta de cada detector en función de la energía que posea el neutrón. Es decir, su comportamiento frente a diferentes energías neutrónicas.

En la presente memoria se construirá la curva a partir de diferentes puntos. Cada uno de estos puntos representa la respuesta a fluencia (cm^2) que posee el detector para una energía neutrónica determinada. El cálculo realizado es el siguiente: se dividirá el número de neutrones detectados por cada detector entre el flujo de neutrones (esto es el número de neutrones emitidos entre el área de emisión de la fuente).

El cálculo de estos valores se realizará a base de simulaciones Monte Carlo usando del código ParticleCounter. A partir de la unión de estos puntos se construye la función respuesta. Lo más común es que esta función presente un máximo para una energía determinada. Esto se traduce a que el detector es más eficiente para un rango de valores energéticos determinado.

En la función respuesta del sistema de detección estudiado veremos representadas ocho curvas. Cada una de ellas representará la respuesta en función de la energía neutrónica para un detector determinado. Como dicho anteriormente, a partir de estas curvas podremos observar que para detector habrá un rango energético en el cual éste será más eficiente.

7.2. Caracterización del sistema de detección

A partir de esta función respuesta podremos caracterizar el sistema de detección estudiado. Para la caracterización era necesario conocer la densidad y la composición del material de los detectores (necesaria para realizar una correcta simulación). Por eso se ha dedicado la mayor parte del estudio en realizar esta estimación.

Una vez ya tenemos el valor del porcentaje de Boro del material y su densidad podemos realizar una caracterización correcta y completar así el diseño de este equipo de detección. En la caracterización también se van a incluir los otros tres detectores de los que se realizaron medidas experimentales en Mayo de 2018. Estos son el detector desnudo, envuelto en cadmio y con conversor de plomo.

Concretamente se ha simulado el intervalo energético para el neutrón de $1E-09$ MeV a 19.5 MeV con una división de 47 puntos de energía. El paso de cada división va aumentando a medida que aumenta el intervalo y es por eso que se usará escala logarítmica en el eje X. Se debe comentar que en un principio la intención era realizar el cálculo hasta la energía de 25 MeV. No obstante, por falta de tiempo, solo se ha podido simular hasta 19.95 MeV.

Para este apartado en concreto, se ha utilizado un haz de neutrones de 50×50 cm² de superficie para acelerar el cálculo (las simulaciones con la fuente 4π llevan más tiempo en ser procesadas). Es decir para el cálculo del flujo neutrónico se utilizará un área de emisión de 2500 cm².

Para comprobar que el haz cubría el detector en su totalidad, y gracias al visualizador de ParticleCounter, se realizaron verificaciones como la siguiente la mostrada en la imagen 11.

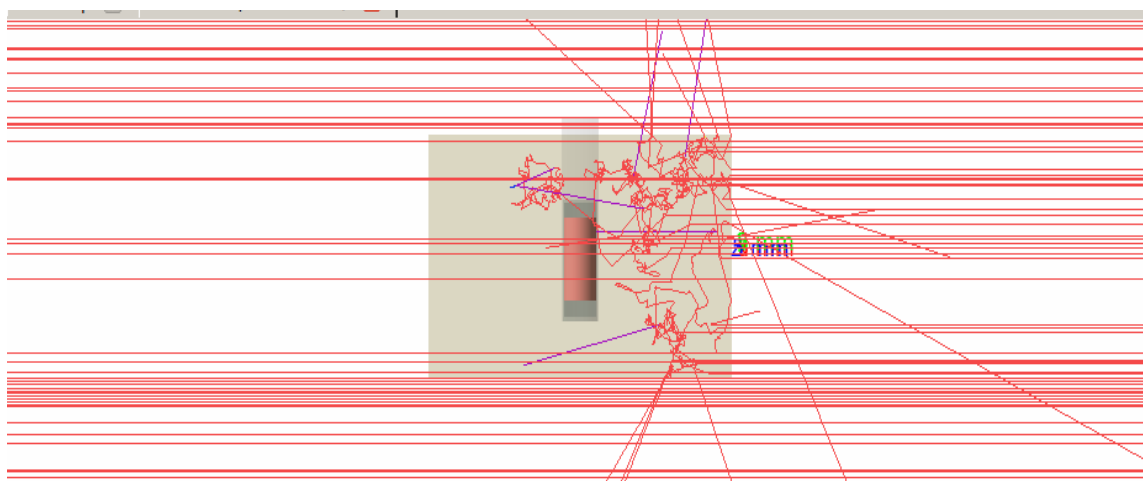


Imagen 11: Verificación, para el detector de dimensiones más grandes, de que el haz de neutrones cubra el volumen del detector en su totalidad.

A partir de este cálculo se ha realizado el gráfico para el sistema de detectores que contiene Boro. (véase gráfico 11)

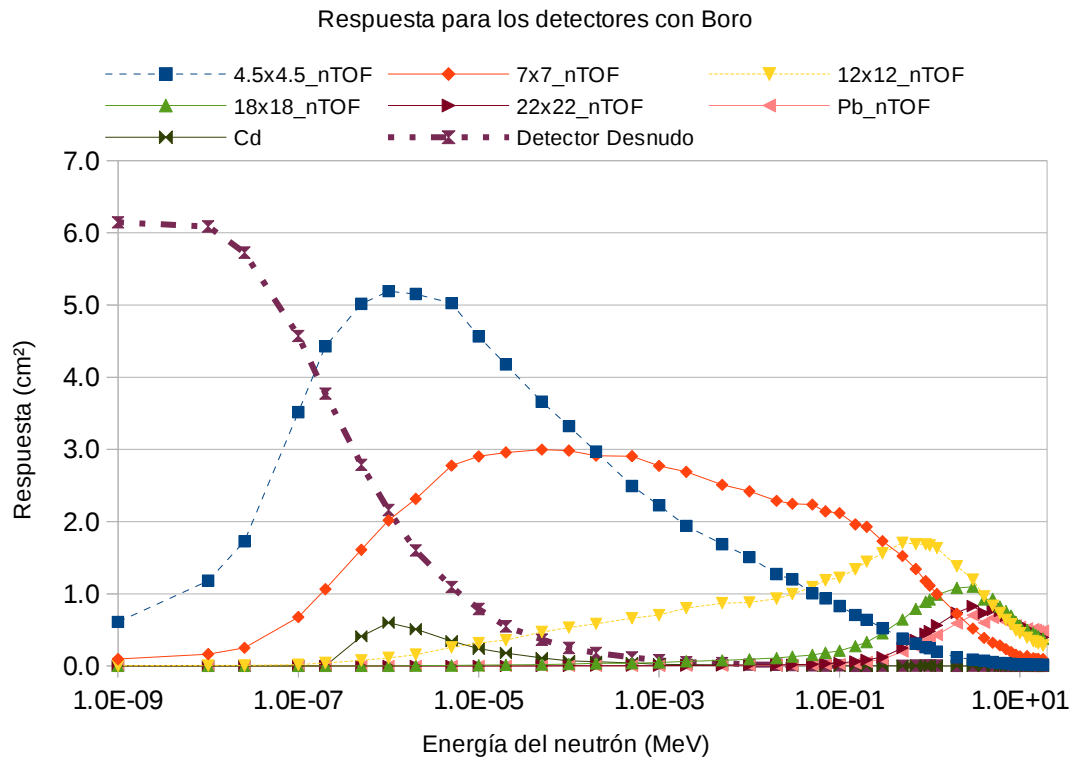


Gráfico 11: Respuesta para el sistema de detección estudiado

Claramente, a medida que se aumenta el tamaño del detector, es decir el tamaño de la matriz moderadora, el pico de la eficiencia se va desplazando hacia la derecha. Cuánto más grosor posea el detector más sensibilidad poseerá para neutrones con mayores energías.

El detector desnudo, como era de esperar, presenta el pico de respuesta en energías bajas. Es decir es eficiente para detectar neutrones térmicos. (comentado ya en el capítulo 1)

La curva para el detector con Cadmio se mantiene mayoritariamente plana para cualquier energía (exceptuando un pico relativamente pequeño para energías de $1e-6$ MeV). Se verifica su función de blindaje neutrónico.

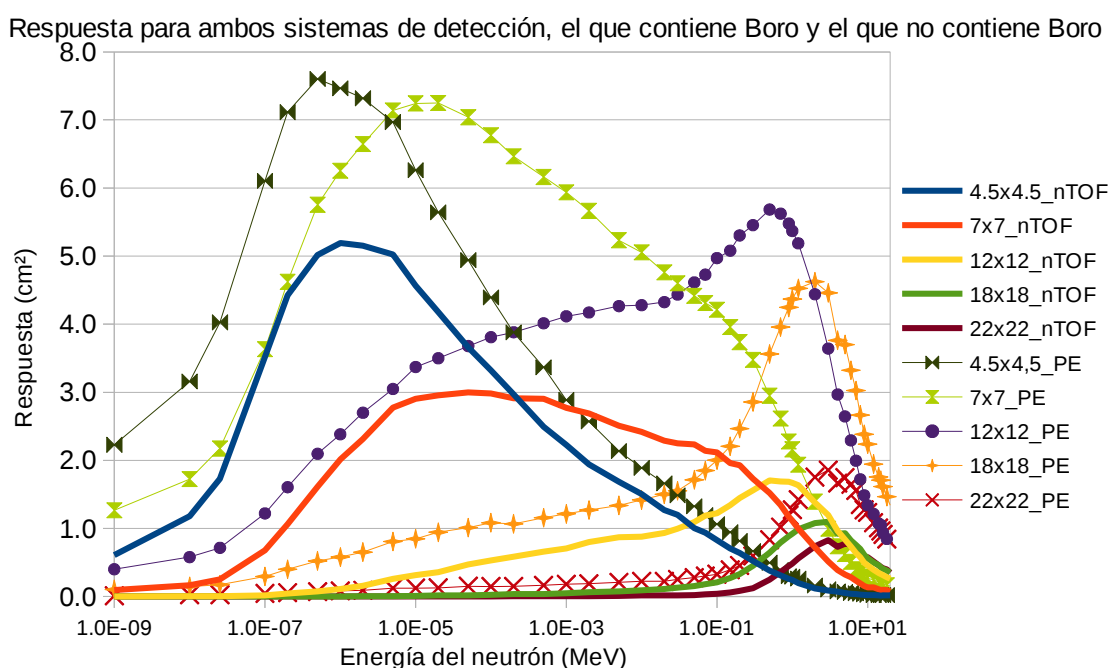
Para el convertidor de plomo en la zona de energías térmicas el detector no detecta nada ya que el plomo presenta sección eficaz elevada para absorber neutrones térmicos. No obstante observamos un pico para energías más elevadas que ya que justamente su función es la de convertir energías elevadas en energías térmicas (que serán detectadas por el contador proporcional)

Por último se ve un rango de energías, entre el $1E-03$ y $1E-01$, donde no aparece ningún pico de respuesta para ningún detector. Esto lleva a pensar que el sistema de detección se

halla incompleto. Faltaría un tamaño, entre 7x7 cm² y 12x12 cm², para obtener una respuesta elevada en ese rango de energías.

7.3. Comparación de la función respuesta con la función respuesta para detectores sin boro.

Por último se ha querido comparar el comportamiento de este sistema de detección con un set de detectores que no tuvieran Boro, es decir de polietileno puro. Si juntamos todas las curvas en un mismo gráfico obtenemos el siguiente resultado (se han omitido las respuestas de Cadmio, detector desnudo y convertor de plomo para que el gráfico sea más entendible):



Además, se ha intentado realizar una distinción entre los detectores que contienen Boro de los que no contienen mediante un marcador sobre la curva. Así pues, las curvas de las matrices que no contienen Boro son las que poseen de un símbolo marcador encima de ella.

A partir de este gráfico parece ser que la presencia de Boro disminuye en una proporción considerable la respuesta del sistema de detección. Sin embargo, ¿realmente sólo disminuye la respuesta?. Podría ser que también produjera un desplazamiento de la curva. Si el primer caso sucediera el cociente entre dos curvas para un tamaño de detector nos debería dar un valor constante. Vayamos a comprobar este fenómeno para el tamaño de



7x7 por ejemplo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Energía [MeV]	Respuesta 7x7_nTOF [cm ²]	Respuesta 7x7_PE [cm ²]	Cociente de las dos curvas
0.000000001	0.10	1.27	13.33
0.00000001	0.16	1.72	10.55
2.53E-08	0.25	2.17	8.66
0.0000001	0.68	3.63	5.36
0.0000002	1.06	4.62	4.35
0.0000005	1.61	5.75	3.58
0.000001	2.02	6.25	3.10
0.000002	2.31	6.65	2.87
0.000005	2.77	7.14	2.57
0.00001	2.90	7.24	2.50
0.00002	2.96	7.25	2.45
0.00005	3.00	7.04	2.35
0.0001	2.98	6.78	2.27
0.0002	2.91	6.47	2.22
0.0005	2.91	6.16	2.12
0.001	2.77	5.94	2.14
0.002	2.69	5.66	2.11
0.005	2.51	5.23	2.09
0.01	2.42	5.05	2.09
0.02	2.29	4.76	2.08
0.03	2.25	4.60	2.05
0.05	2.24	4.42	1.98
0.07	2.14	4.31	2.01
0.1	2.12	4.21	1.99
0.15	1.96	3.96	2.02
0.2	1.93	3.74	1.94
0.3	1.73	3.48	2.01
0.5	1.52	2.95	1.94
0.7	1.34	2.61	1.95
0.9	1.17	2.28	1.94
1	1.11	2.16	1.94
1.2	1.00	1.94	1.95
2	0.72	1.39	1.93
3	0.52	1.00	1.93
4	0.39	0.74	1.90
5	0.32	0.62	1.94
6	0.28	0.51	1.80
7	0.23	0.40	1.72
8	0.19	0.35	1.83
9	0.15	0.29	1.92
10	0.13	0.27	2.00
12	0.13	0.24	1.82
14	0.11	0.21	2.00
15	0.09	0.19	2.04
16	0.10	0.19	1.90
18	0.09	0.17	1.77
19.95	0.08	0.15	2.02

Tabla 18: Resultados del cociente de los puntos de la curva sin Boro entre la curva con Boro para la matriz de tamaño 7x7cm².

Como se puede ver los valores resultantes oscilan alrededor del dos aunque al principio de la curva este factor no es constante ya que va oscilando.

Entonces también se debe considerar el posible desplazamiento de las curvas para las matrices que contienen Boro. Esto es interesante ya que a partir de los dos sets de detectores se pueden montar sistemas que cubran más rangos de energías neutrónicas. Es un punto a considerar par futuros estudios de este sistema.



8. PLANIFICACIÓN, COSTE E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

8.1. Planificación

Las actividades a realizar durante el proyecto se organizaron de manera semanal. Se hizo una planificación inicial que fue variando durante el transcurso del proyecto. Además se anotaron las fechas de inicio y fin para cada actividad (véase el diagrama de Gantt de la figura adjunta). De esta manera se podrá realizar una estimación del coste total del proyecto.

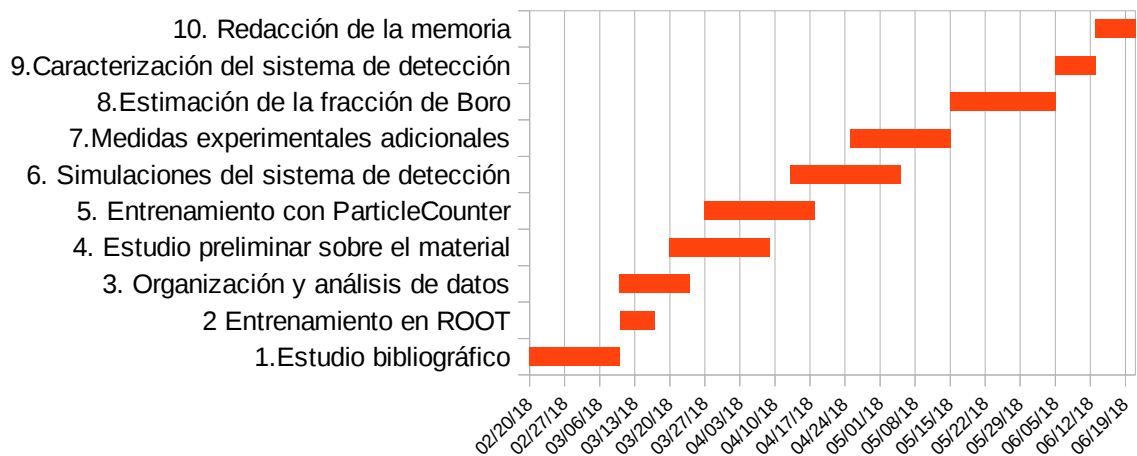


Figura 12: Diagrama de Gantt, cada división del eje horizontal representa un periodo de tiempo de una semana

Tal y como se muestra en el diagrama las actividades fueron catalogadas en diez fases culminando en la redacción de la memoria. Un retraso, por ejemplo, en la fase número 8 hubiera alargado el proyecto ya que sin el resultado de esta fase no se puede pasar a la siguiente fase.

8.2. Coste

Según la disposición 2824 del BOE núm. 52 del año 2018 [17] , dónde se encuentran las tablas salariales de 2018, el sueldo base para un titulado superior es de 6,3€/hora. Por tanto tomando este valor como sueldo base el coste total del proyecto realizado ha sido de 2520 euros (Véase la tabla 19).

Actividad	Días	Semanas	Horas
1. Estudio bibliográfico	18	4.5	45
2 Entrenamiento en ROOT	7	1.75	17.5
3. Organización y análisis de datos	14	3.5	35
4. Estudio preliminar sobre el material	20	5	50
5. Entrenamiento con ParticleCounter	22	5.5	55
6. Simulaciones del sistema de detección	22	5.5	55
7. Medidas experimentales adicionales	20	5	50
8. Estimación de la fracción de Boro	21	5.25	52.5
9. Caracterización del sistema de detección	8	2	20
10. Redacción de la memoria	8	2	20
Total (días)			400
Coste total (euros)			2520

Tabla 19: Tiempo total invertido y coste total del trabajo

8.3. Impacto medioambiental

No se deriva ningún impacto mediambiental del proyecto. A continuación se explicarán algunas actividades susceptibles de ocasionar impacto mediambiental y porqué no lo han originado:

- Ningún tipo de residuo radiactivo ha sido generado en el proceso de las medidas experimentales. Las fuentes utilizadas se guardan en sus lugares de origen una vez terminado el estudio.
- Las actividades experimentales desarrolladas en el marco del proyecto complimentan con los procedimientos y normas de seguridad establecidas por el LIN.
- La presente memoria no requiere de una impresión. Se entrega en formato electrónico.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Primero de todo se debe describir de manera global el trabajo realizado en este estudio. Se ha realizado un análisis de medidas experimentales para dos fuentes de neutrones diferentes. A partir de estos datos y de simulaciones MC se ha podido caracterizar el material de los moderadores, determinando una fracción de Boro en peso. Finalmente, mediante MC se ha calculado la respuesta a fluencia del sistema de detección. Ahora vayamos a ver las diferentes conclusiones a las que se ha llegado.

En cuanto al cálculo de la respuesta del sistema de detección (véase capítulo 7) se ha llegado a diversas conclusiones. En primer lugar, se puede afirmar que la presencia de Boro en el detector prototipo reduce de manera significativa su respuesta (y por tanto su eficiencia), si se compara con un prototipo realizado con polietileno puro.

No obstante, este fenómeno no tiene que ser negativo en su totalidad. Se debe recordar que la presencia de este elemento también puede estar ocasionando un movimiento de las curvas de respuesta, con respecto a las curvas de respuesta para el polietileno puro. De esta manera el máximo de la respuesta para cada detector puede padecer un desplazamiento y llegar a cubrir otros rangos energéticos fuera del alcance de un detector que no contenga Boro.

Este fenómeno resulta interesante si se desea diseñar un sistema válido para espectrometría. Es decir, cuantos más rangos energéticos diferentes se abarquen, el comportamiento del sistema más se aproximará al comportamiento de un espectrómetro. Se podría intentar realizar una combinación de detectores procedentes del sistema de detección con Boro y del sistema de detección sin Boro cuyo comportamiento se asemeje al descrito anteriormente.

Por otro lado, si volvemos a mirar las matrices de respuesta del sistema de detección estudiado (Gráfico 14), se observa que hay un rango de energías que no está cubierto por ningún detector. Se trata de la zona intermedia de energías neutrónicas. Por tanto se sospecha que falta por añadir un detector al diseño inicial para su completitud.

En la presente memoria también se ha llevado a cabo un método de cálculo basado en simulaciones MC para estimar la fracción en peso de Boro en el material. A partir de este cálculo podemos concluir que el conjunto de librerías de GEANT combinado con el código ParticleCounter permiten realizar un tipo de cálculos que antiguamente no se podían

realizar.

Estos son los cálculos a partir de las eficiencias. A partir de estos, como ya se ha visto, se pueden estimar diferentes parámetros con bastante precisión. Por lo tanto estos códigos son una herramienta potente y de gran utilidad de cara a la validación de muchos parámetros (como las intensidades provenientes de diferentes fuentes, realizado en el presente estudio también). No obstante, a pesar de ser un buen método en cuanto a precisión se ha de destacar que los tiempos de cálculo con bastante elevados.

Por último conviene destacar que las instalaciones y el equipamiento del LIN no nos permiten realizar calibraciones precisas. Sin embargo, son de utilidad para realizar otro tipo de estudios, como por ejemplo la comparación de las curvas de tasas de conteo experimental con las curvas de eficiencias (véase Capítulo 5).

A partir de estas conclusiones se realizan las siguientes recomendaciones y sugerencias:

- Realizar un estudio de las curvas respuesta para el sistema que contiene boro con el sistema que no contiene. De esta manera se podría averiguar si con ambos sets de detectores se puede montar sistemas de detección complementarios. Esto es que un detector cubra las energías que el otro no puede cubrir y viceversa. Incluso se podría intentar montar un sistema con menos detectores pero que, sin embargo, cubra un amplio rango de energías. En conclusión, se recomienda estudiar con detenimiento el desplazamiento de estas curvas respecto a las de polietileno puro.
- Por otro lado, convendría estudiar la respuesta del sistema de detección que contiene Boro por separado. Sería interesante, averiguar que detector faltaría por completar el diseño del sistema. Por ejemplo, a partir de simulaciones se podría intentar averiguar el tamaño del detector que falta para completar el diseño.
- Adicionalmente, faltaría realizar un estudio de la respuesta del detector con convertor de Plomo para energías elevadas. En el presente estudio sólo se ha llegado hasta los 19.95 MeV por falta de tiempo.
- Por otro lado, se recomienda buscar maneras de reducir el tiempo de cálculo de las simulaciones, ya que como se ha comentado más arriba, pueden ser una herramienta potente de cálculo de parámetros de interés. De esta manera sería interesante optimizar el método de cálculo utilizado para averiguar la fracción de Boro por ejemplo.



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi agradecimiento a las siguientes personas que han hecho posible que pueda llevar a cabo el presente trabajo:

En primer lugar, y especialmente, a Ariel Esteban Tarifeño Saldivia, por su apoyo incondicional, su paciencia y disponibilidad, y por el tiempo invertido en escucharme y enseñarme. A cualquier hora y en cualquier momento.

A Franciso Calviño Tavares por proponerme un tema del cual no tenía ningún tipo de contacto previo y ayudarme en conceptos previos de física nuclear. Gracias a este proyecto mi conocimiento en este campo de la ciencia ha crecido de manera exponencial.

Al equipo del LIN que me ha dejado usar sus instalaciones y también trabajar en su espacio de trabajo, cosa que me ha facilitado la realización del trabajo y el acceso a información.

Gracias



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Artículo disponible en: <http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/salud/13339-disenan-dispositivo-para-medir-espectros-de-neutrones>,
- [2] VERDAGUER, F. *Física del neutrón*. Junta de Energía Nuclear, Madrid 1958.
- [3] DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK. *Nuclear Physics and Reactor Theory Module 1*. U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585
- [4] [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/120/htm/sec_8.htm, Mayo 2018]
- [5] DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK. *Nuclear Physics and Reactor Theory Module 2*. U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585
- [6] KNOLL, GLENN F. *Radiation detection and measurement*. Wiley, New York, NY, 1979.
- [7] LARCHER, A.M.; BONET DURAN, S.M. y Lerner, A.M. *Dosis ocupacional debida a neutrones en aceleradores lineales de uso médico*. Argentina p. 527.
- [8] MARINO, RAÚL G. *Blindaje Radiológico de Reactores Compactos de Baja Potencia: Cálculo y Diseño*. Buenos Aires, Diciembre de 2004. p.29-30.
- [9] MADSEN, DAN. *Borated polyethylene- fire properties and other issue*. Report 5443, Lund 2014
- [10] UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA. *Tecnología y selección de materiales*. Asignatura del Grado de Ingeniería Industrial.
- [11] BAKALI, M. *Espectrometría Neutrónica en las Centrales Nucleares mediante un Sistema de Esferas de Bonner*. Tesis doctoral.
- [12] GEANT. Geant4. Disponible en: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [13] TARIFEÑO-SALDIVIA, ARIEL. *ParticleCounter- MC simulation of detectors radiation and nuclear physics*. UPC, Junio 2016.
- [14] ROOT. *Data Analysis Framework*. Disponible en: <https://root.cern.ch/>.
- [15] Catálogo de Polietileno Borado disponible en <http://www.shieldwerx.com/poly-based-shielding.html>
- [16] HERNÁNDEZ OLIVA, DR.G. *Métodos Clásicos de Optimización para Problemas No-Lineales sin Restricciones*. UChile - Departamento de Ingeniería Matemática, Mayo 2006.

[17] BOE.es. *Sumario del BOE núm 54 del miércoles 28 de febrero de 2018*



ANEXO

Anexo 1. Cálculos para las densidades de PE y el material de los moderadores

Aquí se muestra el cálculo de la densidad del material a partir de mediciones de las piezas C1, C2, M1 y M2. Las piezas R no contienen Boro.

Medidas de 3 tipos de pieza: 4 rectángulos [R] hechos con PE puro, 2 cilindros [C] y dos piezas rectangulares [M] que son las mitades del moderador de 7x7, material con Boro.					Volumen y masa de cada pieza. masas inferiores a los 100 g		Cálculo de densidades	
Pieza	l1 [cm]	l2 [cm]	h [cm]		Volumen [cm ³]	Masa [g]	Densidad [g/cm ³]	
R1 PE	22.00	15.04	2.54		840.435	801.10	0.953	
R2 PE	22.00	15.05	2.54		840.994	801.80	0.953	
R3 PE	27.18	15.03	2.55		1041.714	987.20	0.948	
R4 PE	27.20	15.02	2.53		1033.616	985.60	0.954	
		D [cm]	h[cm]					
C1 nTOF		2.80	3.50		21.521	21.07	0.979	
C2 nTOF		2.79	3.49		21.337	20.96	0.982	
		l1 [cm]	l2 [cm]	h [cm]	D [cm]			
M1 nTOF		15.00	4.50	2.27	2.76	108.354	104.70	0.966
M2 nTOF		15.00	4.53	2.25	2.77	107.690	104.30	0.969

Tabla A1: Cálculo de las densidades para cada pieza por separado, los resultados de la media se encuentran en su correspondiente apartado



Figura A1: Piezas de las que se han realizado las mediciones. Cuatro planchas rectangulares de polietileno puro (R), dos cilindros interiores de material nTOF (C) y las dos mitades del detector 4.5x4.5cm²

Anexo 2. Archivos para el funcionamiento correcto de ParticleCounter.

Este código de simulación necesita cuatro archivos para funcionar correctamente:

Archivo input.tmp

#####_BLOCK_Thermodynamic_variables_Room_and_Materials_#####																	
#Troom(C)	Kden1																
20	1.032																
#####_BLOCK_Detector_position_in_the_room_#####																	
#Pxm	Pym	Pzm	rotX	rotY	rotZ												
0	0	2.75	90	0	0												
#####_BLOCK_Neutron_counters_inside_detector_core_#####																	
#NoOfDetGroups																	
1																	
#N	Type	FC	RX0	RY0	Radius	Z	StartD	DeltaD	Invert								
1	9	0	0	0	0	2.3	0	0	1								
#####_BLOCK_Structures_and_materials_for_detector_#####																	
#NoOfStructures																	
1																	
#MAT	PVtype	FD	GEOM	dW	dP	Xs	Ys	Zs	GEOMP	nCopies	X0s	Y0s	Z0s	Fdisp	Ddisp1	Ddisp2	Pvname
1	0	0	0	0	0	4.5	4.5	15	0	1	0	0	0	0	0	0	HDPPEModerator

Este archivo, dividido en 4 bloques nos permite variar los siguientes parámetros:

El primer bloque nos permite variar las variables termodinámicas de la sala en °C, y el cociente de la densidad del material con respecto a la densidad standard en caso de que el material sea PE. Los materiales se hallan codificados mediante números en el Manual de ParticleCounter. El tipo de material lo escogemos en el cuarto bloque #MAT mediante su número correspondiente. Sólo si se escoge como material el PE (densidad standard de 0.95) y escogemos como densidad, por ejemplo, de 0.98 g/cm³ el cociente entre ambos valores es 1.032 (el valor que se deberá poner en kden1).

En el segundo bloque podemos variar las variables que determinan la posición del detector en la sala. Cabe recordar que las distancias se implementan en centímetros y los ángulos en grados sexagesimales.

En el tercer bloque podemos determinar el tipo de detector usado, el número de detectores y su posición.

Finalmente, en el último bloque, además de determinar el material para cada estructura implementada (podemos poner más de una estructura), determinamos su posición en la sala y sus características geométricas. El número de copias (nCopies) siempre tiene que ser mayor o igual a uno. Una estructura puede ser un moderador por ejemplo.



En el caso del código ParticleCounterVexp1 dentro del primer bloque aparecerían otras dos constantes. Estas son kden2, que corresponde a la densidad del material, y kden3 que es el porcentaje en peso de boro del material.

Archivo measurement.tmp

```
##### __BLOCK_Particles_to_score__ #####  
neutron  
P_END
```

Este documento define el tipo de radiación sobre el cual se hace el scoring (el conteo). En el caso de la imagen adjunta se trata del neutrón.

Archivo vis.mac

Este documento se encarga de llevar a cabo la simulación de la geometría implementada en el archivo input.tmp. A través de él también se puede actualizar el sistema de coordenadas (vectores unitarios) cosa útil si se quiere verificar geometrías.

Archivo run.mac

```
# #  
# Macro para setear simulaciones en codigo G4 #  
# #  
#####  
# Load particle source  
/control/execute /opt/macfiles/GPSpointnSources.mac  
  
/gps/ene/mono 1.0 MeV  
/gps/pos/centre 0. 0. 0. cm  
  
#Numero eventos  
/gps/particle neutron  
/run/beamOn 300
```

Es el archivo que se encarga de ejecutar la simulación en las librerías de GEANT4. Las líneas del archivo realizan las siguientes funciones:

- *control/execute/opt/macfiles/GPSpointnSources.mac* → se elige el archivo donde se encuentra la fuente/espectro que se quiere simular.
- */gps/ene/mono 1.0 MeV* → define el tipo de energía, en el caso de la imagen adjunta se trata de una energía monoenergética de 1 MeV.

Finalmente, después de la simulación mediante G4 se genera otros archivos, estos son:

- *ParticleCounter_Detmat*. Información sobre los materiales, masa del detector en kilogramos,
- *ParticleCounter_Output*. Aquí encontramos los cálculos realizados
- *ParticleCounter_Scorers*. Se genera internamente de acuerdo con el archivo measurements. Nos permite saber el flujo que llegó a una estructura específica.
- *Posfile*. Permite ver la distribución de los neutrones.
- *Simstatus*. Actualiza el porcentaje de cálculo.



Anexo 3: SCRIPT para realizar las simulaciones en GEANT4

```
#####
####  Template file  automatically generated by #####
####    @@@CrearCalcsFolders  VERSION: 4.1    #####
#####
####  Definition of configuration variables #####
####*****#####
#####  BASIC SETUP TEMPLATE #####

      Geom=nTOF_45x45          #Geometry Name without extension .geo,
.pcgeo
      runtime=SPEC            #RUN  type:  SPEC,  USER,  BRIKEN01,
REM01, ...; see definitions bellow
      Nevents=10000000        #Number of processed events
      CalID=test1             #Calculation identificator
      Rep=1                    #Number of calculation repetitions
(DEF 1)
      CALid0=1                 #Starting calculation ID for
repetitions (DEF 1)
      NumberOfMasters=4       #Number of threads for parallel
calculations (DEF 8)

#####
#  ACTIVATE CODE

      code=ParticleCounterV02
#  code=longCounter
#  code=briken_compact_V61
#  code=brikenV69
#  code=brikenV68
#  code=brikenV67
#  code=brikenV66
#  code=brikenV65

#..... Old versions .....
#  code=GPSsampleGenerator
#  code=benchmark_clovPerp
#  code=benchmark_clovHor
#  code=brikenV6_compact
#  code=brikenV6
#  code=brikenV61
#  code=brikenV62
```

```
# code=brikenV64
# code=benchmark01
#
#####
# ACTIVATION AND SETTING OF THE SOURCE

### Isotropical sources
# SourceFile=GPSpointnSources.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_2pi.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_10mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_20mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_30mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_40mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_50mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_100mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_250mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_500mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_750mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_1000mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_1500mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_2000mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_2500mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_3000mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_4000mrads.mac
# SourceFile=GPSpointnSources_ZCONESolidAngle_5000mrads.mac

### Parallel beam sources along Z-axis
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam10x10cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam20x20cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam30x30cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam40x40cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam50x50cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam60x60cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam70x70cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam80x80cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam90x90cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam100x100cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam110x110cm2.mac
# SourceFile=GPSnSource_ZParallelBeam120x120cm2.mac

### Implantation detectors
# SourceFile=GPS_AIDAnSource.mac
# SourceFile=GPS_WASABInSource.mac
```



```

### Source position in cm
SourcePos0=(0.0 0.0 0.0)

### Arrays for the cartesian components of final source position in cm
### For positions in other coordinate systems, create the array
externally
SourceXf=(0.0)
SourceYf=(0.0)
SourceZf=(0.0)
#####
# DEFINE spectrum array for "SPEC" runtime

#List of neutron spectra
## Beta-delayed:
### Ga84-vandle Br88-endf71 Rb94-endf71 Rb95-endf71 I137-endf71
## Neutron sources:
### Cf252-MCNPX Cf252-radevetal2014

# COPY and PASTE spectra name
specArray=(Cf252-radevetal2014)
#
#####

# PATHS (should end with /)
pathTOSource=/opt/macfiles/
#
#pathTOcode=/home/ariel/Dropbox/codes/
pathTOexec= #/home/ariel/geant4_workdir/bin/Linux-g++/
#
pathTOscript=/opt/calcScripts/
#####
# runtime DEFINITIONS

if [ "$runtime" == "SPEC" ]; then
#Definition of the spec array on the header!
run=run$runtime
En=$specArray
Enc=$En
fi

if [ "$runtime" == "USER" ]; then
# To be defined arbitrarily
run=run$runtime
En=$(LANG=en_US seq 3.0 0.5 4.5)

```

```
Enc=$(LANG=en_US seq 3.0 0.5 4.5)
```

```
fi
```

```
# ~~~~~ Runs for BRIKEN detector ~~~~~
```

```
if [ "$runtype" == "BRIKEN01" ]; then
```

```
run=run$runtype
```

```
En=(0.000000001 0.000000004 0.000000007 0.00000001 0.00000004 0.00000007
0.0000001 0.0000004 0.0000007 0.000001 0.000004 0.000007 0.00001 0.00004
0.00007 0.0001 0.0004 0.0007 0.001 0.004 0.007 0.01 0.04 0.07 0.1 0.2 0.3
0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2
2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 4.0 4.1
4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 5.0 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 6.0
6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 7.0 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8 7.9
8.0 8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6 8.7 8.8 8.9 9.0 9.1 9.2 9.3 9.4 9.5 9.6 9.7 9.8
9.9 10.0)
```

```
Enc=(0.000000001 0.000000004 0.000000007 0.00000001 0.00000004 0.00000007
0.0000001 0.0000004 0.0000007 0.000001 0.000004 0.000007 0.00001 0.00004
0.00007 0.0001 0.0004 0.0007 0.001 0.004 0.007 0.01 0.04 0.07 0.1 0.2 0.3
0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2
2.3 2.4 2.5 2.6 2.7 2.8 2.9 3.0 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 3.6 3.7 3.8 3.9 4.0 4.1
4.2 4.3 4.4 4.5 4.6 4.7 4.8 4.9 5.0 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 6.0
6.1 6.2 6.3 6.4 6.5 6.6 6.7 6.8 6.9 7.0 7.1 7.2 7.3 7.4 7.5 7.6 7.7 7.8 7.9
8.0 8.1 8.2 8.3 8.4 8.5 8.6 8.7 8.8 8.9 9.0 9.1 9.2 9.3 9.4 9.5 9.6 9.7 9.8
9.9 10.0)
```

```
fi
```

```
# ~~~~~ Runs for neutron REM detector studies ~~~~~
```

```
if [ "$runtype" == "REM01" ]; then
```

```
run=run$runtype
```

```
En=(0.0000000010 0.0000000100 0.0000000253 0.0000001000 0.0000002000
0.0000005000 0.0000010000 0.0000020000 0.0000050000 0.0000100000
0.0000200000 0.0000500000 0.0001000000 0.0002000000 0.0005000000
0.0010000000 0.0020000000 0.0050000000 0.0100000000 0.0200000000
0.0300000000 0.0500000000 0.0700000000 0.1000000000 0.1500000000
0.2000000000 0.3000000000 0.5000000000 0.7000000000 0.9000000000
1.0000000000 1.2000000000 2.0000000000 3.0000000000 4.0000000000
5.0000000000 6.0000000000 7.0000000000 8.0000000000 9.0000000000
10.0000000000 12.0000000000 14.0000000000 15.0000000000 16.0000000000
18.0000000000)
```

```
Enc=(0.0000000010 0.0000000100 0.0000000253 0.0000001000 0.0000002000
0.0000005000 0.0000010000 0.0000020000 0.0000050000 0.0000100000
0.0000200000 0.0000500000 0.0001000000 0.0002000000 0.0005000000
0.0010000000 0.0020000000 0.0050000000 0.0100000000 0.0200000000
0.0300000000 0.0500000000 0.0700000000 0.1000000000 0.1500000000
0.2000000000 0.3000000000 0.5000000000 0.7000000000 0.9000000000
1.0000000000 1.2000000000 2.0000000000 3.0000000000 4.0000000000
5.0000000000 6.0000000000 7.0000000000 8.0000000000 9.0000000000
10.0000000000 12.0000000000 14.0000000000 15.0000000000 16.0000000000
18.0000000000)
```

```
fi
```

```
# ~~~~~ Other run types ~~~~~
```



```

if [ "$runtype" == "1" ]; then
run=run$runtype
En=(0.0001 0.001 0.01 0.1 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0)
Enc=(0.0001 0.0010 0.0100 0.1000 1.0000 2.0000 3.0000 4.0000 5.0000)

fi

if [ "$runtype" == "2" ]; then
run=run$runtype
En=(0.010 0.050 0.100 0.250 0.500 0.700 1.000 1.500 2.500 5.000)
Enc=(0.010 0.050 0.100 0.250 0.500 0.700 1.000 1.500 2.500 5.000)
fi

if [ "$runtype" == "5" ]; then
run=run$runtype
En=(0.0001 0.001 0.01 0.1 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 5.0 6.0 8.0 10.0 13.0
16.0 19.5)
Enc=(0.0001 0.0010 0.0100 0.1000 0.5000 1.0000 1.5000 2.0000 2.5000 3.0000
4.0000 5.0000 6.0000 8.0000 10.0000 13.0000 16.0000 19.5000)
fi

if [ "$runtype" == "6" ]; then
run=run$runtype
En=(1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0)
Enc=(1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0)
fi

if [ "$runtype" == "7" ]; then
run=run$runtype
En=(0.1 0.5 0.8 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0
8.5 9.0 9.5 10.0 10.5 11.0 12.0 13.0 14.0 15.0)
Enc=(0.1 0.5 0.8 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5
8.0 8.5 9.0 9.5 10.0 10.5 11.0 12.0 13.0 14.0 15.0)
LostRUN=0
fi

if [ "$runtype" == "8" ]; then
run=run$runtype
En=(0.0001 0.001 0.010 0.050 0.100 0.250 0.500 0.700 1.000 1.500 2.000
2.500 3.000 4.000 5.000)
Enc=(0.0001 0.001 0.010 0.050 0.100 0.250 0.500 0.700 1.000 1.500 2.000
2.500 3.000 4.000 5.000)
fi

if [ "$runtype" == "9" ]; then

```

```
run=run$runtype
En=(1.2500 1.7500 2.2500 2.7500 3.2500 3.5000 3.7500 4.2500 4.5000 4.7500
5.5000 6.0000 6.5000 7.0000 7.5000 8.0000 8.5000 9.0000 9.5000 10.0000)
Enc=(1.2500 1.7500 2.2500 2.7500 3.2500 3.5000 3.7500 4.2500 4.5000 4.7500
5.5000 6.0000 6.5000 7.0000 7.5000 8.0000 8.5000 9.0000 9.5000 10.0000)
fi
```

```
#-----
# End runtype definitions!
#####
#####
#     END Template definitions
#####
```



Anexo 4: Ejemplo de archivo ASCII obtenido a través de las medidas experimentales

Estos archivos se obtienen gracias al equipo electrónico del LIN. A partir de ellos y usando la herramienta ROOT se han calculado las tasas de conteo.

```
<<PMCA SPECTRUM>>
TAG - Test
DESCRIPTION - ATOMKI MCA Record
GAIN - 2
THRESHOLD - 1
LIVE_MODE - 1
PRESET_TIME - 100000
LIVE_TIME - 51917
REAL_TIME - 51926
START_TIME - 05/15/2018 09:40:08
SERIAL_NUMBER - 0
<<DATA>>
0
71
631
901
1044
1092
1034
1131
1168
1257
1484
1892
1923
1566
1147
1145
1155
894
412
168
150
106
91
100
97
63
65
```

Figura A2: Archivo ASCII donde cada línea representa un canal y el número de cuentas para ese canal. Arriba de todo se muestra el tiempo vivo de la experimentación. Estos archivos suelen ser bastante largos sólo que aquí se ha efectuado un recorte.

Anexo 5: Visualización de geometrías con ParticleCounter

Se mostrarán un par de ejemplos de cómo se visualiza la geometría a partir de este código.

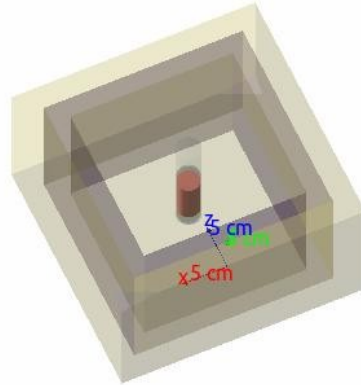


Figura A3: Visualización del conversor de Plomo

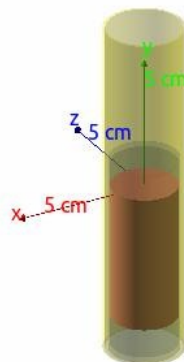


Figura A4: Visualización del contador más la lámina envolvente de Cadmio

Anexo 6: Características de la fuente de Californio

A partir de las características de la fuente (constante de decaimiento, actividad inicial, factores de conversión) se puede saber la intensidad para cualquier fecha utilizando la ley de decaimiento mostrada en el capítulo 1. A partir de estos valores se han calculado los factores correctores para la intensidad, en el capítulo 5.

Conversion Factors & Data		
Neutron emission/252Cf activity [n/(s·uCi)]	4316	
Specific emission [n/(s·ug)]	2.31E+006	
λ_{252Cf} [1/ years]	0.262	

Source Characteristics	Liquid Source Produced by Eckert & Ziegler No 1276-21	
	VALUE	STE (68.3%)
Date	1. Dec. 2007	
Activity [uCi]	2.67E-001	3E-3
Date of experiment	30. Jan. 2018	
Δt [years]	10.1726027397	
Activity in experiment	1.86E-2	2E-4
Current estimated total Neutron emission rate (n/s)	80.1380903141	

Tabla A2. Características de la fuente de californio.

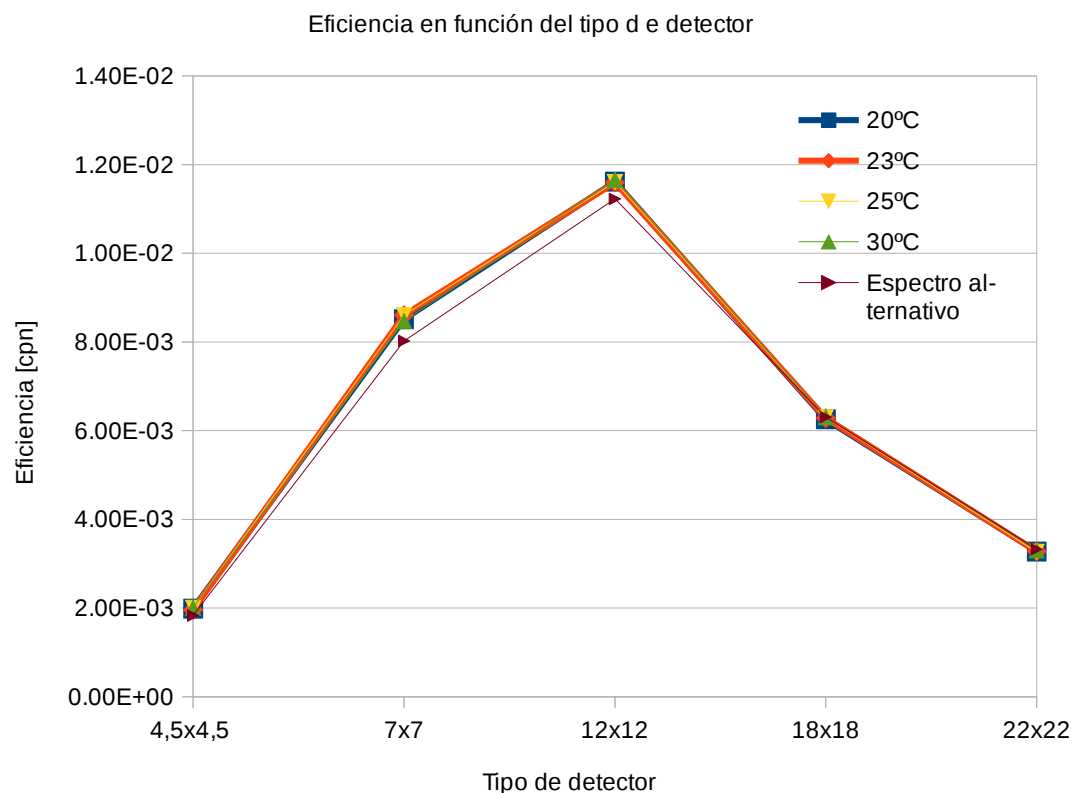
Anexo 7: Análisis de sensibilidad, Boro, Temperatura y Espectro

Primero de todo, en este anexo se incluyen los resultados numéricos utilizados para construir las curvas en apartado 5.1.4.2 el del capítulo.

Matriz	Eff 0.1% Boro [cpn]	Error Eff 0.1% [cpn]	Eff 0.15% Boro [cpn]	Error Eff 0.15% [cpn]	Eff 0.2% Boro [cpn]	Error Eff 0.2% [cpn]	Eff 0.25% Boro [cpn]	Error Eff 0.25% [cpn]
4,5x4,5	0.00188	0.000015	0.00184	0.000015	0.00178	0.000015	0.001739	0.000015
7x7	0.00723	0.00003	0.00666	0.000029	0.00627	0.000028	0.005905	0.000027
12x12	0.00790	0.000031	0.00687	0.000029	0.00620	0.000028	0.00567	0.000027
18x18	0.00355	0.000021	0.00306	0.00002	0.00266	0.000018	0.002334	0.000017
22x22	0.00168	0.000014	0.00142	0.000013	0.00121	0.000012	0.00121	0.000012

Tabla A3: Resultados del cálculo de eficiencias para las diferentes composiciones de Boro

Por otro lado se va a mostrar el estudio de sensibilidad de los detectores al variar la temperatura. También se ha variado de espectro utilizando otro diferente pero que también simulaba la fuente de Californio. No se ha añadido en la memoria porque el resultado no revela nada significativo. EL resultado se puede ver en la siguiente gráfica:



Anexo 8: Resultado para el cálculo diferencia de eficiencias y plantillas utilizadas en el método.

Diferencias de eficiencias						
Fuente	Matriz	ΔEff 0%	ΔEff 2%	ΔEff 0.3%	ΔEff 0.4%	ΔEff 0.5%
252Cf	12x12	0.00928	0.00307	0.00432	0.00379	0.00343
241AmBe	12x12	0.00683	0.00216	0.00322	0.00281	0.00252
241AmBe	7x7	0.00410	0.00213	0.00297	0.00272	0.00250
252Cf	4.5x4.5	0.00127	0.00107	0.00128	0.00122	0.00119
241AmBe	4.5x4.5	0.00086	0.00064	0.00085	0.00082	0.00079
Fuente	Matriz	ΔEff 0.6%	ΔEff 0.7%	ΔEff 0.8%	ΔEff 0.9%	ΔEff 1%
252Cf	12x12	0.00311	0.00288	0.00268	0.00249	0.00239
241AmBe	12x12	0.00232	0.00213	0.00200	0.00188	0.00178
241AmBe	7x7	0.00234	0.00222	0.00209	0.00200	0.00191
252Cf	4.5x4.5	0.00115	0.00110	0.00106	0.00104	0.00102
241AmBe	4.5x4.5	0.00077	0.00074	0.00073	0.00070	0.00068

Tabla A4: Resultado del cálculo de la diferencia de eficiencias para los diferentes porcentajes de Boro

Hoja de Cálculo utilizada para realizar el cálculo de eficiencias teniendo en cuenta la composición de Boro, la fuente, el tamaño del detector y la distancia.

Composición de Boro = 0.55 %						
	Fuente	241AmBe ISO8529-2000				
	Distancia	8.7 mm de la cara del detector (CONTACTO)				
	Eventos	Cuentas 4.5x4.5	Eventos	Cuentas 7x7	Eventos	Cuentas 12x12
	10000000	16039	10000000	49326	10000000	49886
TOTAL EVENTOS	20000000	16039	20000000	49326	20000000	49886
EFICIENCIA [cpn]		0.00080195		0.0024663		0.0024943
ERROR ABSOLUTO[cpn]		6.332258681E-06		1.11047287E-05		1.1167587E-05
ERROR RELATIVO		0.79%		0.45%		0.45%
	Fuente	241AmBe ISO8529-2000				
	Distancia	30 cm de la cara del detector				
	Eventos	Cuentas 4.5x4.5	Eventos	Cuentas 7x7	Eventos	Cuentas 12x12
	100000000	2006	100000000	9261	100000000	15655
TOTAL EVENTOS	200000000	2006	200000000	9261	200000000	15655
EFICIENCIA [cpn]		0.00001003		0.000046305		0.000078275
ERROR ABSOLUTO[cpn]		2.239419568E-07		4.81170448E-07		6.25599712E-07
ERROR RELATIVO		2.23%		1.04%		0.80%
	Fuente:	Cf252-radevetal2014				
	Distancia	10.4 mm de la cara del detector				
	Eventos	Cuentas 4.5x4.5	Eventos	Cuentas 7x7	Eventos	Cuentas 12x12
	100000000	23624	100000000	74440	100000000	67042
TOTAL	200000000	23624	200000000	74440	200000000	67042
EFICIENCIA [cpn]		0.0011812		0.003722		0.0033521
ERROR ABSOLUTO[cpn]		7.685050423E-06		1.36418474E-05		1.2946235E-05
ERROR RELATIVO		0.65%		0.37%		0.39%
	Fuente:	Cf252-radevetal2014 (test 2)				
	Distancia	30 cm de la cara del detector				
	Eventos	Cuentas 4.5x4.5	Eventos	Cuentas 7x7	Eventos	Cuentas 12x12
	100000000	3245	100000000	14519	100000000	20954
TOTAL	200000000	3245	200000000	14519	200000000	20954
EFICIENCIA [cpn]		0.000016225		0.000072595		0.00010477
ERROR ABSOLUTO[cpn]		2.848245074E-07		6.02474066E-07		7.23774827E-07

Figura A5: Ejemplo de una plantilla para agilizar el cálculo de eficiencias.