

Simulación del proceso de detección de elementos orgánicos por dispersión de neutrones

Nancy Carolina Forero Martínez

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Departamento de Física
Bogotá D. C.
2007**

Simulación del proceso de detección de elementos orgánicos por dispersión de neutrones

Tesis de grado para optar el título de Magister en Ciencias Física

Presentado por: Nancy Carolina Forero Martínez

Director: Dr. Fernando Crisancho Mejía

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias
Departamento de Física
Bogotá D.C.
2007

Índice general

Introducción	vii
1. Algunos aspectos de la física de neutrones	1
1.1. Clasificación de los neutrones por su energía	1
1.2. La interacción de neutrones	2
1.3. Fuentes de neutrones	2
1.3.1. Fisión espontánea	3
1.3.2. Radioisótopos vía reacciones (α , n)	3
1.3.3. Fuentes de fotoneutrones	4
1.3.4. Reacciones debidas a partículas cargadas aceleradas	5
1.4. Moderación de neutrones	6
1.5. Detectores de neutrones	8
1.5.1. Ley $1/v$	8
1.5.2. Detección a partir de reacciones de partícula cargada	9
1.5.3. Contador proporcional de ^3He	11

1.5.4. Activación neutrónica	15
1.5.5. Reacciones de fisión inducidas por neutrones	15
1.6. Retrodispersión de neutrones	15
2. Retrodispersión de neutrones: Aspectos experimentales	17
2.1. Parte experimental	18
2.1.1. Descripción geométrica	18
2.1.2. Descripción electrónica	20
2.1.3. Experiencias	20
2.2. Simulación con Geant3	34
3. Simulación de un sistema fuente-dispersor-detector	38
3.1. Parámetros de la simulación	39
3.1.1. Dimensiones y composiciones	39
3.1.2. Geometría	40
3.1.3. Fuente de neutrones	40
3.2. Validación de la simulación	42
3.3. Respuesta del detector	43
3.4. Sistema fuente-dispersor-detector	46
3.4.1. Muestra sobre la superficie del suelo	46
3.4.2. Muestra enterrada en el suelo	48
3.4.3. Incluyendo humedad en el suelo	55
4. Conclusiones y Expectativas	58

Índice de figuras

1.1.	Dispersión elástica en el sistema de laboratorio y centro de masa	6
1.2.	Espectros de moderación de neutrones en ^{12}C después de 10 colisiones elásticas.	8
1.3.	Secciones eficaces para las reacciones $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, $^6\text{Li}(n,\alpha)$, $^3\text{He}(n,p)$	10
1.4.	Contador proporcional	12
1.5.	Efecto pared	13
1.6.	Espectro esperado	14
2.1.	Montaje experimental	18
2.2.	Soporte móvil	19
2.3.	Dimensiones utilizadas (muestra sobre la superficie)	19
2.4.	Diagrama de bloques electrónicos	20
2.5.	Cuentas como función de la distancia entre detectores	24
2.6.	Diferencia entre cuentas	25
2.7.	Distancia entre detectores 12 cm	26
2.8.	Distancia entre detectores 18 cm	27

2.9. Distancia entre detectores 24 cm	28
2.10. Reflexión especular para neutrones	29
2.11. Cuentas variando distancia entre detectores	29
2.12. Cuentas adheriendo la fuente al blanco	30
2.13. Dimensiones utilizadas (muestra enterrada)	31
2.14. Cuentas y diferencia para el caso del blanco enterrado	32
2.15. Cuentas como función de la posición. Simulante TNT. $d_{\text{ed}} = 18$ cm	33
2.16. Cuentas como función de la posición. Simulante TNT. $d_{\text{ed}} = 6$ cm	34
2.17. Geometría simulación Geant3	35
2.18. Comparación simulación y experimento. Caso simulante TNT	36
2.19. Comparación simulación y experimento. Caso blanco de polietileno	36
3.1. Disposición geométrica simulada	41
3.2. Fuente ^{252}Cf simulada	41
3.3. Efecto pared simulado	42
3.4. Validación de la simulación	44
3.5. Espectros experimentales	45
3.6. Respuesta detector ^3He	46
3.7. Dimensiones utilizadas simulación (muestra sobre la superficie)	47
3.8. Blanco de polietileno sobre la superficie	48
3.9. Variando distancia entre detectores	49
3.10. Comparación simulación-experimento. 1 detector	50
3.11. Dimensiones utilizadas simulación (muestra enterrada)	50
3.12. Blanco de polietileno enterrado	51
3.13. Mina de prueba de polietileno I	52
3.14. Mina de prueba de polietileno II	54

3.15. Mina de polietileno III	55
3.16. Mina de prueba (TNT)	56
3.17. Introduciendo humedad	57

Índice de Tablas

1.1. Propiedades de algunas fuentes (α , n) [1].	4
1.2. Propiedades de algunas fuentes fotoneutrónicas [1].	5
1.3. Reacciones utilizadas en la detección de neutrones lentos	10
2.1. Características bloque de polietileno	23
2.2. Simulante de TNT. Características principales	31
3.1. Parámetros de la simulación	39
3.2. Composición del suelo	40
3.3. Características TNT y polietileno	53

Introducción

A través de los años, se ha encontrado que las técnicas nucleares ofrecen una posibilidad no destructiva de detección de materiales orgánicos vía dispersión de neutrones. Estas técnicas permiten la medición de densidades de los elementos orgánicos presentes en algunos materiales independientemente de su estructura, ver [2]. Debido a que estos elementos están presentes en explosivos y materiales ilícitos, se han implementado nuevas tecnologías en su detección. Estas tecnologías están avaladas tanto por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) como por los países interesados en el proceso de desminado.

Por razones de seguridad cívica y social se buscan actualmente métodos de reconocimiento no destructivos, en particular en el campo de la detección de objetos escondidos que contengan explosivos y sustancias ilícitas. El común denominador de este tipo de objetos es el estar compuestos principalmente por materiales orgánicos caracterizados por su bajo número atómico ($Z(H)=1$, $Z(C)=6$, $Z(N)=7$, $Z(O)=8$). Las técnicas nucleares usando neutrones y rayos gamma [3, 4] parecen ser bastante adecuadas para la detección de estos elementos. Uno de los atractivos es el hecho que esta identificación requiere haces de neutrones o de rayos gamma de comparativamente baja densidad. En particular -en cuanto al uso de los neutrones- aparece el problema de que el método más conocido es el de la detección de neutrones térmicos. Sin embargo, la termalización, es precisamente, realizada eficientemente por materiales de bajo A , lo cual quiere decir que para su identificación certera el objeto investigado tiene que estar rodeado de materiales distintos a los materiales orgánicos, condición que en la mayoría de los casos interesantes no se cumple, debido a la siempre presente (en algún porcentaje) humedad y eventualmente a la presencia de material vegetal. Este hecho hace que las aplicaciones de técnicas neutrónicas en países como Colombia tengan que enfrentar cada uno de estos problemas de manera aguda.

En la detección de minas antipersonales [5, 6] se utilizan diferentes técnicas nucleares basadas en neutrones, ya sean rápidos o lentos. Entre estos métodos se encuentran: la emisión gamma

inducida por neutrones [4], el análisis de neutrones térmicos [7, 8], rápidos y rápidos pulsados [7] y retrodispersión de neutrones [8, 9, 10], entre otros. El método que se va a simular es el correspondiente a la retrodispersión de neutrones. Este método se basa en la moderación de neutrones altamente energéticos (neutrones rápidos) que se producen ya sea por una fuente radioisótopa o por un generador de neutrones. La cantidad de neutrones de baja energía o térmicos que se retrodispersan desde el área investigada es una indicación directa de la cantidad de hidrógeno presente en el volumen irradiado. Tomando como ejemplo una mina antipersona plástica, la cantidad de hidrógeno presente en ésta es mucho mayor que la presente en el suelo que la rodea. Por lo tanto, si se combina una fuente de neutrones rápidos con un detector de neutrones lentos y se hace un censo de los neutrones retrodispersados, se puede verificar así la presencia de concentraciones anómalas de hidrógeno y determinar la posible presencia de una mina antipersona mediante un incremento en la tasa de conteo.

El objetivo principal es estudiar la interacción del neutrón con elementos livianos a través de la simulación de un sistema fuente-dispersor-detector, usando el paquete de simulación Geant4 [11]. Para esto se simula la respuesta del detector ante diferentes tipos de propiedades del dispersor, como son: composición química, densidad y volumen, además de simular la respuesta del detector ante las diferentes energías de los neutrones, rápidos ($E_n=200$ keV-10 MeV) o lentos ($E_n=0.025$ eV), provenientes del material dispersado. En adición a lo anterior, se realizaron en el laboratorio y se simularon algunos experimentos en la Università degli Studi di Padova (Italia) para así comprender el comportamiento de los neutrones frente al material dispersor; pero se debe además conocer cómo se comportan con el medio que las rodea, puesto que el método que se utiliza se basa en la detección de concentraciones altas de hidrógeno [3, 12] y, si los alrededores de la mina poseen niveles altos de éste, la detección se hace imposible. En [9] se discute las limitaciones del método de retrodispersión de neutrones relacionadas con la humedad del suelo en donde se encuentra la mina. La primera de ellas es el valor crítico de humedad que se alcanza cuando la densidad de átomos de hidrogeno en la mina es la misma que en el suelo, definiendo así una condición en la que la detección no es posible, y la segunda es aquella en que pequeñas variaciones en la humedad del suelo pueden conducir a una falsa detección.

Existen por lo menos dos maneras de atacar el problema:

1. Combinar la técnica de neutrones lentos con alguna otra que no se vea afectada por la presencia de agua. Tal otra técnica puede ser el uso de identificación por rayos gamma.
2. Detectar de subproductos provenientes de la reacción de neutrones rápidos con el objeto investigado.

Tal como es enunciado en el título del trabajo, la herramienta principal es la simulación numérica. Para ello se aprehendió el manejo de las subrutinas contenidas en el paquete Geant4, enfocado a

la comprensión de los procesos de la interacción neutrón-materia. Geant4, si bien ha terminado siendo un software amigable, no implica que la tarea de la descripción correcta de los procesos de emisión, interacción y detección de los neutrones haya sido trivializada.

El presente trabajo está dividido en cuatro capítulos. En el capítulo 1, **Algunos Aspectos de la Física de Neutrones**, se da una introducción a la clasificación de los neutrones dependiendo de su energía y a las principales fuentes de neutrones, y se indican las principales reacciones que pueden ser utilizadas para la detección de neutrones lentos. Igualmente, se describe el funcionamiento del detector simulado y sus principales características, y el proceso de moderación de neutrones como el principal medio de pérdida de energía de los neutrones rápidos. En el capítulo 2, **Retrodispersión de Neutrones: En contacto con el Método**, se describen experimentos llevados a cabo aplicando la técnica de retrodispersión de neutrones como parte del entrenamiento recibido en la Università degli Studi di Padova, en Padua, Italia. En el capítulo 3, **Simulación de un sistema fuente-dispersor-detector**, se simula el proceso de detección de material orgánico mediante un sistema fuente-dispersor-detector usando el paquete de programas Geant4. Finalmente, en el capítulo 4 se muestran las conclusiones y expectativas del trabajo.

CAPÍTULO 1

Algunos aspectos de la física de neutrones

En este capítulo se introducen aspectos generales sobre la física de neutrones, se incluye la clasificación de los mismos por su energía, se describen los principales medios de interacción, los tipos de fuentes de neutrones existentes y las reacciones y clases de detectores utilizados en la detección de neutrones lentos. Además, se describe el proceso de moderación de neutrones, en el cual se basa el método de retrodispersión.

1.1. Clasificación de los neutrones por su energía

Los neutrones se pueden clasificar dependiendo de su energía de la siguiente forma [1]:

- Neutrones rápidos, entre 200 keV y 10 MeV.
- Neutrones intermedios, entre 0.4 eV y 200 keV.
- Neutrones térmicos o lentos, con energías comparables con la energía de agitación térmica,
 $E \simeq kT = 0.025 \text{ eV}$.
- Neutrones Fríos, meV.
- Neutrones Ultra fríos, μeV .

1.2. La interacción de neutrones

Debido a que el neutrón carece de carga, no presenta interacciones coulombianas con los electrones y núcleos en la materia. Su principal medio de interacción es a través de la interacción fuerte con el núcleo. Esta interacción puede suceder bajo una variedad de procesos nucleares dependiendo de su energía [13]:

- **Dispersiones elásticas $A(n,n)A$** : El neutrón interactúa con los núcleos de su entorno, cediendo parte de su energía cinética sin producir estados excitados. Principal mecanismo de pérdida de energía de los neutrones rápidos.
- **Dispersiones inelásticas $A(n,n')A^*$, $A(n,2n)B$** : En este tipo de reacción el núcleo queda en un estado excitado, decayendo más tarde por radiación γ u otro tipo de radiación. Sucede en neutrones con energía suficiente para excitar el núcleo.
- **Captura radiativa de neutrones:** La reacción más común en neutrones de baja energía (0.025 eV). Los neutrones interactuantes son capturados por los núcleos del entorno, formando un núcleo compuesto en estado excitado. La energía de excitación es emitida en forma de radiación gamma. Los núcleos producto son generalmente radioactivos y son emisores gamma y beta.
- **Otras reacciones (n,p) , (n,d) , (n,α) , (n,t) , $(n,\alpha p)$, (n,γ)** : El neutrón es capturado y se emiten partículas cargadas: p protón, d deuterón, α partícula alfa, t tritio. Estas reacciones ocurren generalmente entre los eV y keV.
- **Fisión:** El neutrón interactuante con materia fisionable (U, Np, Pu) es capturado formando un núcleo compuesto que se subdivide en distintos fragmentos. Como productos adicionales se producen neutrones de alta energía.

1.3. Fuentes de neutrones

La escogencia de fuentes de neutrones es limitada y en general está basada en fisión espontánea o en reacciones nucleares en donde la partícula incidente es el producto de un proceso de decaimiento convencional [14]. Entre las fuentes de neutrones provenientes del proceso de fisión espontánea de elementos pesados están el ^{238}U y el ^{252}Cf . En el laboratorio se pueden producir fuentes artificiales de neutrones, entre las que se encuentran: (1) Radioisótopos, (2) Fotoneutrones, (3) Aceleradores de partículas y (4) Reactores nucleares [1]. A continuación se describen en detalle algunas de las fuentes de neutrones.

1.3.1. Fisión espontánea

Muchos de los núcleos transuránicos tienen una gran probabilidad de decaer por fisión espontánea, produciendo neutrones rápidos. Además de neutrones, durante este proceso se pueden producir rayos γ . Para usar uno de estos elementos como fuente de neutrones, generalmente se encapsulan en un contenedor lo suficientemente grueso para que sólo neutrones rápidos y rayos γ provengan de la fuente.

La fuente de fisión espontánea más comunmente usada es el ^{252}Cf , que tiene una vida media de 2.65 años. En una unidad de masa se producen por microgramo de muestra 2.30×10^6 n/s, y el ^{252}Cf involucra pequeñas cantidades de material activo generalmente del orden de los microgramos. Por esta razón se puede producir en tamaños pequeños, teniendo en cuenta las condiciones de encapsulación.

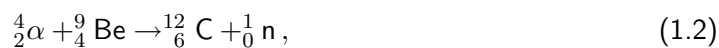
La forma típica de un espectro de fisión está dado de manera aproximada por

$$\frac{dN}{dE} = E^{1/2} e^{-E/T}. \quad (1.1)$$

En el caso particular del ^{252}Cf , $T = 1.3$ MeV y se tiene un máximo de energía de los neutrones entre 0.5 y 1 MeV, aunque se observan energías hasta de 6 a 8 MeV.

1.3.2. Radioisótopos vía reacciones (α, n)

Puesto que partículas alfa energéticas se producen a partir del decaimiento de algunos núcleos radioactivos, es posible fabricar una fuente autocontendida de neutrones mezclando un isótopo emisor de alfas con un material blanco. Muchos núcleos blanco pueden producir reacciones (α, n), pero la máxima producción de neutrones ocurre cuando el blanco es berilio. Así los neutrones son producidos a partir de la reacción



que tiene un valor $Q = +5.71$ MeV. Muchas de las partículas α son detenidas en el blanco y sólo una de cada 10^4 reacciona con el núcleo de berilio.

Estas fuentes producen neutrones de energía en el rango de 0-13 MeV, con un valor medio cercano a 5 MeV.

En la tabla 1.1 se listan las fuentes (α, n) más usadas. En muchos casos hay una gran contribución de rayos γ , lo que produce un fondo que en ocasiones es inconveniente, puesto

que interfiere con las medidas. La escogencia de estas fuentes se basa principalmente en su utilidad, costo y vida media.

Fuente	E_{α} (MeV)	τ_{fuente}	Producción (n/ α)
$^{210}\text{Po}/\text{Be}$	5.30	138.3 días	0.7×10^{-4}
$^{226}\text{Ra}/\text{Be}$	4.78, 4.59	1.622×10^3 años	1.8×10^{-4}
$^{239}\text{Pu}/\text{Be}$	5.15	2.24×10^4 años	0.6×10^{-4}
$^{241}\text{Am}/\text{Be}$	5.48	4.60×10^2 años	0.7×10^{-4}
$^{242}\text{Cm}/\text{Be}$	6.11	163 días	1.1×10^{-4}

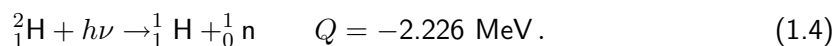
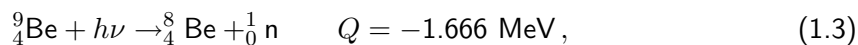
Tabla 1.1. Propiedades de algunas fuentes (α , n) [1].

En este tipo de fuentes el espectro de energía de los neutrones depende del tamaño de la fuente. Así, para fuentes pequeñas el espectro de neutrones corresponde a un espectro de reacciones (α , n), mientras que para fuentes grandes existen procesos secundarios tales como reacciones (n, 2n) en el berilio y (n, fisión) en el plutonio que son apreciables en el espectro de neutrones.

En el caso de la reacción $^{239}\text{Pu}/\text{Be}$, para obtener 1Ci (3.7×10^{10} Bq) de actividad son necesarios 16 g del material, y para un tamaño de la fuente de unos pocos centímetros se obtienen cerca de 10^7 n/s.

1.3.3. Fuentes de fotoneutrones

Algunos radioisótopos emisores gamma se pueden utilizar para producir neutrones combinándose con un blanco apropiado. Las fuentes fotoneutrónicas se basan en dar la suficiente energía de excitación al núcleo blanco por absorción de un rayo γ y así permitir la emisión de un neutrón libre. Sólo dos núcleos blanco tienen significado práctico como fuentes de fotoneutrones: el berilio y el hidrógeno, que producen neutrones vía las reacciones



Se requiere un rayo γ con al menos el valor de Q para que la reacción sea energéticamente posible. Si se excede este valor, la energía del neutrón se calcula como

$$E_n(\theta) \simeq \frac{M(E_\gamma + Q)}{m + M} + \frac{E_\gamma [(2mM)(m + M)(E_\gamma + Q)]^{1/2}}{(m + M)^2} \cos(\theta), \quad (1.5)$$

donde

θ = ángulo entre el rayo γ y la dirección del neutrón,

E_γ = energía del rayo γ ,

M = Masa del núcleo residuo $\times c^2$,

m = Masa del neutrón $\times c^2$.

Una de las ventajas de las fuentes de fotoneutrones es que si el rayo γ es monoenergético los neutrones se consideran monoenergéticos. La principal desventaja de este tipo de fuentes es que es necesario mucha actividad gamma para producir fuentes de neutrones, cerca de uno de cada 10^5 ó 10^6 rayos gamma interactúa para producir un neutrón, y por lo tanto los neutrones van a aparecer en un fondo de rayos gamma muy intenso.

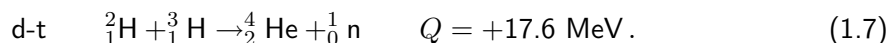
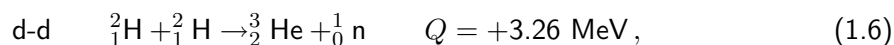
En la tabla 1.2 , se muestran algunas propiedades de las fuentes de fotoneutrones.

Fuente	E_γ (MeV)	τ_{fuente}	E_n (keV)	Producción ($n/\beta \text{ cm}^2 \text{ gm}^{-1}$)
$^{24}\text{Na}/\text{Be}$	2.757	15.1 horas	967	3.8×10^{-6}
$^{24}\text{Na}/\text{D}_2\text{O}$	2.757	15.1 horas		7.3×10^{-6}
$^{72}\text{Ga}/\text{D}_2\text{O}$	2.51	14.3 horas		1.9×10^{-6}
$^{124}\text{Sb}/\text{Be}$	1.691	60.9 días	23	5.1×10^{-6}
$^{140}\text{La}/\text{Be}$	2.51	40.2 horas	760	0.08×10^{-6}

Tabla 1.2. Propiedades de algunas fuentes fotoneutrónicas [1].

1.3.4. Reacciones debidas a partículas cargadas aceleradas

Las reacciones que involucran partículas incidentes tales como protones (p), deuterones (d) y tritrios (t) se deben llevar a cabo en aceleradores de partículas. Dos de las reacciones más importantes de este tipo utilizadas para producir neutrones son



Debido a que la barrera coulombiana entre el deuterón incidente y el blanco es relativamente pequeña, los deuterones no necesitan ser acelerados hasta una energía muy alta para producir neutrones. Este tipo de reacciones es muy utilizada en generadores en los cuales los iones de deuterio son acelerados por un potencial entre 100 y 300 kV.

Puesto que la energía de la partícula incidente es pequeña comparada con el valor Q para cualquiera de las dos reacciones anteriores, la energía de los neutrones producidos es cercana al valor $Q = 3$ MeV para la reacción d-d y 14 MeV para la reacción d-t.

1.4. Moderación de neutrones

La moderación es el retraso de los neutrones rápidos. Un neutrón entra en la materia y se puede dispersar hacia adelante o hacia atrás, de forma elástica o inelástica, perdiendo energía hasta que llega al equilibrio térmico [13]. Teniendo en cuenta solo colisiones elásticas, el problema puede ser presentado de forma no relativista y de manera simple con leyes de conservación. De esta manera, en el sistema centro de masa el momentum lineal total es cero, y por lo tanto

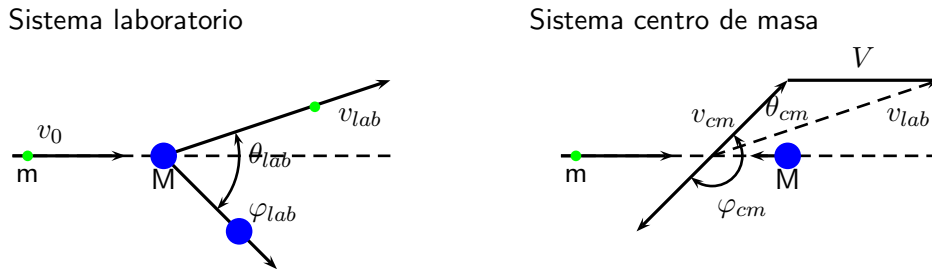


Figura 1.1. Dispersión elástica en el sistema de laboratorio y centro de masa.

$$m\vec{v}_{cm} = -M\vec{V}. \quad (1.8)$$

Por leyes de conservación,

$$v_{cm} = |v_{(n)cm}|_{antes} = |v_{(n)cm}|_{después}, \quad (1.9)$$

$$V = |v_{(N)cm}|_{antes} = |v_{(N)cm}|_{después}. \quad (1.10)$$

De aquí se encuentra que la velocidad del núcleo respecto del centro de masa (en unidades de la masa del neutrón) es

$$V = \frac{1}{1 + A}, \quad (1.11)$$

y la velocidad del neutrón respecto del centro de masa es

$$v_{cm} = \frac{A}{A + 1} v_0, \quad (1.12)$$

donde A es la masa atómica del blanco.

A partir de la Figura 1.1 se puede determinar el valor de la velocidad del neutrón en el laboratorio en términos de v_{cm} y V_{cm} ,

$$v_{lab}^2 = v_{cm}^2 + V_{cm}^2 + 2v_{cm}V_{cm} \quad (1.13)$$

$$= \frac{v_0^2}{(A + 1)^2} (A^2 + 1 + 2A \cos \theta_{cm}). \quad (1.14)$$

El objetivo es obtener la energía final en términos de la inicial. Para ésto se hace

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\frac{1}{2} m v_{lab}^2}{\frac{1}{2} m v_0^2} \frac{A^2 + 1 + 2A \cos \theta_{cm}}{(A + 1)^2},$$

de tal forma que la energía puede tomar los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \frac{E}{E_0} \Big|_{máx} &= 1, \\ \frac{E}{E_0} \Big|_{mín} &= \frac{(A - 1)^2}{(A + 1)^2}. \end{aligned} \quad (1.15)$$

Lo anterior se puede escribir como

$$\alpha E_0 < E < E_0,$$

donde $\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$.

Para radiación isotrópica, la densidad de colisión con n colisiones previas se denota como $F_n(E)$.

Para $n = 1$ y $n = 2$ se tiene

$$F_1(E) = \begin{cases} \frac{1}{E_0(1-\alpha)} & \alpha E_0 < E < E_0, \\ 0 & 0 < E < \alpha E_0. \end{cases}$$

$$F_2(E) = \begin{cases} \frac{1}{E_0(1-\alpha)^2} \ln\left(\frac{E_0}{E}\right) & \alpha E_0 < E < E_0, \\ \frac{1}{E_0(1-\alpha)^2} \ln\left(\frac{E}{\alpha^2 E_0}\right) & \alpha^2 E_0 < E < \alpha E_0, \\ 0 & 0 < E < \alpha^2 E_0. \end{cases}$$

En la Figura 1.2 se grafican las distribuciones de energía, obtenidas usando Monte Carlo, para el proceso de moderación de neutrones colisionando con ^{12}C .

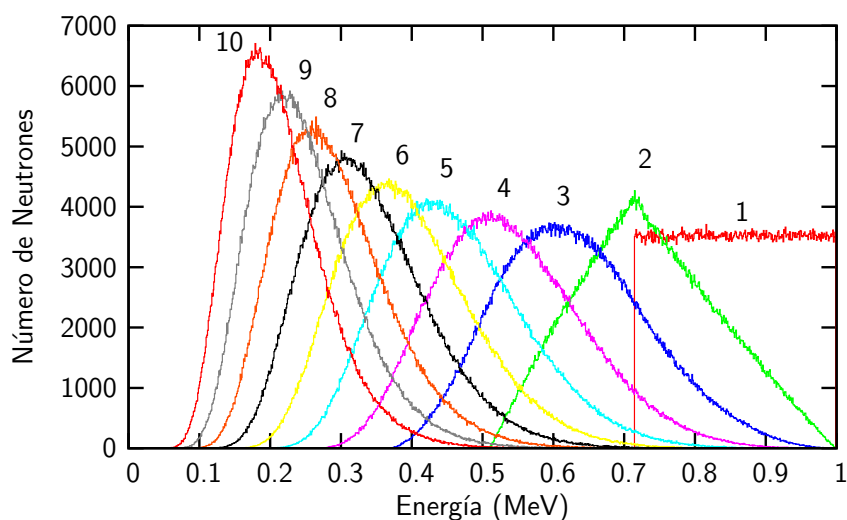


Figura 1.2. Espectros de moderación de neutrones en ^{12}C después de 10 colisiones elásticas.

1.5. Detectores de neutrones

1.5.1. Ley $1/v$

Debido a la ausencia de carga eléctrica, la detección de neutrones se basa principalmente en la detección de partículas cargadas o radiaciones producto de reacciones nucleares con un átomo blanco del tipo $A(n,b)B$, cuya sección eficaz tiene la forma [1]

$$\sigma(v) = \frac{1}{\pi \hbar^4} |M|^2 \frac{p_b^2}{v_b v} (2I_b + 1), \quad (1.16)$$

donde:

M : Matriz Nuclear,

p_b : Momentum lineal de la partícula residual,

v_b : Velocidad de la partícula residual,

v : Velocidad del neutrón incidente,

I_b : Momentum angular de la partícula residual,

siendo la energía de la partícula emergente del orden de 1 MeV. Bajo estas circunstancias la densidad de estados finales $\frac{p_b^2}{v_b}$, es independiente de la velocidad v , y teniendo en cuenta que la matriz nuclear M es independiente de v , entonces la sección eficaz es proporcional a $1/v$.

Así, si se conoce $\sigma_0(v_0)$ para algún valor de velocidad del neutrón, v_0 ; la sección eficaz en el caso de neutrones térmicos ($E_n=0.025$ eV) (1.16) se puede escribir como:

$$\sigma(v) = \sigma_0 v_0 / v, \quad (1.17)$$

de esta manera, los detectores que cumplen (1.17) se llaman detectores $1/v$.

Debido a que la sección eficaz de la interacción de neutrones con distintos materiales depende fuertemente de la energía del neutrón, se han desarrollado diferentes técnicas para detectar neutrones en diferentes regiones de energía [15]. Existen los detectores de ionización gaseosa, de centelleo y de láminas [16]. En las siguientes secciones se explicaran de manera un poco más amplia las principales características de los diferentes métodos de detección.

1.5.2. Detección a partir de reacciones de partícula cargada

Entre las reacciones que involucran neutrones lentos y partículas cargadas se encuentran con gran probabilidad de llevarse a cabo los siguientes procesos de captura neutrónica: $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, $^6\text{Li}(n,\alpha)$, $^3\text{He}(n,p)$. Las características de cada una de estas reacciones se encuentran en la tabla 1.3, donde se muestra la reacción que tiene lugar, el Q de la reacción y el valor de la sección eficaz [15, 1], y en la figura 1.3 se observa la sección eficaz como función de la energía del neutrón para las reacciones antes mencionadas.

Cada una de las reacciones anteriores tiene sus ventajas y desventajas en el proceso de detección de neutrones. La reacción (n,α) en ^{10}B es la más popular, debido a que los compuestos de boro se pueden encontrar tanto en estado gaseoso como sólido. Por ejemplo, el trifluoruro de

Reacción	Q (MeV)	Abundancia (%)	Sección eficaz (barns)
$^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\alpha$	$Q=2.792$ (eb)	19.1 - 20.3	3828 ± 6
$\rightarrow ^7_3\text{Li}^* + ^4_2\alpha$	$Q=2.310$ (ee)		
$^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^4_2\alpha$	$Q=4.78$	7.34 - 7.68	941 ± 3
$^3_2\text{He} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^1_1\text{p}$	$Q=0.764$	1.3×10^{-4}	5327 ± 10

Tabla 1.3. Características principales de algunas reacciones utilizadas en detectores de neutrones lentos. eb: estado base, ee: estado excitado.

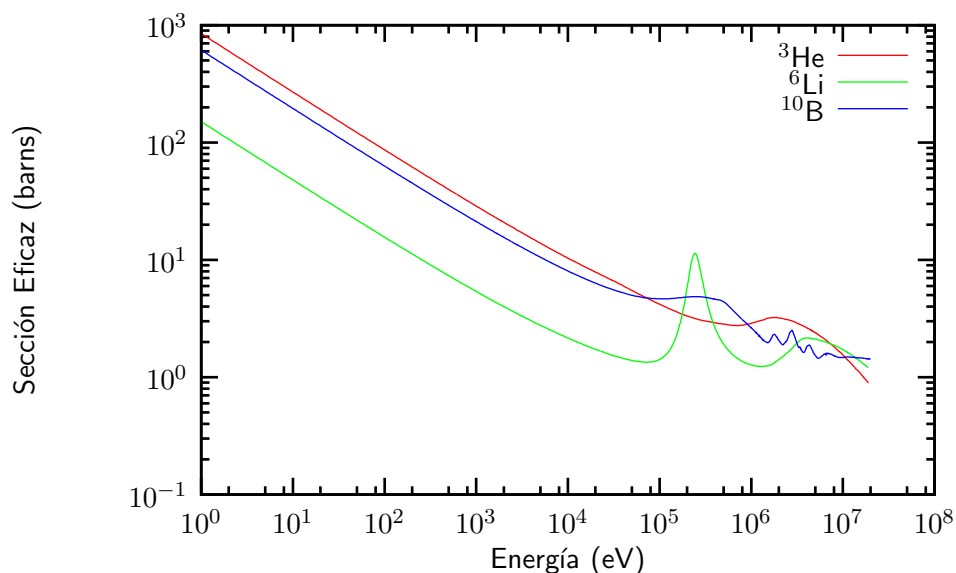


Figura 1.3. Sección eficaz como función de la energía del neutrón para las reacciones $^{10}\text{B}(n,\alpha)$, $^6\text{Li}(n,\alpha)$ y $^3\text{He}(n,p)$. Datos tomados de Evaluated Nuclear Data Center File (ENDF) [17].

boro (BF_3) es usado en forma gaseosa como un contador proporcional, lo que hace que sea un detector eficiente, puesto que las partículas cargadas son detectadas dentro del volumen activo y no pierden energía, como sería el caso en un blanco sólido. Otra ventaja es que el ^{10}B se obtiene fácilmente, lo que reduce el costo en la producción. Ahora bien, para el caso del ^6Li , el alto valor del Q para la reacción (n,α) permite utilizar este tipo de reacción en el detector de neutrones para discriminar rayos γ provenientes del fondo. Así, el espectro mostrará sólo la energía correspondiente a las partículas α . La principal desventaja en este caso es que no existen compuestos de litio en estado gaseoso, por lo que no existen contadores proporcionales utilizando este tipo de reacción, pero si existen centelladores con una eficiencia del 50 % que

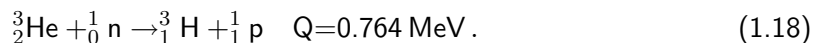
usan litio enriquecido al 95 % en ${}^6\text{Li}$.

La reacción ${}^3\text{He}(n,p)$ es la de interés en el presente trabajo. Ésta tiene una ventaja sobre las otras: el helio siempre existe en forma gaseosa, lo que hace que sea utilizado como gas en el contador proporcional. Otra de sus ventajas es el valor de la sección eficaz, que para el rango de energía 0.01 eV a 0.1 keV de los neutrones es grande y proporcional a $1/v$, como se observa en la figura 1.3. Se dedicará una sección de este capítulo al contador proporcional basado en la reacción ${}^3\text{He}(n,p){}^3\text{H}$ para la detección de neutrones.

Una característica importante de los detectores basados en reacciones (n,α) o (n,p) es que se obtiene una salida instantánea y una respuesta inmediata a las variaciones en intensidad del neutrón incidente.

1.5.3. Contador proporcional de ${}^3\text{He}$

Como se mencionó anteriormente, el gas de ${}^3\text{He}$ se usa como medio de detección de neutrones a través de la reacción



Para reacciones inducidas por neutrones lentos, el valor bajo de Q y el poco momentum del neutrón incidente llevan a que los productos de la reacción tengan direcciones opuestas con energías

$$E_p = 0.573 \text{ MeV} \quad \text{y} \quad E_{3\text{H}} = 0.191 \text{ MeV}.$$

El gas de ${}^3\text{He}$ es una buena alternativa para la detección de neutrones lentos, debido al alto valor en su sección eficaz para las energías de los neutrones lentos comparado con las reacciones en el boro y el litio.

El contador proporcional de ${}^3\text{He}$ se caracteriza por su alta eficiencia para detectar neutrones térmicos y epitérmicos y su baja eficiencia para la detección de rayos γ . Sus propiedades generales están estudiadas en [18].

Un contador proporcional se basa en la detección directa de iones producidos en un gas cuando pasa radiación. Debido a la gran movilidad de los iones se usan gases como medio de recolección de la ionización de la radiación. El proceso de detección entonces involucra recolección y caracterización de los iones [13].

En este caso se tiene un cilindro lleno de un gas noble, ${}^3\text{He}$. Un potencial V_0 positivo con

respecto a la pared del cilindro se conecta al alambre central (ánodo) y crea un campo eléctrico. Se crea un par electrón-ión directamente si la radiación es cargada e indirectamente si es a través de reacciones secundarias para radiación neutra. El campo eléctrico arrastra los electrones hacia el ánodo (+) y los iones hacia el cátodo (-), y así el número de pares creados es proporcional a la energía de la radiación depositada en el contador, produciéndose una señal que es leída a la salida del circuito. En la figura 1.4 se esquematiza un contador proporcional.

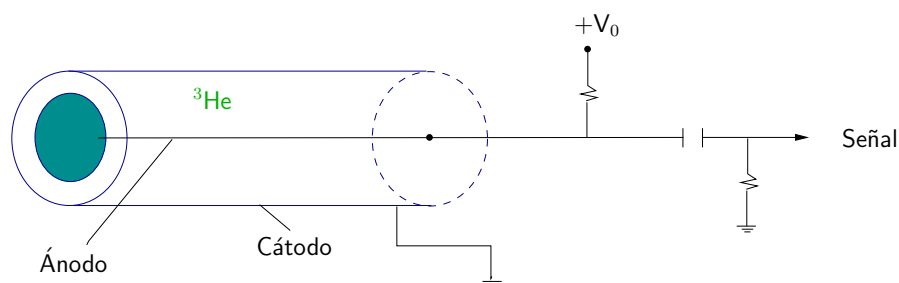


Figura 1.4. Construcción básica de un contador proporcional cilíndrico.

Para un detector de dimensiones grandes se espera que en cada reacción con un neutrón se deposite en forma de energía cinética del tritón y el protón 764 keV, pero debido a que el rango de los productos de la reacción en el gas no siempre es comparable con las dimensiones del contador proporcional, se debe tener en cuenta el llamado **efecto pared** [19].

Efecto pared

Debido a que el neutrón incidente posee un momentum lineal poco apreciable, los productos de la reacción son opuestos en dirección. Si el protón golpea la pared, el núcleo residual de ${}^3\text{H}$ se va en dirección opuesta, y lo que tiene mayor probabilidad de suceder es que deposite toda su energía en el gas. En caso contrario, si el núcleo de tritio golpea la pared, el que deposita toda su energía en el gas es el protón. De esta manera lo que se verá son las pérdidas en la pared para sólo un producto de la reacción, existiendo así dos posibilidades:

- **Caso 1:** El protón golpea la pared después de depositar alguna fracción de su energía en el gas, mientras que el núcleo de ${}^3\text{H}$ entrega toda su energía al gas. En este caso, la energía depositada varía entre $E_{3\text{H}}+0$ y $E_p + E_{3\text{H}}$ y la reacción puede llevarse a cabo entre una distancia cero de la pared y el rango del protón.
- **Caso 2:** El núcleo de ${}^3\text{H}$ golpea la pared después de haber entregado parte de su energía al gas mientras que el protón deposita toda su energía en el gas. Entonces la energía depositada varía entre E_p y $E_p + E_{3\text{H}}$ y la reacción puede ocurrir entre una distancia cero de la pared y el rango del tritón en el gas.

Debido a que el lugar dentro del detector en el que se lleva a cabo la reacción es igual de probable, la distribución de energía depositada es aproximadamente uniforme en los dos extremos

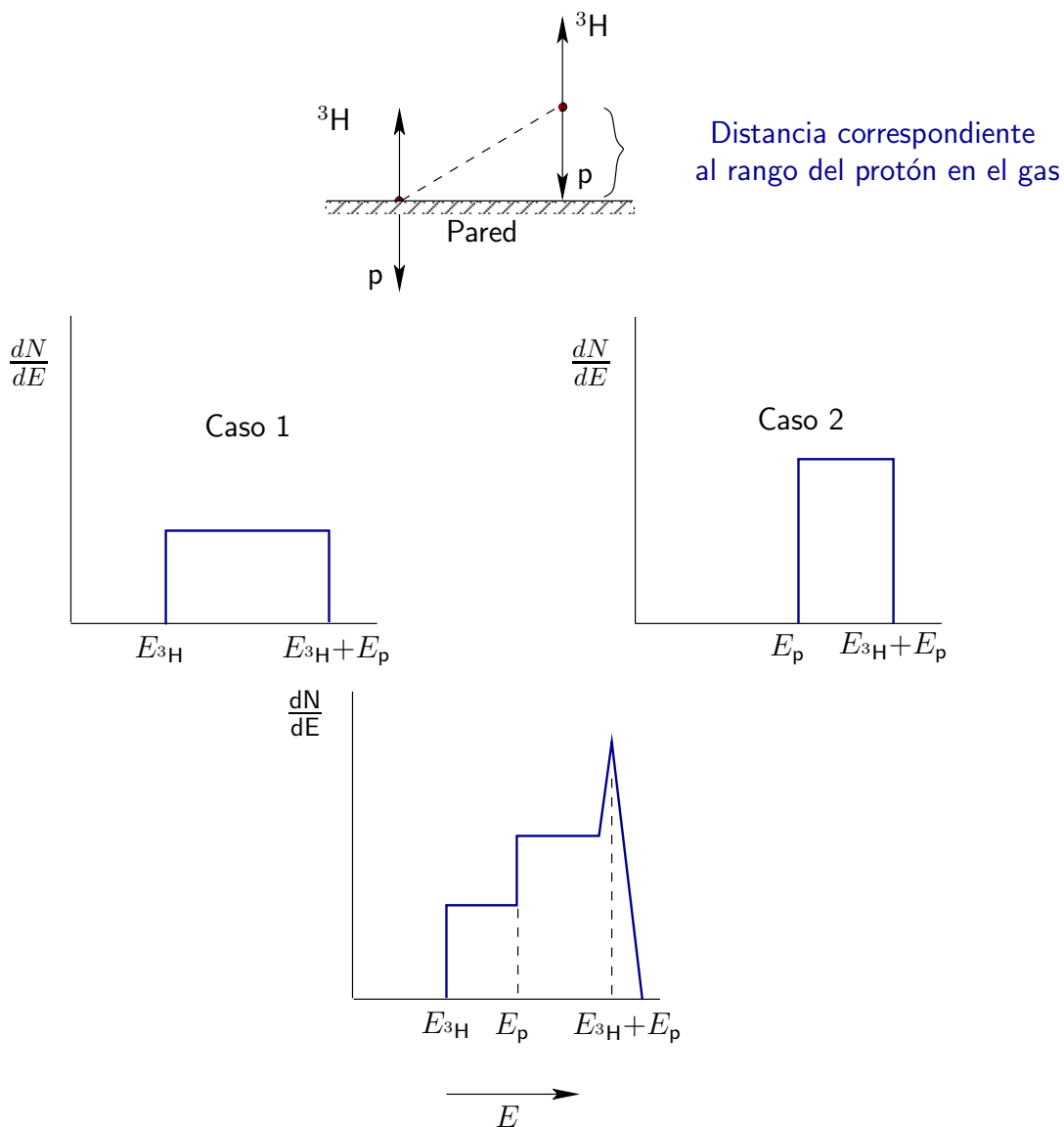


Figura 1.5. Efecto pared en un contador proporcional. Se esquematiza cada uno de los casos. **Caso 1** El protón golpea la pared y el tritón deposita toda su energía en el gas. **Caso 2** El tritón golpea la pared y el protón deposita toda su energía en el gas. Por último se muestra el comportamiento del espectro total.

En la figura 1.5 se ilustra el efecto pared en un contador proporcional. Además se muestra el pico de energía total que resulta a partir de las reacciones en las que los dos productos de la reacción (protón y tritón) son absorbidos.

En este tipo de detector, el espectro obtenido no da información acerca de la energía del neutrón incidente, y sólo depende del tamaño y de la geometría del mismo.

En la figura 1.6 se observa el espectro esperado para un contador proporcional de ^3He en el que el efecto pared es significativo.

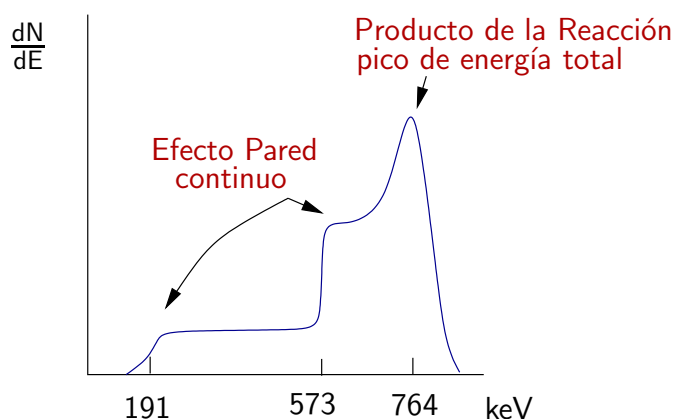


Figura 1.6. Espectro esperado para un contador proporcional en el que el efecto pared es significativo. Las discontinuidades se presentan en los valores para la energía correspondiente a los productos de la reacción.

Existen algunas consideraciones para reducir el efecto pared:

- Las dimensiones de detector deben ser grandes comparadas con el rango de los productos, de tal forma que las reacciones del gas con los neutrones ocurran lejos de las paredes.
- Incrementar la presión del gas para reducir el rango de los productos de la reacción, ya que, debido a la baja masa atómica del ^3He los rangos de los productos de la reacción son grandes y el efecto pared es considerable.
- Adicionar un gas pesado para reducir el rango de las partículas cargadas que son producto de la reacción.

1.5.4. Activación neutrónica

En comparación con el caso de reacciones de partícula cargada, la activación neutrónica es un proceso en cual la radiación de neutrones induce radiactividad en materiales y ocurre cuando el núcleo captura neutrones libres. Al quedar en un estado excitado, el núcleo decae emitiendo algún tipo de radiación. En este caso, la activación neutrónica se basa en determinar la radiactividad inducida por reacciones (n,γ) en un blanco delgado expuesto a un haz de neutrones. Este detector, entonces, sólo da información acerca del promedio en el tiempo del flujo de neutrones en el período de irradiación.

Este método tiene como ventaja que los blancos pueden ser muy delgados, de manera que no se introduzcan perturbaciones en el flujo que se va a medir, y después de un tiempo determinado, se pueden retirar del haz de neutrones y medir la actividad inducida en un contador externo.

1.5.5. Reacciones de fisión inducidas por neutrones

Para neutrones de baja energía, la sección eficaz del ^{233}U , ^{235}U y ^{239}Pu es relativamente grande, y pueden ser usados como base para un detector de neutrones, en el que el Q de la reacción es del orden de 200 MeV, extremadamente grande comparado con los nombrados anteriormente. Los pulsos proporcionados son órdenes de magnitud mayores que los anteriores y la mayoría de los núcleos fisionables son emisores naturales de radiación α . Por lo tanto, los detectores que utilizan estos materiales pueden producir una señal debido al decaimiento α .

1.6. Retrodispersión de neutrones

El método de retrodispersión de neutrones se basa en la moderación de neutrones altamente energéticos (neutrones rápidos) que se producen ya sea por una fuente radioisótopa o por un generador de neutrones. La cantidad de neutrones de baja energía (en donde se incluyen neutrones térmicos y lentos) que se retrodispersan desde el área investigada es una indicación directa de la cantidad de hidrógeno presente en el volumen irradiado. Este método se basa principalmente en la moderación debido a hidrógeno, puesto que después de aproximadamente 10 colisiones la energía del neutrón incidente ha disminuido hasta que el neutrón se vuelve lento o térmico, mientras que por ejemplo en carbono son necesarias cerca de 126 colisiones para que ésto suceda [1].

El método de retrodispersión de neutrones ha sido estudiado como técnica nuclear aplicada al proceso de desminado humanitario, Esta aplicación es relativamente nueva. Los primeros intentos se basan en la determinación de las concentraciones de H, C, N y O en materiales presentes en contrabando (drogas y explosivos), dentro de, por ejemplo contenedores de carga

[20]. En el proyecto EXPLODET (EXPLOsive DETection) [5] ya se define un diseño conceptual de un detector de minas antipersona basado en reacciones inducidas por neutrones. Ésta es una aplicación inmediata de las técnicas nucleares y uno de los primeros estudios detallados en donde se concibe un sistema portátil para detectar pequeñas cantidades de explosivos escondidos haciendo uso de tecnología moderna para mejorar la eficacia total desde el punto de vista de eficiencia, costos y transportabilidad. En la Ref. [21] la atención se centra en el material dispersor, haciendo pruebas en grafito, agua y polietileno, entre otros, y se encuentra una dependencia con la energía de la sección eficaz para la dispersión elástica en cada caso. Estos resultados plantean la posibilidad de hacer distinción de los elementos contenidos en las muestras y en [3] estos resultados se aplican a la detección de drogas y explosivos. En la Ref. [12] se estudia el método para determinar la composición elemental de muestras enterradas compuestas en su mayoría de H, C, N, O, Al, S, Fe y Pb, obteniendo espectros característicos para determinadas fracciones de H, C, N y O presentes en las muestras.

La experimentación utilizando esta técnica ha estado acompañada de la simulación utilizando métodos de Monte Carlo como una ayuda tanto para la comprensión de la complejidad de proceso de retrodispersión como para la optimización de la geometría utilizada en la experimentación [22]. El estudio de diferentes técnicas utilizando neutrones es descrito ampliamente en [4, 7]. Allí se describe el análisis por neutrones térmicos (TNA por sus siglas en inglés) aplicado a la detección de explosivos basado en la identificación de nitrógeno e hidrógeno a partir de la detección de los rayos γ de 2.22 y 10.38 MeV provenientes de la captura neutrónica producida en ^1H y ^{14}N , respectivamente. Otra técnica es el análisis de neutrones rápidos, en donde se detectan los rayos γ provenientes de la desexcitación de los núcleos activados vía dispersiones elásticas con los neutrones rápidos determinando en cada elemento de volumen los elementos presentes vía la deconvolución de los espectros de rayos γ . El método de moderación de neutrones (sección 1.4) se basa en una técnica de medir el contenido de hidrógeno en la tierra y en pozos petroleros. Algunos de los instrumentos desarrollados y probados con esta aproximación son: Delft University Neutron Backscattering Landmine Detector (DUN-BLAD) [23], Detection and Imagine of Anti-personnel Landmines by Neutron Backscattering Technique (DIAMINE) [10, 24], y Hydrogen Density Anomaly Detection (HYDAD) [20, 25].

Uno de los grandes problemas de la aplicación del método de retrodispersión de neutrones en la detección de material orgánico es la presencia de humedad en el suelo. En las Refs. [9, 26], se estudia el valor crítico de la humedad cuando la densidad de los átomos de hidrógeno en la mina es igual que en el suelo, encontrándose que un valor crítico cercano al 10 % en fracción de masa del suelo, lo que sugiere la aplicación del método en lugares áridos o con suelos con porcentajes de humedad menores al 10 %.

Retrodispersión de neutrones: Aspectos experimentales

En este capítulo se introducen algunos aspectos experimentales de la técnica de dispersión de neutrones para detectar material orgánico. Los resultados que se muestran en esta sección hacen parte del experimento realizado en el Laboratori Nazionali di Legnaro, en Legnaro, Italia.

La técnica de retrodispersión de neutrones, además de estudiarse por medio de métodos de Monte Carlo, ha sido ampliamente explorada experimentalmente, y ha sido aplicada a la detección de minas antipersona y antitanque [5, 10, 12, 4, 20]. Además, la validez de la técnica ha sido comprobada en diferentes condiciones [9, 26].

Los resultados experimentales mostrados pertenecen a la aplicación de la técnica de retrodispersión de neutrones, siguiendo los métodos experimentales escritos en Refs. [10, 26, 27]. Para llevar a cabo esta práctica se utilizaron dos contadores de neutrones de ^3He ubicados de manera simétrica respecto a la fuente de neutrones rápidos de ^{252}Cf . El objetivo principal es observar el comportamiento de la diferencia entre las cuentas entre los detectores cuando se utiliza una muestra, ya sea un bloque de polietileno de alta densidad o una mina prueba (simulante de TNT), en diferentes posiciones respecto de los detectores.

En el caso de la simulación se modificó el programa utilizado [10], que corre bajo Geant3, en el cual se cambió el tipo de geometría del sistema, los materiales utilizados y las posiciones, tanto de la fuente como de las muestras. Cabe aclarar que los resultados de la simulación mostrados dan información sólo del número de neutrones que llegan al detector y no se tuvo en cuenta si éstos interactúan con el gas contenido en el detector. Además no se obtiene información

acerca de las intensidades.

2.1. Parte experimental

2.1.1. Descripción geométrica

Se utilizaron dos contadores de neutrones "SN-01", de **ASPECT, Scientific Production Center**. La mezcla de gas con la que se llena el tubo es: 2.8 atm. ^3He + 1.2 atm Ar + 20 Torr CO_2 . La longitud total de cada detector es de 533 mm, con una longitud del volumen efectivo de 400 mm, un diámetro de 30 mm y un peso neto de 300 g.



Figura 2.1. Montaje experimental.

El montaje 2.1, consta de una caja de arena seca, simulando el suelo, de dimensiones $156 \times 89.54 \times 56$ cm^3 . Sobre la caja se ubica un soporte de aluminio móvil de 65.5 cm de ancho, 64 cm de largo y 8 mm de espesor, con un orificio interior de 40×40 cm^2 en donde se ubican la fuente en una posición fija y los detectores. Se toma como el cero de referencia la posición de la fuente. Un detector se ubica a la derecha (detector A) y el otro a la izquierda (detector B). La distancia d entre los detectores puede variar. En la figura 2.2 se muestran las dimensiones del soporte. Además se utiliza un blanco, que puede ser un bloque de polietileno de alta densidad, una mina de prueba de polietileno o de simulante de TNT. Tanto la posición del blanco como la de la fuente y las de los detectores son los parámetros a variar durante la práctica. En la figura 2.3 se muestra la vista lateral del montaje, donde se observa la posición de los detectores, de la muestra y de la fuente de ^{252}Cf .

La fuente de neutrones rápidos es una fuente de ^{252}Cf , que al momento de realizar la práctica

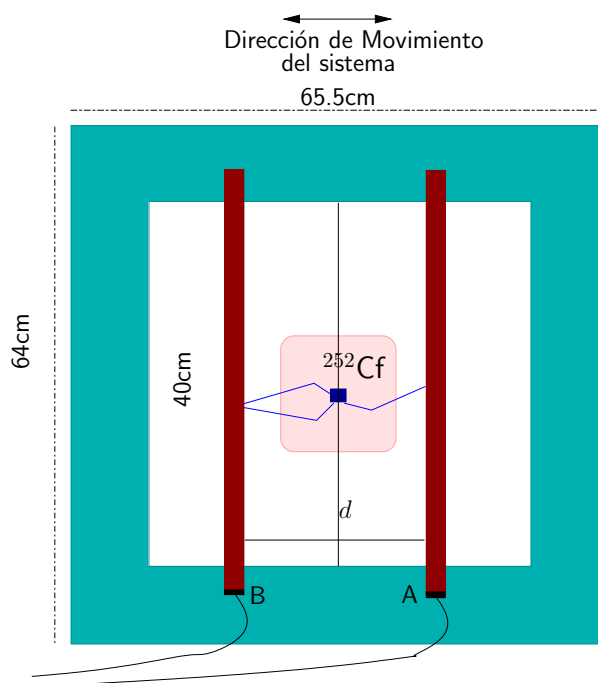


Figura 2.2. Soporte móvil d : distancia variable entre los tubos.

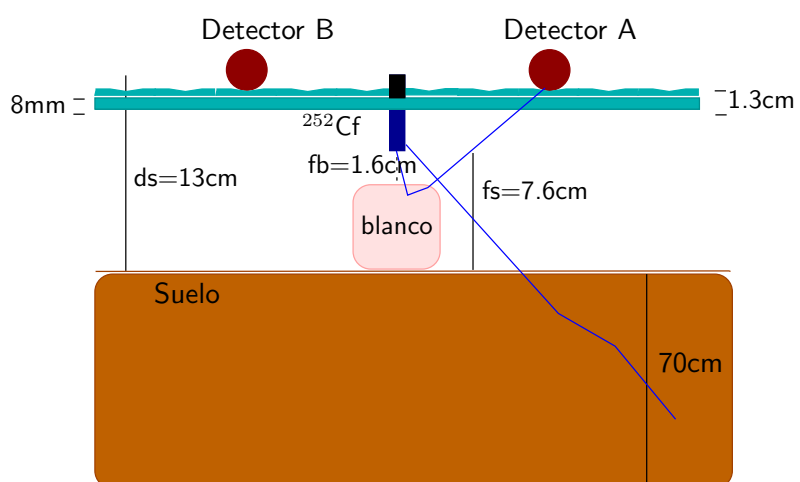


Figura 2.3. Dimensiones utilizadas: d_s ; distancia detector-suelo, f_s ; distancia fuente-suelo, f_b ; distancia fuente-blanco.

producía $\sim 10^3$ n/s. El Californio está encapsulado en un tubo de 5 cm de largo y 1 cm de diámetro.

2.1.2. Descripción electrónica

En la figura 2.4 se muestra el diagrama de bloques electrónicos usado para llevar a cabo la adquisición de datos. Los tubos de ^3He son alimentados por 6 V. La señal proveniente del detector pasa por un pre-amplificador incluido en cada tubo. Ésta se divide utilizando un divisor de señales, una de las señales de salida va al amplificador, y después al sistema de adquisición de datos, la otra va al discriminador de fracción constante, CFD por sus siglas en inglés, en donde los tiempos de llegada de la señal se marcan de manera precisa. Aquí se escoge un umbral para cada una de las señales, que en este caso fue de 60 mV. Luego se pasa al contador, en donde se escoge el tiempo de conteo, que durante toda la parte experimental se fijo en 60 s. La señal de salida del CFD para los dos detectores va a un Logic Fan In-Fan Out, en donde se hace un OR lógico con las señales. La salida se utiliza como trigger externo en la adquisición de datos, es decir el sistema empieza a adquirir cuando la señal de cualquiera de los dos detectores empieza.

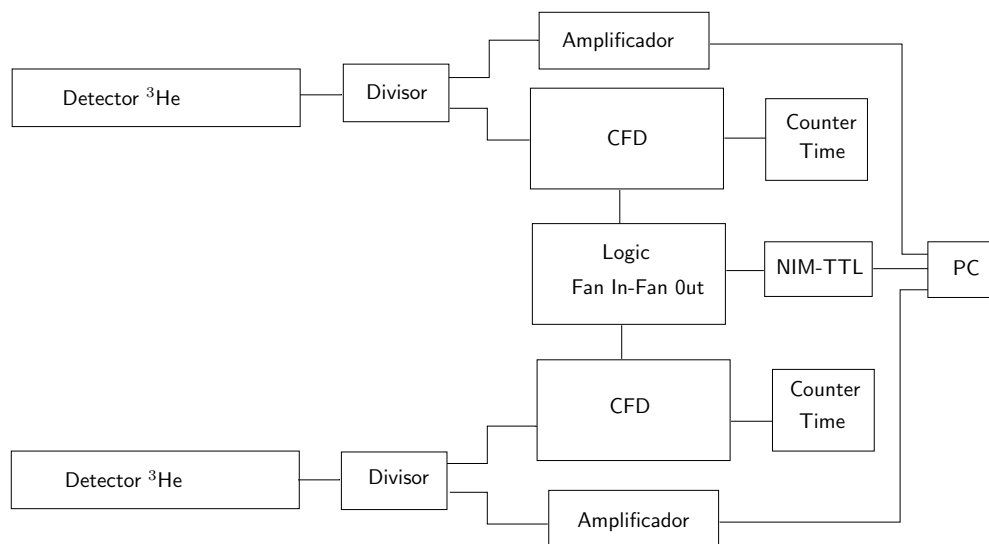


Figura 2.4. Diagrama de bloques electrónicos.

2.1.3. Experiencias

El objetivo de las experiencias es observar el comportamiento de la diferencia en el número de cuentas entre los detectores, Para ésto se utilizan distintas configuraciones variando la distancia

entre los detectores, el tipo y posición de la muestra, la distancia entre la fuente y la muestra y la distancia entre los detectores y la muestra.

Errores experimentales

Dependiendo del tipo de distribución que sigan los datos experimentales se puede hacer una estimación de los errores en cada uno de los casos. A continuación se muestra de manera general los estimativos de error del valor medio para las distribuciones Gaussiana y de Poisson. Para una discusión detallada ver Ref. [13].

Distribución de Gauss

Para una muestra de n puntos provenientes de una distribución Gaussiana, el mejor estimativo teórico para su valor medio es

$$\hat{\mu} = \frac{\sum x_i}{n} = \bar{x}, \quad (2.1)$$

y su respectivo estimativo del error es

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.2)$$

donde σ corresponde a la desviación estándar, que para el caso de la distribución Gaussiana está dada por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \mu)^2 \simeq \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2 = s^2 \quad (2.3)$$

Distribución de Poisson

Suponiendo que se tienen n mediciones de $x_1, x_2 \dots x_n$ muestras provenientes de una distribución de Poisson con valor medio μ , y un valor medio estimado dado por

$$\hat{\mu} = \frac{\sum x_i}{n} = \bar{x}, \quad (2.4)$$

la varianza de \bar{x} puede ser escrita entonces como

$$\sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sigma^2}{n}, \quad (2.5)$$

donde σ corresponde a la desviación estándar de la distribución de Poisson. Para tal caso $\sigma^2 = \mu$, así el error estimado para el valor medio en el caso de una distribución de Poisson sustituyendo el valor medio estimado $\hat{\mu}$ por el valor teórico μ es:

$$\sigma(\hat{\mu}) = \sqrt{\frac{\mu}{n}} \simeq \sqrt{\frac{\hat{\mu}}{n}} = \sqrt{\frac{\bar{x}}{n}}. \quad (2.6)$$

Se observa que las expresiones (2.2) y (2.6) son iguales tanto para la distribución Gaussiana como para la de Poisson, la diferencia radica en la forma de determinar el valor de su desviación estándar σ . Cabe anotar que en el caso en donde se tiene una única medida $\sigma(x) = \sqrt{x}$.

Teniendo en cuenta que los procesos de decaimiento radiactivo son descritos por distribuciones de Poisson, se utiliza la expresión (2.6) para determinar los errores en nuestro caso particular, utilizando $n = 5$.

Para determinar el error en la diferencia del número de cuentas se utiliza propagación de errores. De esta manera, si se tiene $Diff = DetA - DetB$, el error va a estar dado por

$$\sigma_{Diff} = \sqrt{\sigma_{DetA}^2 + \sigma_{DetB}^2}. \quad (2.7)$$

Muestra sobre el nivel del suelo

La primera parte experimental se realiza con el blanco de polietileno de alta densidad, cuyas principales características se encuentran en la tabla 2.1. El blanco se ubica sobre la superficie del suelo de tal forma que la distancia entre la fuente y el blanco sea de 1.6 cm y la distancia entre el suelo y los detectores sea de 13 cm. En la figura 2.3 se observan las dimensiones utilizadas para esta primera parte.

En cada caso considerado se van a tomar el número de cuentas (número de eventos registrados en el detector) por cada 60 s, y la medición se repite 5 veces. Lo primero que se hace es variar la distancia entre los detectores para observar el comportamiento en el número de cuentas en el caso del fondo y en presencia de la muestra. Esta distancia se varía en un rango de cuatro valores: 6 cm, 12 cm, 18 cm y 24 cm. Para poder comparar de una mejor manera el número de cuentas entre los detectores, los umbrales en el CFD se fijaron de tal forma que las cuentas en los dos detectores A y B fueran similares para el caso del suelo solo. Como ésto no funcionó apropiadamente, entonces para cada una de las distancias se realizó un rescalamiento, es decir para el caso del fondo se toma el número de cuentas del detector B y se

Elemento	Composición	Densidad g/cm ³	Dimensiones
Bloque de Polietileno	(C ₆ H ₂) ₆	0.92	12×12×6 cm ³

Tabla 2.1. Características principales del bloque de polietileno utilizado a lo largo del experimento.

multiplican por un factor $R_{AB} = \frac{\text{Cuentas A}}{\text{Cuentas B}}$. Así, para cada distancia entre detectores se tiene un valor de R_{AB} , y las cuentas tomadas con el blanco por el detector B se deben multiplicar por el correspondiente factor en cada uno de los casos para asegurar de esta forma un fondo similar para los detectores. En resumen, el número de cuentas obtenido con el detector B va a estar multiplicado por el factor R_{AB} en cada caso.

En la figura 2.5, se muestran los resultados obtenidos al variar la distancia entre los detectores tanto en el caso del suelo solo (para determinar el valor del fondo) como en el que se usa el blanco de polietileno fijo en el centro, justo debajo de la fuente.

En lo que sigue, se tiene en cuenta el número total de cuentas, no el neto (cuentas totales - cuentas del fondo), debido a que es necesario identificar el fondo en cada una de las mediciones realizadas. Se observa que el número de cuentas se incrementa con la presencia del blanco (figura 2.5), lo que es de esperarse ya que la fuente emite neutrones rápidos, que al interactuar con un material con alto contenido de hidrógeno (en este caso el blanco de polietileno), además de perder energía termalizándose, sufren retrodispersión. Estos neutrones retrodispersados poseen menos energía que la inicial, lo que permite que sean detectados por los tubos de ³He. Además, se observa que a medida que aumenta la distancia disminuye el número de cuentas en cada uno de los detectores.

En la figura 2.6 se muestra la diferencia del número de cuentas entre detectores. Esta diferencia se hace como las cuentas del detector A menos las cuentas del detector B. Así, los valores negativos indican que en ese caso el detector B registró un número mayor de eventos.

Ahora, para la distancia entre los detectores de 12 cm, 18 cm y 24 cm se varía la posición del blanco de polietileno entre -20 cm y 20 cm, en pasos de 5 cm tomando como origen la posición justo debajo la fuente. En este caso el soporte en donde se encuentra tanto la fuente como los detectores permanece fijo y se varía la posición de la muestra. En las figuras 2.7, 2.8 y 2.9, se observa el comportamiento del número de cuentas y su diferencia entre detectores como función de la posición del blanco cuando la distancia entre los detectores es de 12, 18 y 24 cm, respectivamente.

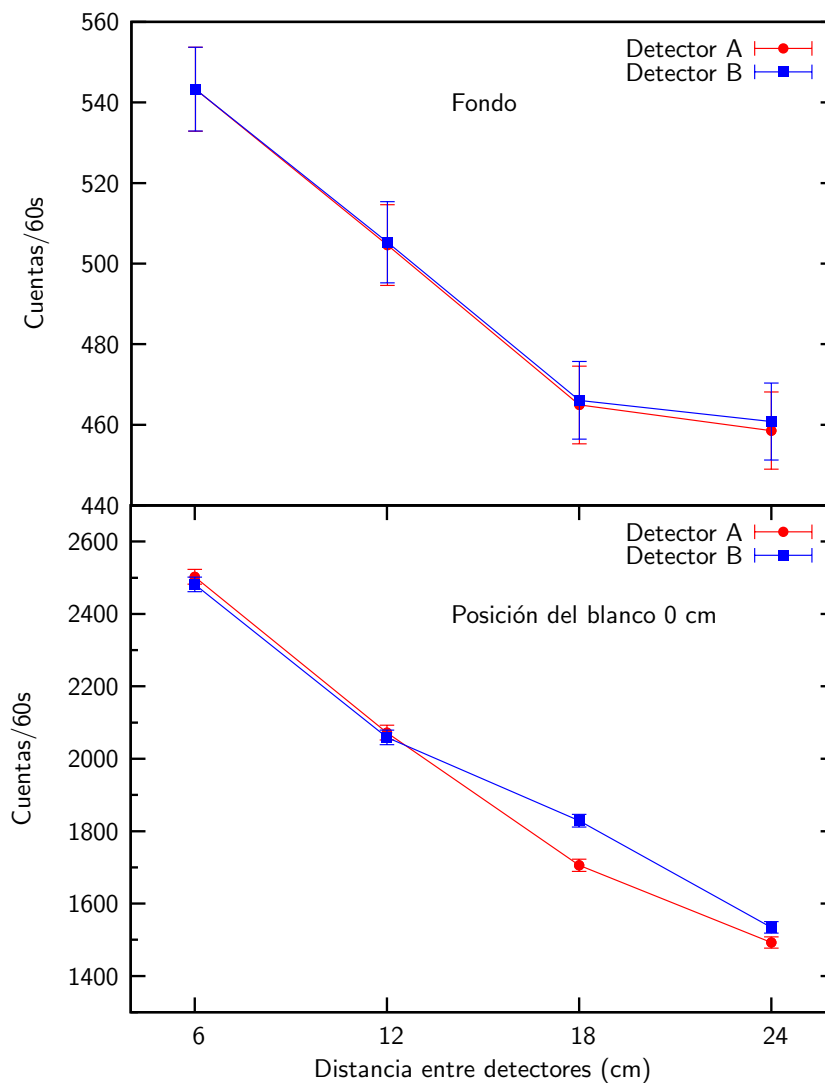


Figura 2.5. Número de cuentas como función de la distancia entre los detectores, tanto para el fondo como con el blanco de polietileno.

En la figura 2.7, los detectores se encuentran a -6 cm (Detector B) y 6 cm (Detector A) del centro. Se observa que el máximo número de cuentas se encuentra cuando la posición del blanco es 0 cm para el detector A y -5 cm para el detector B, y su diferencia tiene valores máximos (teniendo en cuenta la magnitud de la diferencia) cuando la posición del blanco es -5 cm ó 5 cm . Ahora, para el caso de la figura 2.8 los detectores se encuentran a -9 cm y 9 cm, el máximo para el caso del detector B se encuentra definido cuando la posición del blanco es -5 cm, mientras que para el detector A este máximo no es concluyente, y nuevamente la diferencia entre las cuentas de los detectores es máxima cuando la posición del blanco de polietileno es

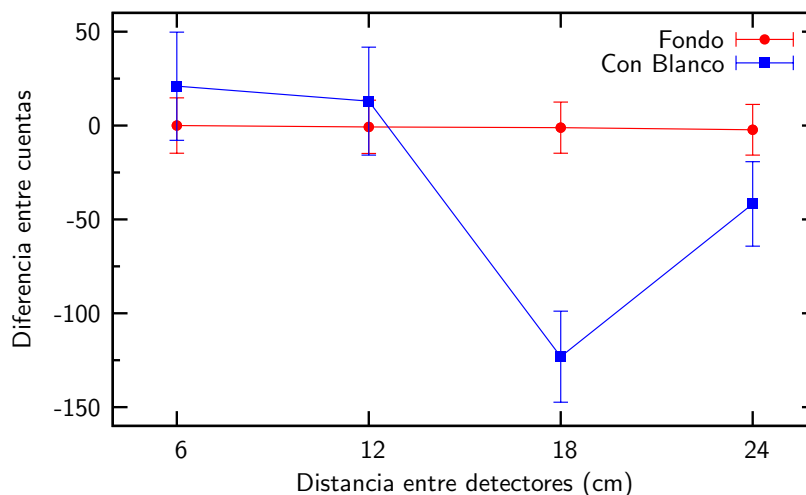


Figura 2.6. Diferencia entre el número de cuentas de los detectores en cada uno de los casos: fondo y blanco de polietileno.

-5 cm ó 5 cm. Para el caso de la figura 2.9, la posición de los detectores es de -12 cm y 12 cm. En este caso, los máximos se presentan bien diferenciados en los dos detectores, para posiciones del blanco en -5 cm y 5 cm, mientras que la diferencia entre cuentas es máxima cuando el blanco está a -10 cm ó 10 cm.

De acuerdo con lo anterior y observando el número de cuentas puede decirse que los máximos se encuentran cuando el centro del blanco está a medio camino entre la fuente y el detector, lo que se podría interpretar como una ley de reflexión especular para los neutrones, es decir si se tiene la disposición geométrica mostrada en la figura 2.10, don hechos se deben tener en cuenta, el primero es que el mayor número de neutrones rápidos interactúen con el blanco y se termalicen, y el segundo, que el mayor número de neutrones lentos sea detectado. Es decir es necesario que la probabilidad de que el mayor número de neutrones rápidos sea termalizado y además el mayor número de neutrones lentos sea detectado es mayor cuando se satisface simultáneamente que el blanco se encuentra a medio camino entre la fuente y el detector. Una forma posible de comprobar esto sería hacer las variaciones de la posición del blanco menores a 5 cm.

Lo siguiente que se hizo fue incrementar el número de neutrones que sufren termalización, que puede verse como si se tuviera una fuente de "neutrones lentos". Para llevar a cabo esto, se adhirió la fuente al blanco de polietileno. De esta manera, como se observa en la figura 2.12, el número de cuentas se incrementa comparado con el de la figura 2.8.

Ahora, puesto que la distancia entre fuente y blanco es cero, los máximos se registran cuando el centro del blanco está justo debajo del detector, es decir en ± 10 cm, que es la distancia

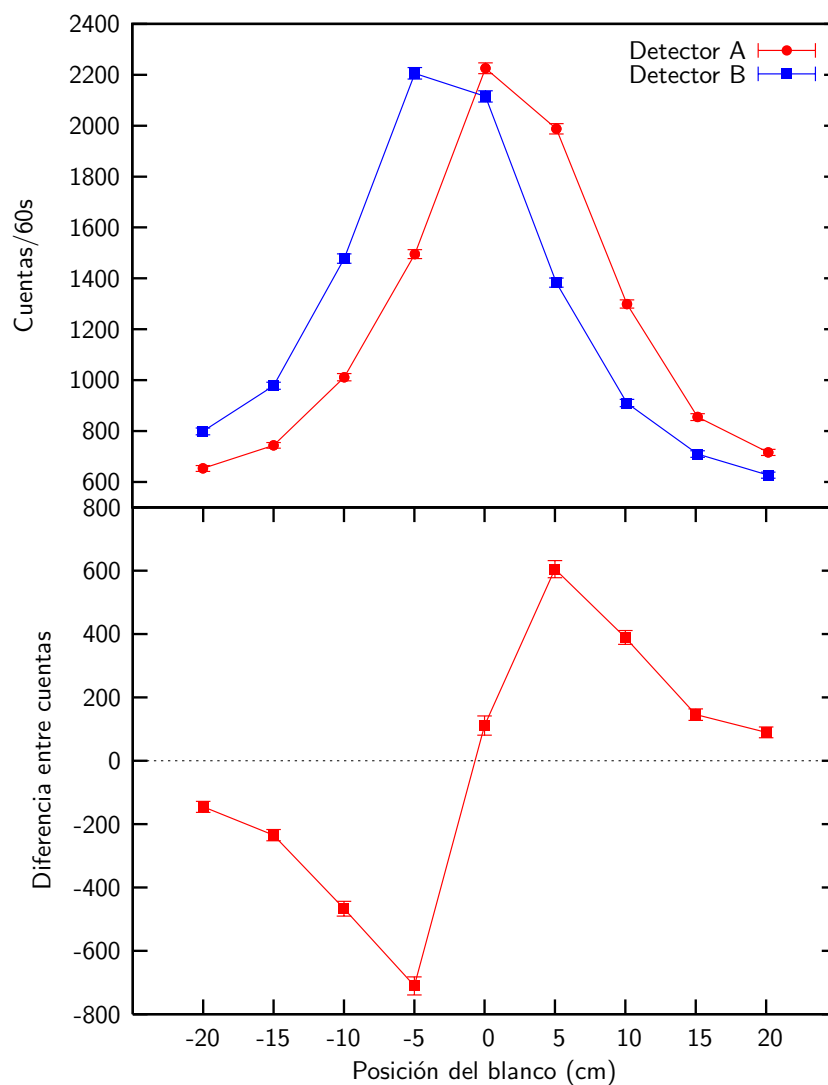


Figura 2.7. Distancia entre los detectores: 12 cm. Cuentas y diferencia entre el número de cuentas de los detectores como función de la posición del blanco de polietileno.

medida más cercana a ± 9 cm. Esto estaría soportando la hipótesis de una ley de reflexión especular para los neutrones.

Diferencia entre cuentas

Teniendo en cuenta que el interés principal es observar el comportamiento de la diferencia en el número de cuentas entre los detectores, la diferencia existente debe ser mayor que el número de cuentas registrado para el fondo. Comparando estos valores para el fondo de la figura 2.5 con

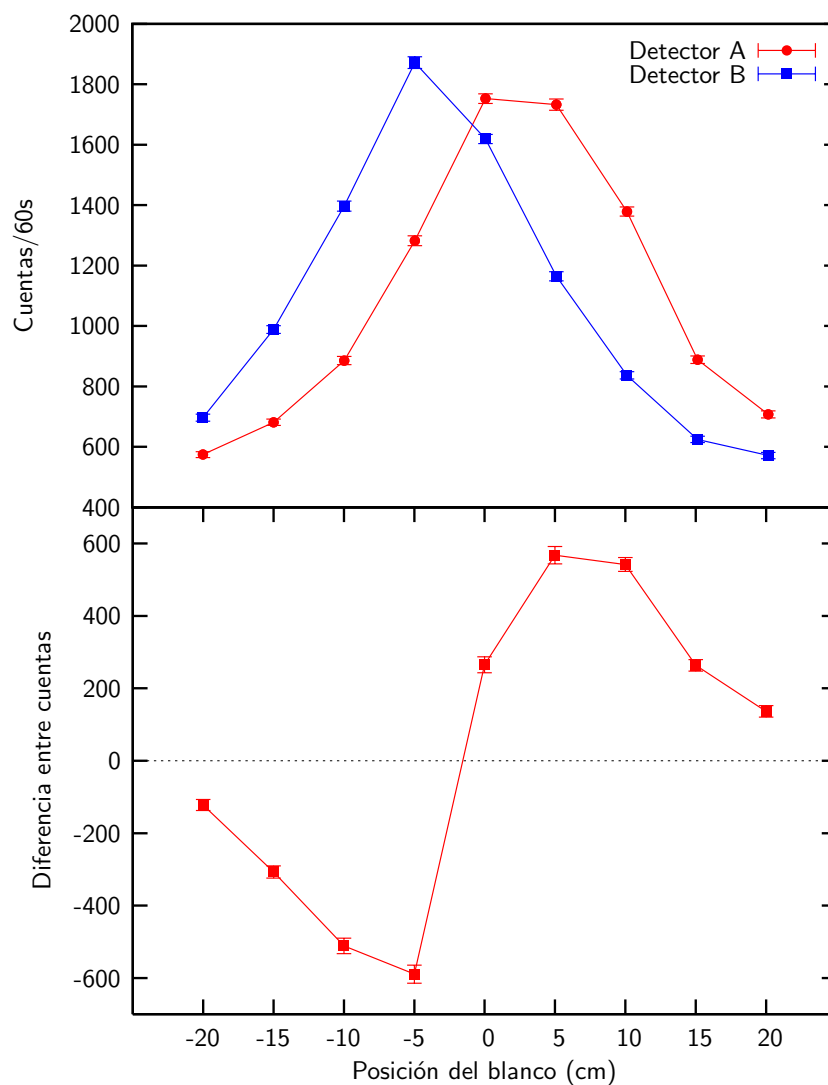


Figura 2.8. Distancia entre los detectores: 18 cm. Cuentas y diferencia entre el número de cuentas de los detectores como función de la posición del blanco de polietileno.

los máximos observados en la figura 2.11 para el caso particular de este blanco de polietileno, se observa que en todos los casos estudiados, la diferencia entre cuentas es considerablemente mayor en ausencia del blanco. Lo anterior indica que la presencia de material orgánico sobre la superficie del suelo sí se indica significativamente como una diferencia notable entre los números de cuentas de los dos detectores.

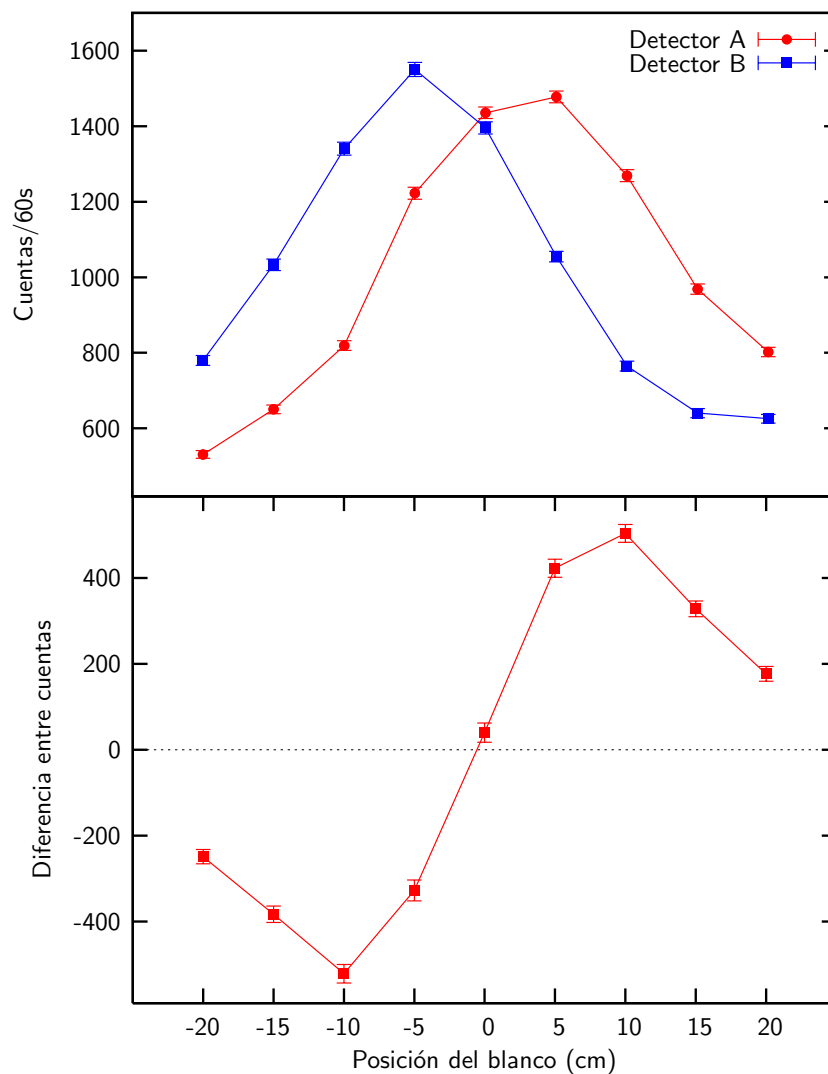


Figura 2.9. Distancia entre los detectores: 24 cm. Cuentas y diferencia entre el número de cuentas de los detectores como función de la posición del blanco de polietileno.

Muestra enterrada al nivel del suelo

En la segunda parte de la práctica experimental el blanco se entierra de tal manera que la superficie del suelo coincida con la superficie del blanco. En este caso la distancia entre la fuente y el blanco aumenta, pero la distancia entre el suelo y los detectores disminuye. Las dimensiones utilizadas se muestran en la figura 2.13

En esta parte de la práctica se mantiene fijo el blanco y se mueve el soporte, es decir, los detectores y la fuente como un todo. Entonces, cuando una posición es positiva para el sistema

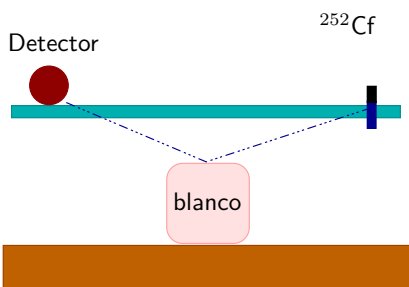


Figura 2.10. Reflexión especular para neutrones.

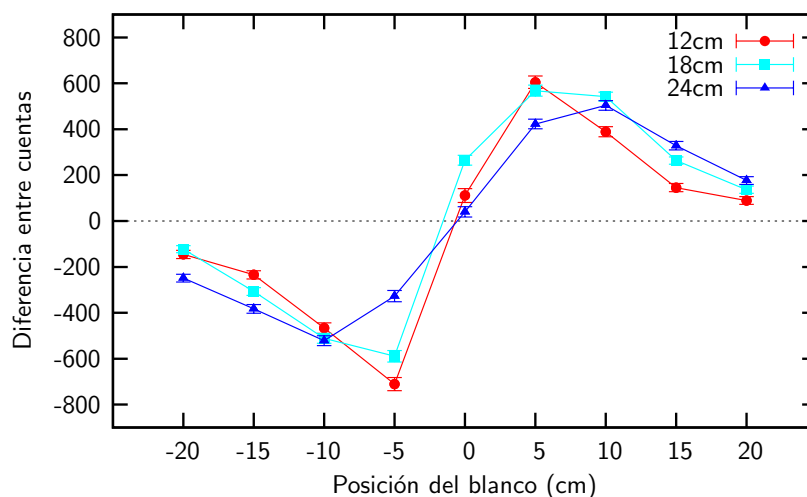


Figura 2.11. Diferencia en el número de cuentas para las distintas distancias entre detectores.

se refiere a la correspondiente posición negativa para el blanco.

En la figura 2.14, se entierra el blanco de polietileno, de tal manera que la superficie superior quede al mismo nivel del suelo, manteniendo la distancia entre los detectores en 18 cm. Se observa que los máximos aparecen en ± 5 cm, que es el valor medido más cercano al camino medio entre la fuente y cada uno de los detectores (en este caso ± 4.5 cm). Este resultado sigue favoreciendo la hipótesis de una ley de reflexión especular para neutrones.

Comparando los máximos de las figuras 2.8 y 2.14, en donde se ha cambiando tanto la distancia entre la fuente y el blanco como la distancia entre el suelo y detector, se observa que se tienen un mayor número de cuentas en el caso del blanco enterrado. Esto se debe a que la distancia entre el blanco y el detector aumenta, lo que hace que se tenga mayor número de neutrones termalizados interactuando con los tubos de ^3He .

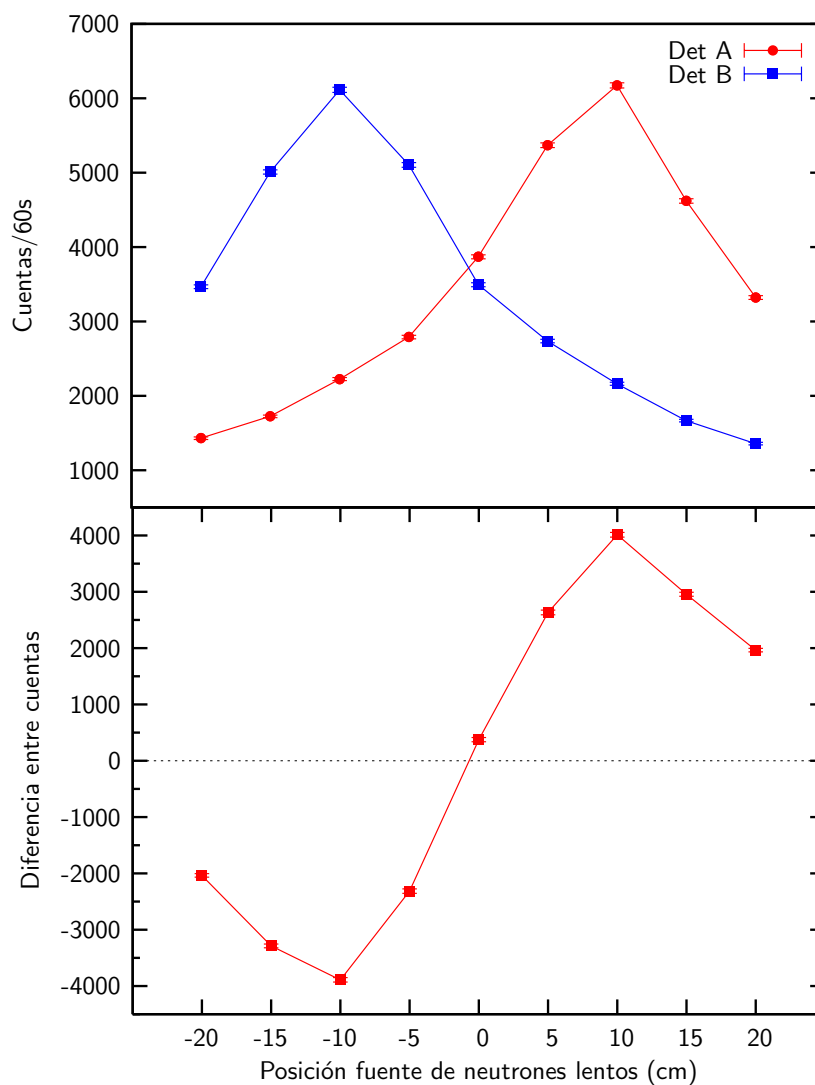


Figura 2.12. Cuentas obtenidas adheriendo la fuente al blanco de polietileno

Mina de prueba: Simulante de TNT

A continuación se utilizó la mina de prueba, que consiste en un contenedor de vidrio acrílico que contiene material simulante de TNT. Las principales características de la mina de prueba se encuentran en la tabla 2.2. Al cambiar el bloque de polietileno por la mina de simulante de TNT no se observa ningún cambio en la lectura del número cuentas (figura 2.15 comparado con lo obtenido para el caso del fondo). Esta diferencia se puede deber, primero a la composición de la mina de prueba, y segundo a la relación entre los volúmenes de las muestras. En efecto, si se observa el máximo valor para el detector B en ambos casos y se tiene en cuenta que

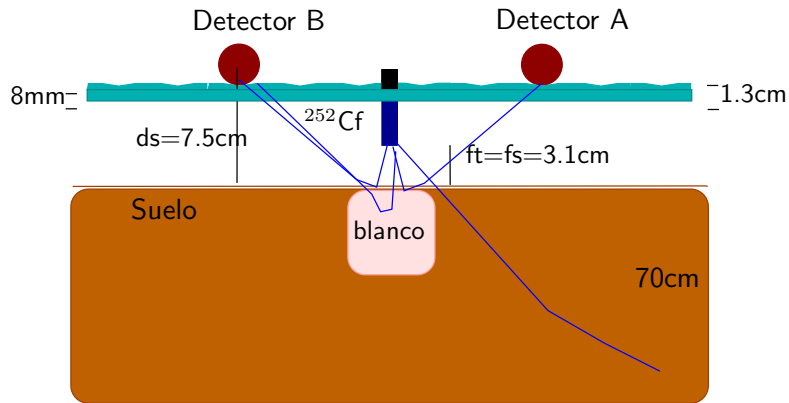


Figura 2.13. Dimensiones utilizadas: ds: distancia detector-suelo, fs: distancia fuente-suelo, fb: distancia fuente-blanco.

Elemento	Composición	Dimensiones
Simulante	17.3 g de grafito	
TNT	+ 23.9 g de ácido oxálico ($C_2H_2O_4$) + 58.8 g de ácido cianúrico ($C_3H_3N_3O_3$)	
Contenedor	[H:C:N:O]=[4:2:0:1]	de = 80 mm, di = 70 mm ae = 34 mm, ai = 22 mm

Tabla 2.2. Principales características del simulante de TNT utilizado en el experimento. Aquí, de: diámetro externos, di: diámetro externo, ae: altura externa, ai: altura interna [28].

$$\frac{V_p}{V_{TNT}} = \frac{12 \times 12 \times 6}{3.14 \times 4^2 \times 3.5} \approx \frac{864}{176} \approx 4.9, \quad (2.8)$$

donde V_p y V_{TNT} son los volúmenes para el bloque de polietileno y la mina de prueba de TNT, respectivamente, los valores de los máximos en las figuras 2.15, ≈ 410 , y 2.14, ≈ 2300 , se pueden relacionar a través de (2.8), es decir $410 \times 5 = 2050$, que al ser comparado con 2300 no presenta mayor diferencia. No obstante, debe tenerse en cuenta, además, la cantidad de elementos termalizadores de neutrones en cada uno de los casos.

Puesto que no se encuentra diferencia entre el número de cuentas obtenido con el simulante de TNT y el número de cuentas en el caso del fondo, se reduce la distancia entre los detectores a 6 cm. Además se redujo la distancia efectiva de los detectores, de 40 cm a 20 cm recubriéndolos

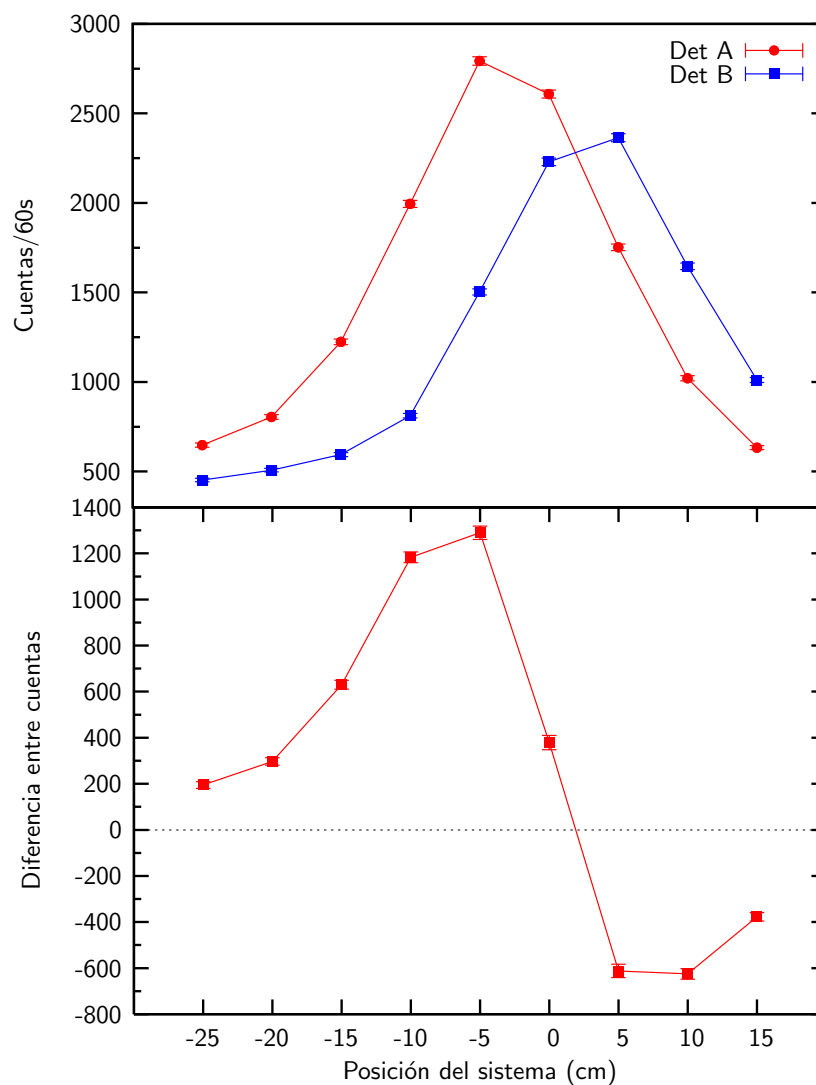


Figura 2.14. Número de cuentas y diferencia de número de cuentas como función de la posición del sistema (blanco), en el caso del blanco de polietileno a nivel del suelo y distancia entre los detectores de 18 cm.

con una lámina de cadmio para absorber neutrones de bajas energías y así evitar que interactúen con los tubos de ^3He . Adicionalmente, para poder comparar lo obtenido con el simulante de TNT, se hacen mediciones con una mina de prueba de polietileno de alta densidad, $((\text{CH}_2\text{—})_6 - (\text{CH}_2\text{—})_{10})$, densidad: 0.92 g/cm^3) de las mismas dimensiones que el simulante. En la figura 2.16 se muestran los resultados en estos dos casos.

En la figura 2.16, se observa que el número de cuentas aumenta cuando la mina de prueba es de polietileno, lo que es de esperarse, ya que la cantidad de elementos termalizadores de

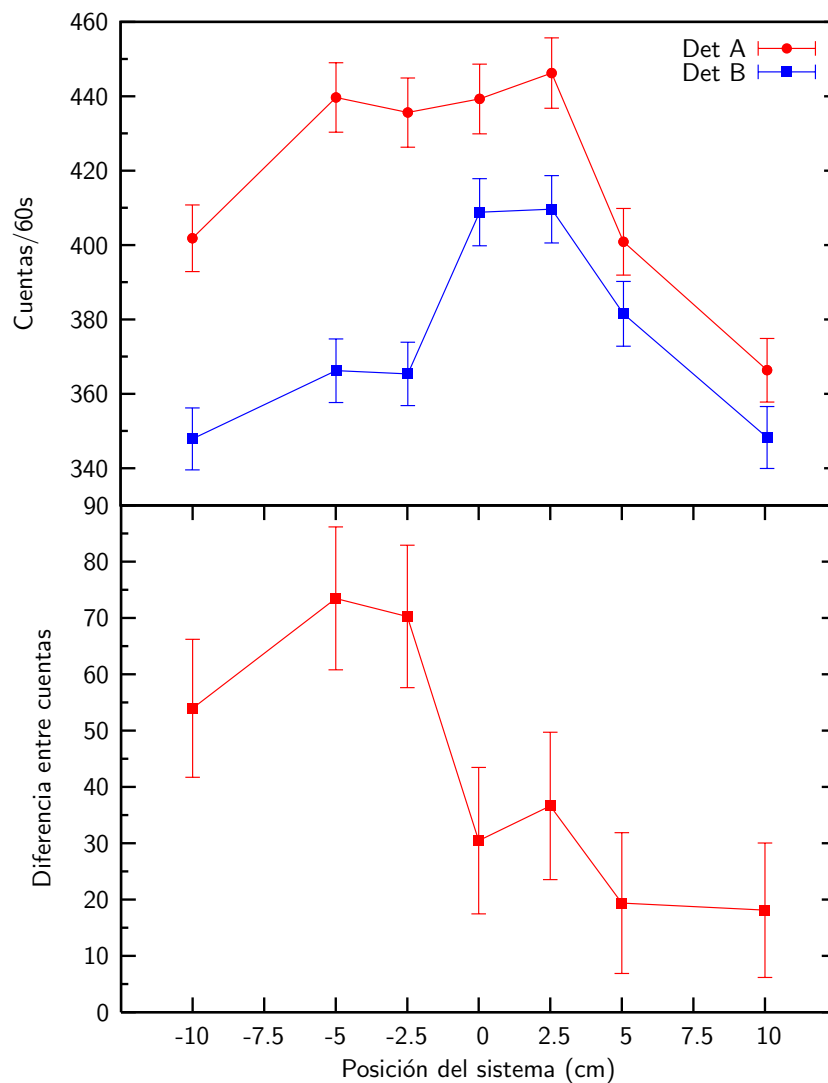


Figura 2.15. Número de cuentas y diferencia de número de cuentas como función de la posición del sistema (mina TNT), en el caso del simulante de TNT a nivel del suelo y distancia entre los detectores de 18 cm.

neutrones (en este caso hidrógeno) aumenta. Además se verifica nuevamente la hipótesis de la ley de reflexión especular para los neutrones, que se ve más claramente (y en especial para el detector A) que los máximos se encuentran en ± 2 cm, cuando se esperaría que estuvieran en ± 3 cm, puesto que la distancia entre detectores es de 6 cm.

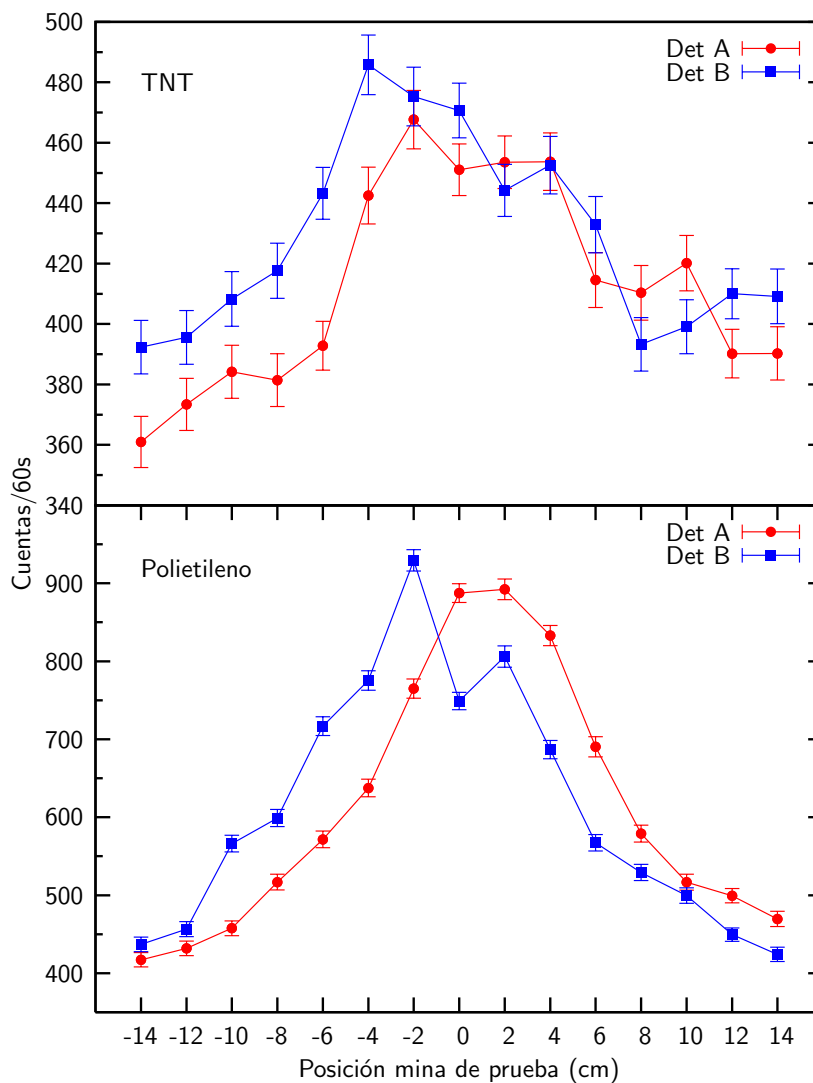


Figura 2.16. Número de cuentas como función de la posición de la mina de prueba tanto en el caso de polietileno como en el de simulante de TNT, la distancia entre los detectores de 6 cm.

2.2. Simulación con Geant3

A continuación, se utilizó Geant3, para simular el proceso de retrodispersión de neutrones en un prototipo hecho en el Laboratorio Nacional de Legnaro, Italia [10], En este prototipo simulado se modificó la geometría del sistema, los materiales utilizados, las posiciones de los detectores y las muestras, y se preguntó por el número de neutrones que llegan al detector provenientes del suelo con energías menores de 100 eV, sin especificar si éstos interactuaban

o no con el detector. El número de neutrones emitidos es 10^6 , y se utiliza como fuente una semi-esfera negativa, de tal forma que los neutrones no llegan directamente al detector, sino que solo interactúan con el blanco y el suelo.

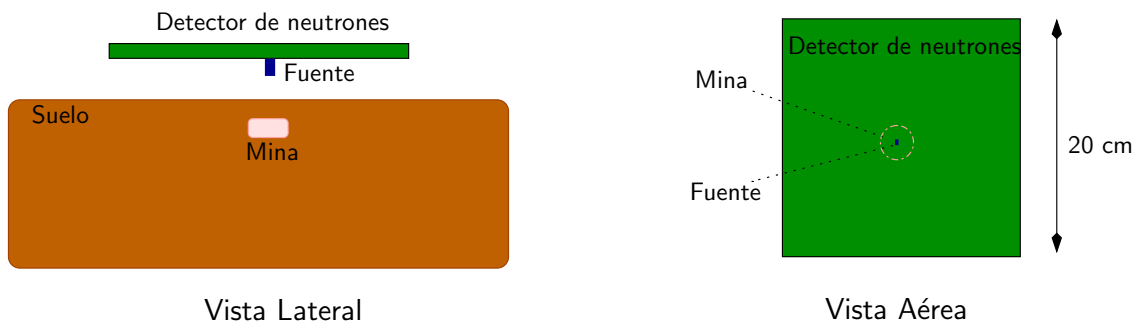


Figura 2.17. Disposición geométrica utilizada en la simulación con Geant3. En este caso el detector es una lámina de $20 \times 20 \text{ cm}^2$.

La primera parte de la simulación se llevó a cabo con un detector construido como una lámina de $40 \times 25 \times 0.4 \text{ cm}^3$, y un blanco de polietileno de las mismas dimensiones que en el caso experimental, con densidad 0.92 g/cm^3 , ubicado sobre la superficie del suelo, y se varía la posición del blanco.

En el momento del análisis de los datos obtenidos en la simulación se utiliza ROOT [29]. Aquí se selecciona la región del detector que se quiere mirar, lo que estaría simulando en este caso distintas posiciones del detector entre 0 y -25 cm. Además también se seleccionó un detector más corto que el fijado en el programa, de solo 20 cm de longitud.

Para el caso de la simulación de la mina de prueba se utiliza el mismo método y las mismas dimensiones que en el caso experimental, pero en vez de utilizar la composición del simulante descrito en la tabla 2.2 se utiliza directamente la composición química del TNT, $[\text{H}:\text{C}:\text{N}:\text{O}] = [5:7:3:6]$, con una densidad de 1.16 g/cm^3 .

Teniendo los resultados con Geant3 se puede hacer una comparación entre la simulación y los resultados experimentales. Se debe tener en cuenta que lo que se obtiene en la simulación es solamente el número de neutrones que llegan al detector, pero éstos no necesariamente interactúan dentro de él. Por lo tanto, esta simulación preliminar fue solo una guía para establecer correspondencias cualitativas entre el número de neutrones interactuantes con el detector y el número de neutrones que llegan.

En las figuras 2.18 y 2.19, se observa la comparación hecha entre la simulación y los datos

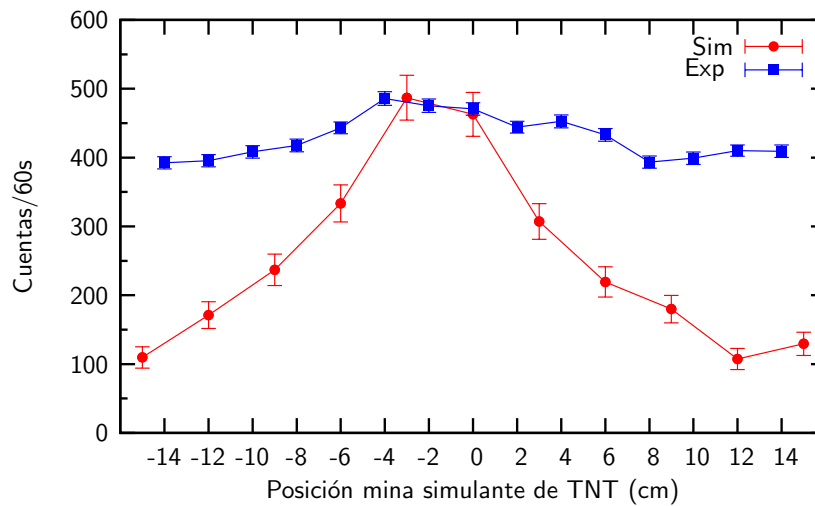


Figura 2.18. Comparación entre los resultados experimentales y la simulación hecha en Geant3, para el caso de la mina con TNT. Los valores simulados están normalizados al máximo de los experimentales.

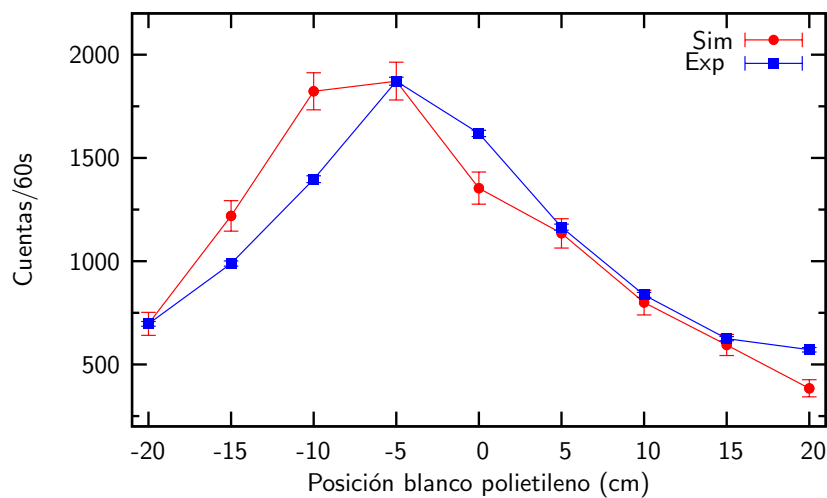


Figura 2.19. Comparación entre los resultados experimentales y la simulación hecha en Geant3, para el caso del blanco de polietileno (el bloque de $12 \times 12 \times 6 \text{ cm}^3$).

experimentales. Estas comparaciones se hacen con el detector B, que se ubica a -3 cm para la figura 2.18 y en -9 cm en el caso de la figura 2.19. Los valores simulados están multipli-

cados por un factor que corresponde a la relación entre los valores de los máximos, máximo experimental/máximo simulado.

En el caso de la figura 2.18 los resultados experimentales y simulados no coinciden. En el caso simulado se predice la presencia de un máximo, mientras que en el caso experimental los resultados no son concluyentes. Observando el valor para el número de cuentas, se puede decir que éste solo se debe al fondo. Esto puede deberse en primera aproximación, a que en el caso de la simulación se supone un suelo perfecto para el método de retrodispersión de neutrones, es decir sin contenido de hidrógeno, mientras en el caso experimental, mantener la arena que simula al suelo sin rastros de humedad no es totalmente posible.

Para la figura 2.19, en donde se comparan los resultados en el caso en donde se tiene el bloque de polietileno sobre la superficie del suelo, se observa que tanto la curva experimental, como la simulada presentan comportamientos similares, esto es las dos presentan un máximo que estaría indicando la presencia de material orgánico. En este caso, este máximo se presenta debido principalmente a que el número de neutrones retrodispersados aumenta cuando aumenta el número de centros dispersores (el hidrógeno presente en el polietileno) y el número de cuentas se incrementa para el valor máximo, casi 5 veces, comparado con el valor para el fondo.

Simulación de un sistema fuente-dispersor-detector

En el capítulo anterior se estudió de manera experimental el uso del método de retrodispersión de neutrones para la detección de material orgánico, sobre la superficie y enterrado en el suelo. En el presente capítulo se simula el proceso haciendo uso del paquete de simulación Geant4 [11], diseñado para el estudio de la interacción radiación-materia y utilizado en campos como física de partículas, física médica y física nuclear.

Simulaciones de Monte Carlo tanto de la respuesta de un detector de ^3He [30] como para el proceso de retrodispersión de neutrones como técnica nuclear para detectar minas antipersona y antitanque han sido desarrolladas [22, 26, 31] para diferentes condiciones experimentales.

Para simular el proceso es necesario definir el tipo de detector que se va a utilizar, el medio en el cual se encuentra inmerso el material moderador (el material a detectar), el tipo de fuente de neutrones rápidos y diversas condiciones geométricas. En este caso se va a utilizar como detector un contador proporcional cilíndrico, de ^3He y Ar, como material moderador se utilizaron polietileno de alta densidad y trinitrotolueno (TNT), y el medio es suelo simulado sin contenido de hidrógeno, para asegurar que la mayor cantidad de neutrones retrodispersados provienen del material moderador y no del suelo como una primera aproximación. Además de las definiciones hechas anteriormente, se incluyen variaciones en el volumen y en la densidad del material, además de variar otras condiciones geométricas.

3.1. Parámetros de la simulación

3.1.1. Dimensiones y composiciones

El detector utilizado en la simulación es un contador proporcional cilíndrico basado en la reacción (1.18), lleno con 75 % de ^3He y 25 % de Ar (este último para reducir la interacción de rayos gamma con el detector y reducir el rango de las partículas producto de la reacción [15]) con una presión de 4.9 atm y densidad de 2.70 kg/m^3 . Se utilizan tres tipos de material dispersor: un bloque de polietileno de dimensiones $12 \times 12 \times 6 \text{ cm}^3$, una mina de prueba de TNT y una mina de polietileno de las mismas dimensiones de la mina de prueba. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros utilizados en cada uno de los casos. El suelo se toma como una caja de $1 \times 1 \times 0.5 \text{ m}^3$ lleno de una composición de O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca y Fe. La fracción de masa en este caso se muestra en la tabla 3.2.

Elemento	Composición	Densidad g/cm ³	Dimensiones
Detector	^3He 75 %	2.70×10^{-3}	d = 2.5 cm
	Ar 25 %		l = 20 cm
Mina De Prueba	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$	1.654	d = 6.2 cm
TNT			l = 3.5 cm
Recubrimiento	$(\text{C}_6\text{H}_2)_6$	0.92	d externo = 6.6 cm
TNT			d interno = 6.2 cm
			l = 3.54
Bloque de	$(\text{C}_6\text{H}_2)_6$	0.92	l=an = 12 cm
Polietileno			al = 6 cm
Mina de	$(\text{C}_6\text{H}_2)_6$	0.92	d externo = 6.6 cm
Polietileno			l = 3.54 cm

Tabla 3.1. Principales parámetros utilizados en la simulación. Aquí, d=diámetro, l=longitud, an=ancho, al=alto.

Elemento	Fracción de masa (%)
O	51.2
Na	0.6
Mg	1.3
Al	7.0
Si	28.0
K	1.4
Ca	5.0
Fe	5.5

Tabla 3.2. Elementos que componen el suelo simulado, la densidad para el suelo es $\rho_{suelo}=1.5 \text{ g/cm}^3$. Suelo utilizado en [26].

3.1.2. Geometría

En la figura 3.1, se muestra la configuración que se simuló. Ésta consiste en dos arreglos cada uno de cuatro detectores ¹ de ³He + Ar. Una fuente de neutrones rápidos, ²⁵²Cf, se ubica a la mitad del camino entre los detectores. El material moderador (material investigado), a partir de ahora denominado blanco, se ubica sobre la superficie o enterrado dentro del suelo. La distancia entre los arreglos de detectores es 8 cm, de tal manera que la distancia entre los centros de cada arreglo es de 18 cm. Este valor se tomó de acuerdo con lo obtenido en el caso experimental mostrado en el capítulo 2. Las distancias del arreglo de detectores al suelo (ds), fuente-suelo (fs) y fuente-blanco (fb) no son parámetros fijos, sino que se varían en el transcurso de la simulación.

3.1.3. Fuente de neutrones

En el capítulo 1, sección 1.3, se mencionaron los tipos de fuentes de neutrones. Para llevar a cabo la simulación se utilizan dos tipos de fuente: una fuente de neutrones monocromática de 2 MeV de energía, isotrópica, en dirección z negativo, y una fuente de neutrones que sigue la distribución (1.1), restringiendo en ambos casos el ángulo sólido Ω a π . La restricción en el ángulo sólido se hace para asegurar que los neutrones rápidos provenientes de la fuente sean

¹Se utilizan dos arreglos de detectores y no dos detectores, porque de esta manera se esta incrementando la sección eficaz de interacción y por lo tanto el número de neutrones lentos detectados

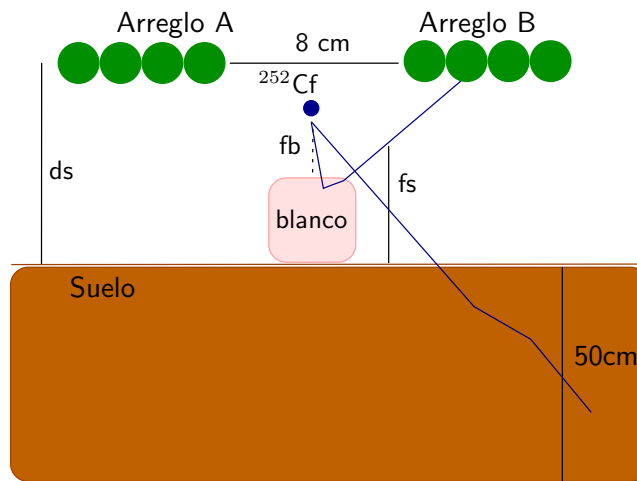
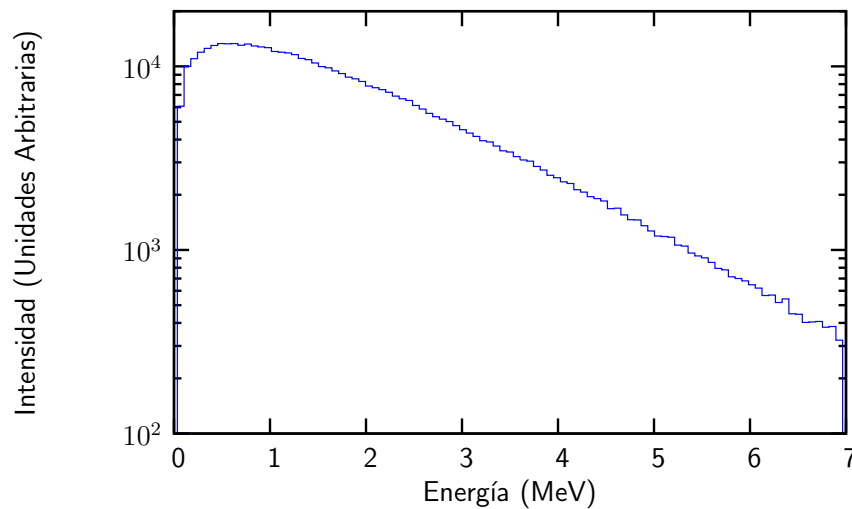


Figura 3.1. Disposición geométrica simulada.

dirigidos hacia el suelo y por lo tanto un mayor porcentaje de neutrones interactúan con el blanco.

En la figura 3.2 se muestra la distribución de energía de los neutrones simulada para la fuente de ^{252}Cf . La actividad para una fuente de californio puede variar de 2.3×10^4 hasta 4.6×10^8 n/s [32]. En el caso de la simulación se envían 5×10^5 neutrones, y cada neutrón constituye un evento.

Figura 3.2. Distribución de Energía de los neutrones para una fuente ^{252}Cf utilizado en la simulación

3.2. Validación de la simulación

Para validar el método de simulación, obtuvimos primero la respuesta del detector. Para esto, primero se debe verificar tal y como se mencionó en el capítulo 1, el llamado efecto pared.

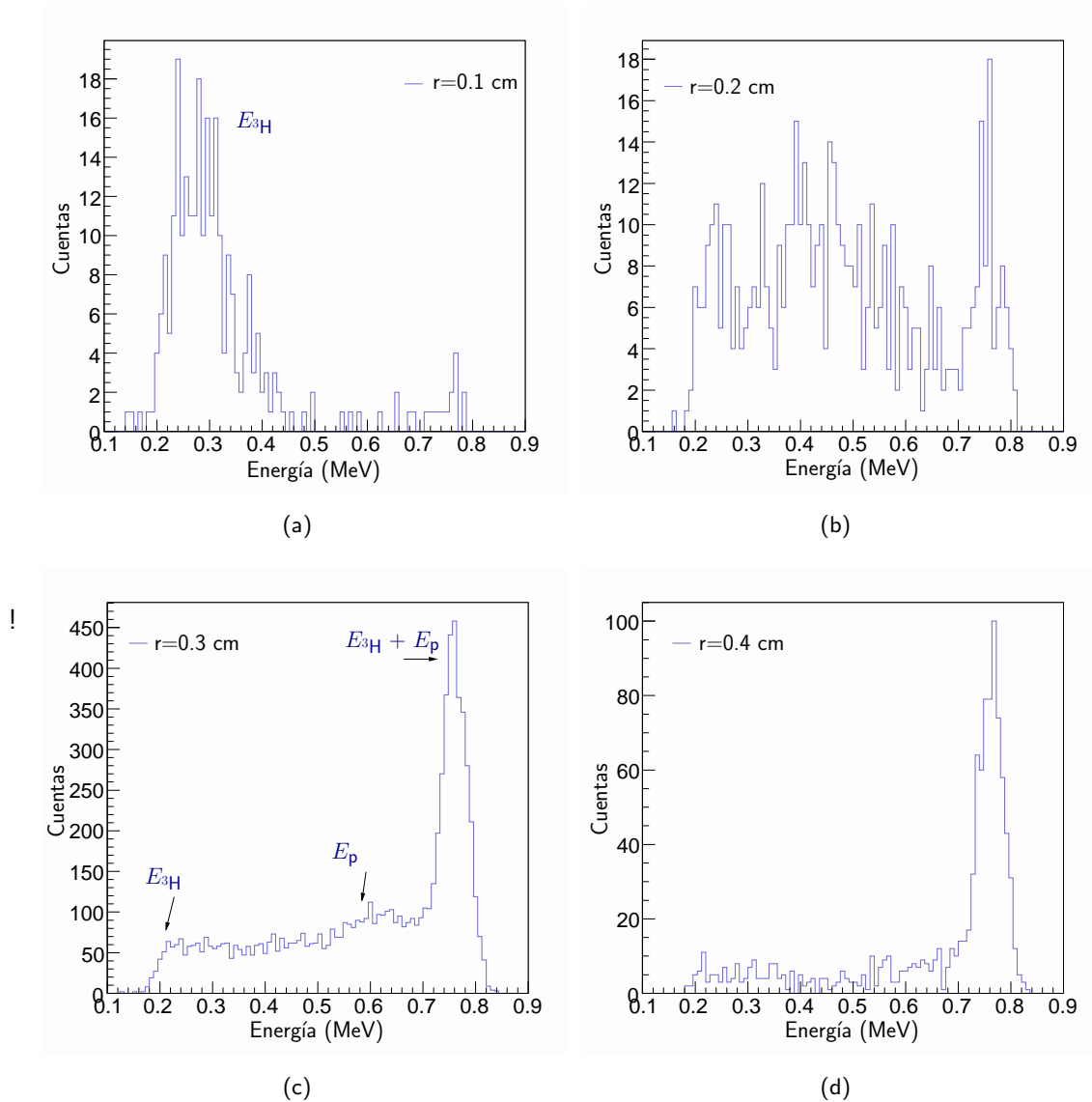


Figura 3.3. Efecto pared, se muestra el comportamiento del espectro esperado para el detector de ^3He , como función del radio del detector, (a) radio 0.1 cm, (b) radio 0.2 cm, (c) radio 0.3 cm, (d) radio 0.4 cm.

En este caso tomamos un contador proporcional al cual se le varía su radio, mas no su longitud. En la figura 3.3 se muestra la respuesta del detector cuando el radio del detector es 0.1 cm, 0.2 cm, 0.3 cm y 0.4 cm.

En la figura 3.3(a) se observa un solo pico que corresponde a la energía depositada por los tritones producto de la reacción. Esto quiere decir de acuerdo a la explicación del efecto pared que el protón está depositando una parte de su energía antes de golpear la pared del detector, en la figura 3.3(b) tanto los tritones como los protones producto de la reacción están depositando su energía el efecto pared comienza a ser significativo. En la figura 3.3(c) ya se distinguen las discontinuidades en los valores de energía del tritón y del protón en la respuesta del detector producto del efecto pared. Finalmente en la figura 3.3(d) ya el efecto pared no es apreciable, y en su mayoría los protones y tritones están depositando toda su energía en el detector cuando el radio del contador proporcional es 0.4 cm. Este resultado podría dar una idea del valor de los rangos de los productos de la reacción del neutrón con el ^3He , teniendo en cuenta que estos dependen tanto del gas que llena el detector como de su densidad. Un estudio detallado de los rangos del protón y del tritón se encuentra en [19].

El número de cuentas difiere para cada uno de los casos, ya que para hacer apreciable el efecto pared en 3.3(c) se enviaron 10^6 de eventos para aumentar la producción de tritones y protones y observar mejor las discontinuidades en la respuesta del detector.

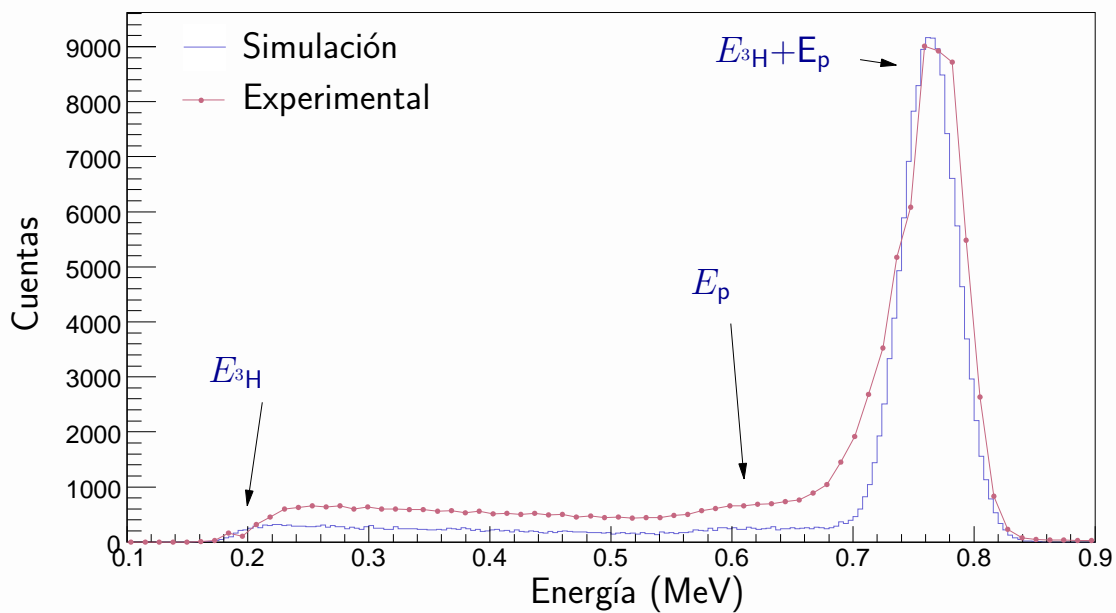
3.3. Respuesta del detector

Para comparar la respuesta del detector simulada se utilizan datos experimentales tomados con una fuente de ^{252}Cf de neutrones con una actividad de 10 MBq y una emisión de 1.15×10^6 n/s [32], y un detector de neutrones cilindrico LND 252228 [33], lleno con 75 % de ^3He y 25 % de Ar, con las mismas dimensiones del detector simulado.

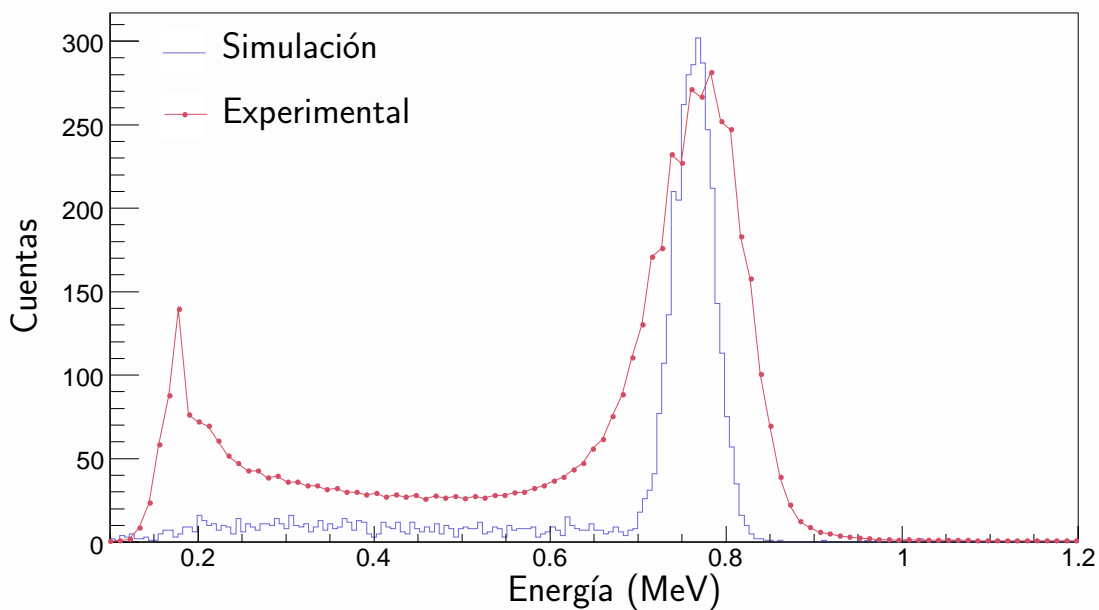
En la figura 3.4(a) se muestra el espectro simulado al enviar neutrones lentos con energía $E_n = 0.025$ eV directamente hacia el detector, de tal manera que la energía depositada en él corresponde sólo a los productos de la reacción (n,p) en ^3He y no a otro tipo de radiación. Para lograr lo mismo en el caso experimental, la fuente de neutrones -junto con los bloques de parafina (material moderador)- se introducen en un blindaje de plomo. Se observa que la simulación reproduce las principales características de la respuesta del detector.

En la figura 3.4(b), el espectro simulado se logra enviando neutrones de 2 MeV de energía directamente sobre el bloque de polietileno, para así detectar los neutrones que han sufrido termalización. En el caso experimental los neutrones lentos son el resultado de la interacción de los neutrones rápidos provenientes de la fuente de californio con bloques de parafina.

Las diferencias entre estos dos últimos espectros, simulado y experimental, pueden deberse a



(a) Espectro blindando gammas



(b) Espectro total

Figura 3.4. Validación de la simulación.

múltiples factores, entre estos a que en el caso experimental el proceso de fisión del ^{252}Cf , produce, además de neutrones y rayos γ que tienen la probabilidad de interactuar ya sea con el ^3He o con el Ar, produciendo un aumento en el fondo del espectro y eventos de baja energía, lo que produce un conteo a bajas energías. El pico que se presenta para energías pequeñas puede deberse a la presencia de rayos γ provenientes del proceso de fisión de la fuente de ^{252}Cf , tal y como se muestra en [16].

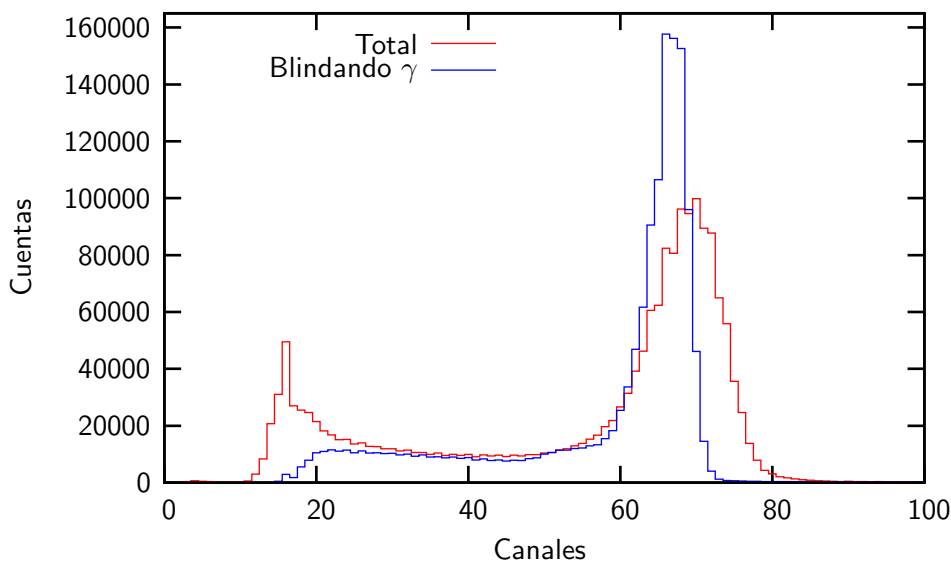


Figura 3.5. Espectros para la fuente de ^{252}Cf moderada.

La diferencia en el ancho de los picos se podría explicar observando los espectros experimentales (figura 3.5). Se observa que el FWHM (Full Width at Half Maximum) es distinto en los dos casos, aún cuando se esté utilizando el mismo detector. Esto se puede deber -como se mencionó anteriormente- a rayos γ presentes en el proceso de fisión, lo que hace que en el espectro total el ancho del pico sea mayor. Para el caso de la simulación se utiliza una resolución del 7%, que coincide con las especificaciones técnicas del contador proporcional experimental para la máxima energía depositada, que en este caso es 764 keV.

En la figura 3.6 se muestra la respuesta del detector, simulada para diferentes energías de los neutrones lentos incidente en el contador proporcional. Como es de esperarse, debido a la sección eficaz del ^3He (figura 1.3) la probabilidad de que se lleve a cabo una reacción es mayor para energías menores a 0.01 eV. Se observa, además, que el efecto pared no es apreciable, debido a que el radio simulado es de 1.25 cm.

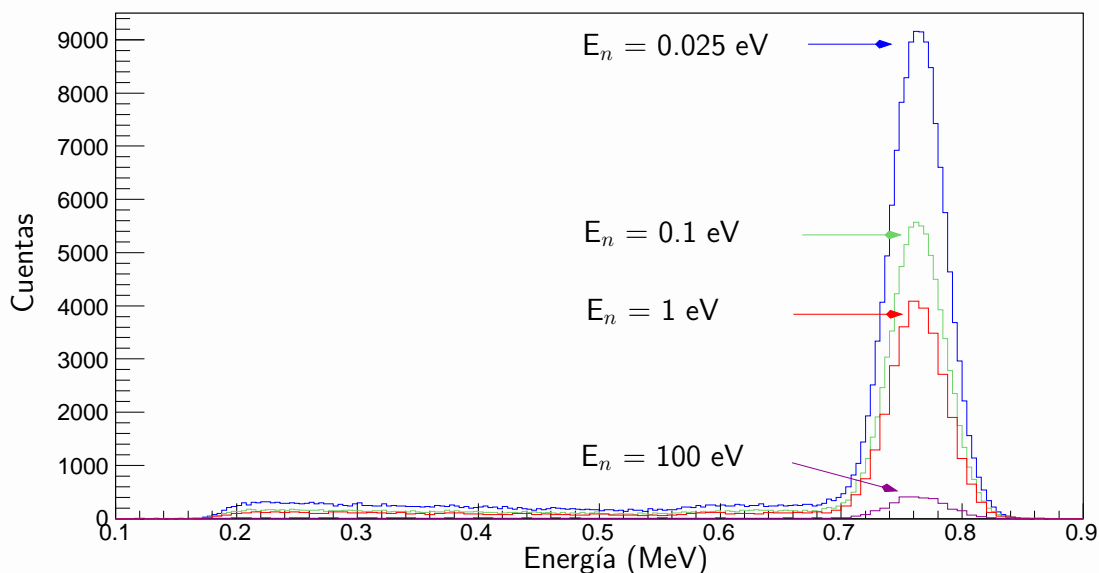


Figura 3.6. Respuesta del detector de ^3He para diferentes energías del neutrón incidente.

3.4. Sistema fuente-dispersor-detector

Para estudiar el sistema fuente-dispersor-detector, se simulan algunos de los experimentos realizados en el capítulo anterior, teniendo como objetivo principal la comprensión del proceso de retrodispersión en diferentes situaciones.

3.4.1. Muestra sobre la superficie del suelo

Lo primero que se hace es reproducir la primera parte del experimento descrito en el capítulo 2, en donde se tiene el bloque de polietileno sobre la superficie. Las dimensiones utilizadas en este caso se muestran en la figura 3.7

En la figura 3.8 se muestra el número de cuentas para cada detector como función de la posición del sistema (detectores + ^{252}Cf). En este caso el Detector A corresponde al arreglo de detectores A y el Detector B al arreglo B. Se observa que los máximos se encuentran a -5 cm y 5 cm respectivamente. Aquí también observamos que la diferencia entre las cuentas da información acerca de la presencia de material orgánico. Si la diferencia fuera cero o cercana a cero, como sucede para los casos cuando el sistema se encuentra a ± 20 cm, los detectores estarían contando lo mismo (en este caso fondo), pero si hay una diferencia apreciable, como sucede cuando el sistema está a ± 5 cm, quiere decir que existe una concentración anómala

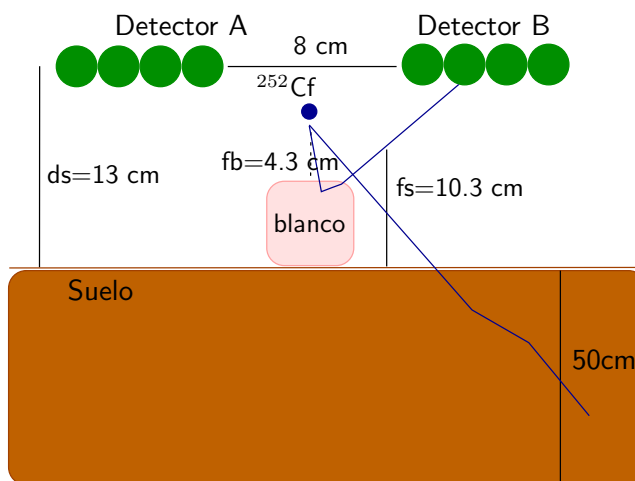


Figura 3.7. Dimensiones utilizadas en el caso del bloque de polietileno sobre la superficie del suelo ds: distancia detector-suelo, fs: distancia fuente-suelo, fb: distancia fuente-blanco.

de hidrógeno. Así nuevamente se observa que los máximos se encuentran, cuando el centro del blanco se encuentra a medio camino entre la fuente y el detector, cumpliéndose así la ley de reflexión especular para neutrones mencionada en el capítulo 2.

En este punto cabe anotar, que teniendo en cuenta que cuando se utilizan métodos de Monte Carlo se están utilizando métodos de muestreo, los errores que se asocian a los resultados son errores estadísticos. De esta manera, el error para cada uno de los valores en el número de cuentas va a estar determinado de la misma manera que en el capítulo 2, cuando se tiene una única medida, es decir $\sigma_x = \sqrt{x}$.

En la figura 3.9 se observa el comportamiento del número de cuentas simulado como función de la posición del sistema. Para el caso en que se utilizan parejas de detectores, variando la distancia entre ellos, nuevamente se observa que los máximos se encuentran a ± 5 cm. Se observa además que el máximo es más fácilmente identificable cuando la distancia entre los detectores es de 18 cm.

En la figura 3.10 se comparan el número de cuentas y la diferencia entre ellas para el caso simulado cuando la distancia entre detectores es de 18 cm contra el experimental mostrado en la figura 2.8, en el caso del Detector B. Los valores simulados están normalizados al máximo de los experimentales. El número de cuentas en el caso experimental es mayor, debido a que la longitud efectiva del detector de neutrones en ese caso es 40 cm, mientras que en el simulado es de 20 cm. Además, como se mencionó en la sección anterior, el número de cuentas se incrementa con los rayos γ provenientes ya sea de la fisión del ^{252}Cf , situación que en la simulación no se tuvo en cuenta debido a que por experiencia de grupos que han trabajado con esta técnica [20] el fondo de rayos γ puede suprimirse por medio de la electrónica apropiada.

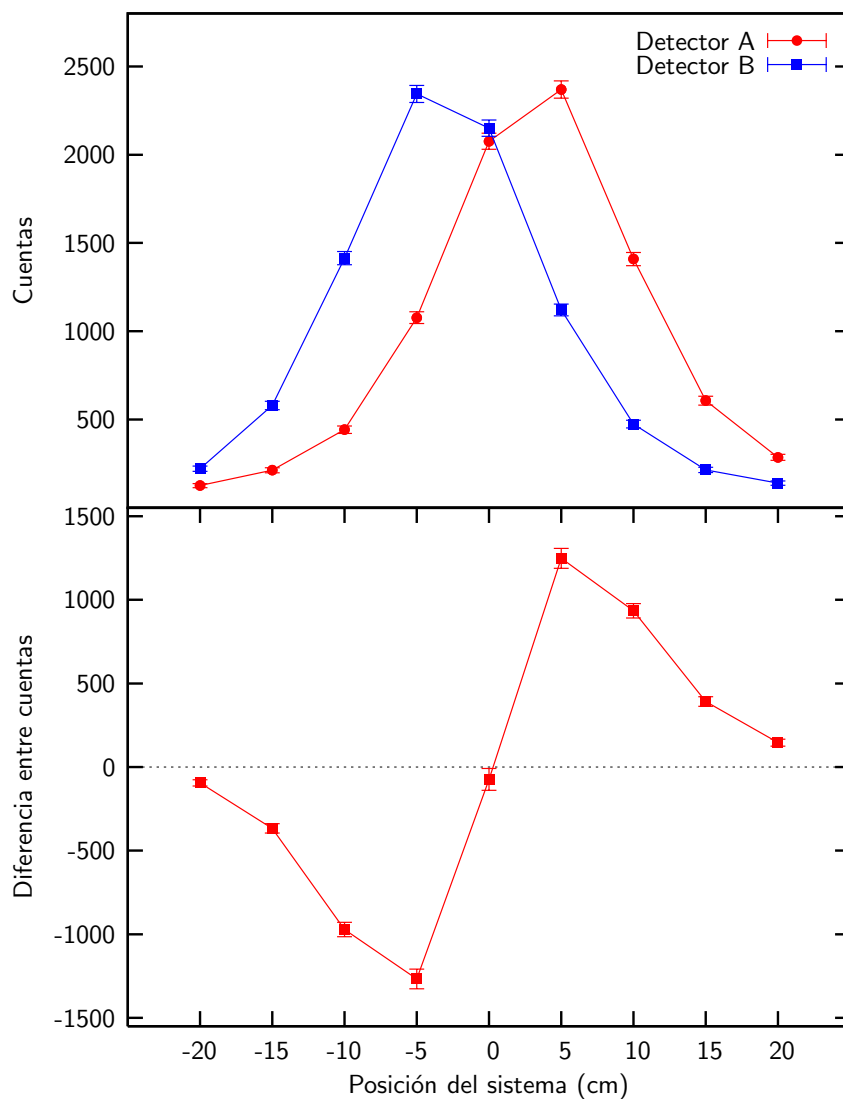


Figura 3.8. Número de cuentas en el detector como función de la posición del sistema (detectores + ^{252}Cf). En el caso del bloque de polietileno sobre la superficie.

3.4.2. Muestra enterrada en el suelo

En este caso se utilizaron las dimensiones mostradas en la figura 3.11. Como muestras se utilizan el bloque de polietileno, la mina de prueba de polietileno, y la mina de TNT, cuyas propiedades se encuentran en la tabla 3.1.

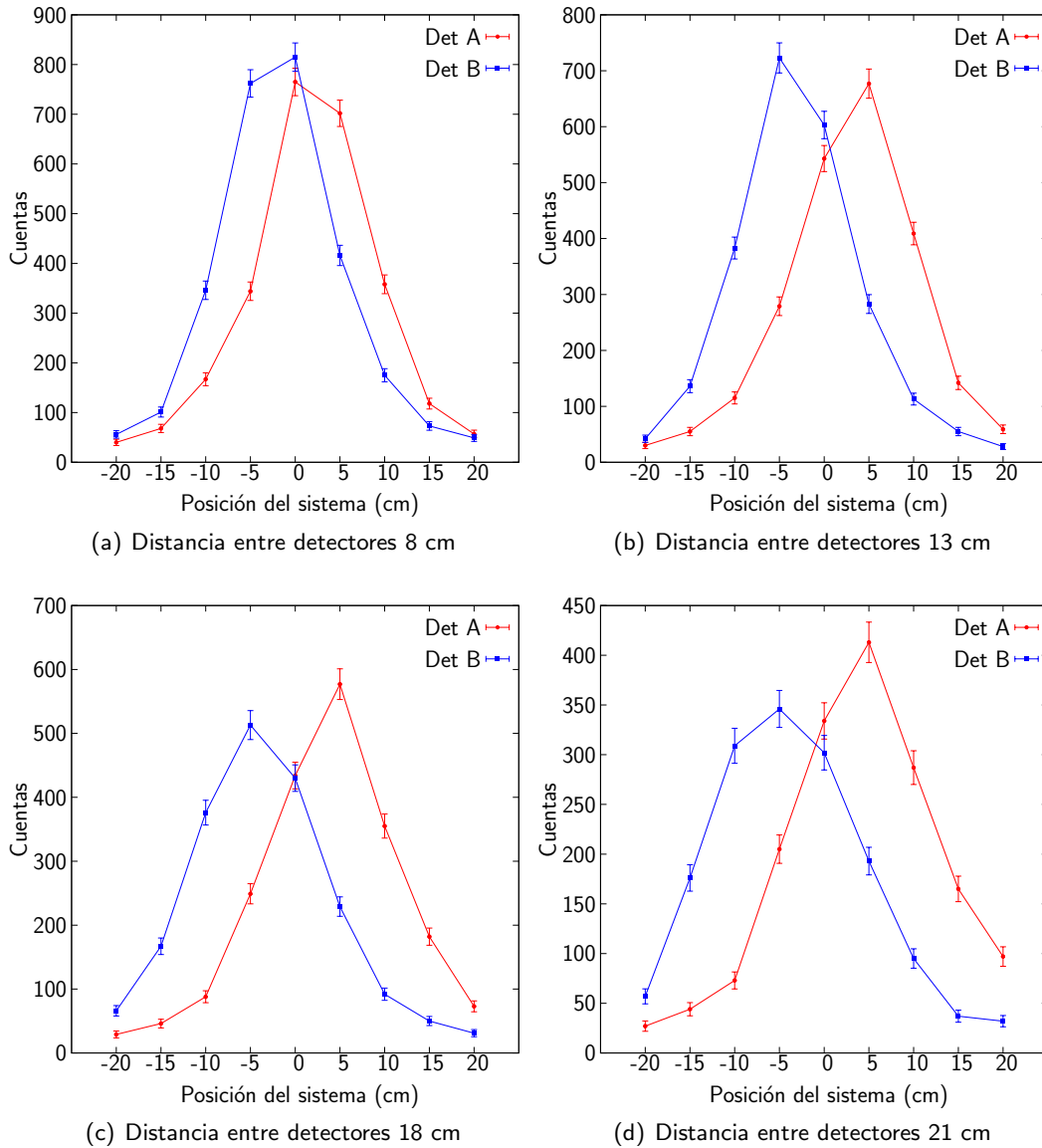


Figura 3.9. Número de cuentas simulado como función de la posición del sistema para dos detectores variando la distancia entre ellos. (a) 8 cm, (b) 13 cm, (c) 18 cm, (d) 21 cm.

Bloque de polietileno

En la figura 3.12 se observan el número de cuentas en el detector A (Arreglo A) y la diferencia de cuentas entre los dos detectores, como función de la posición del sistema para el caso del bloque de polietileno enterrado a 0 cm, 2 cm, 4 cm, 6 cm y 8 cm. Se observa que -aunque el máximo no es tan pronunciado como en la figura 3.8- la diferencia en el número de cuentas

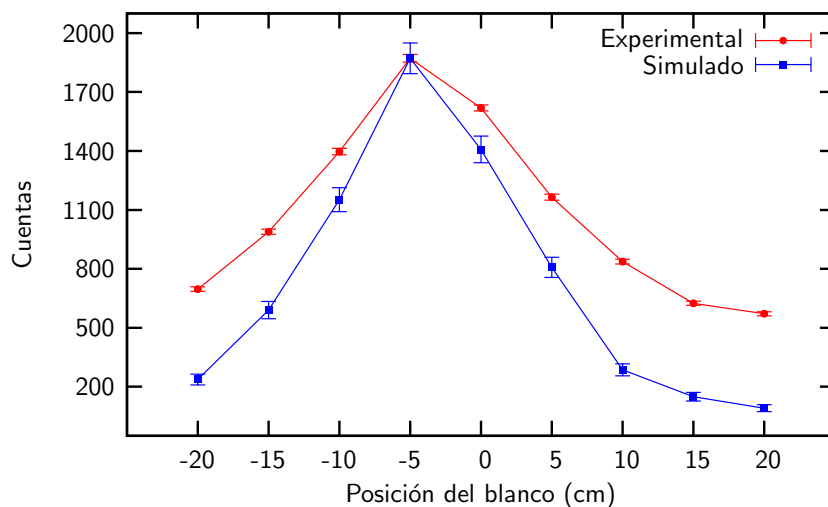


Figura 3.10. Comparación entre los resultados en el caso experimental y simulado, para el Detector B, en el caso del bloque de polietileno sobre la superficie, distancia entre los detectores = 18 cm. Los valores simulados están normalizados a los máximos experimentales.

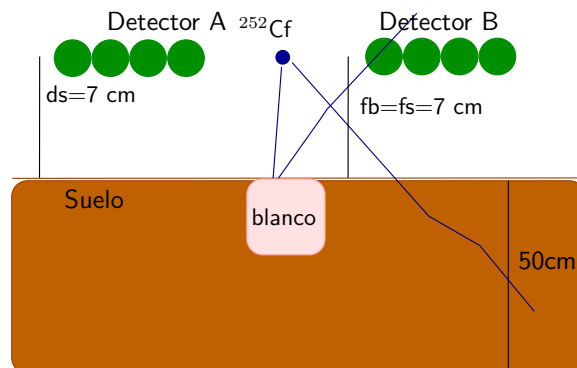


Figura 3.11. Dimensiones utilizadas en el caso del bloque de polietileno enterrada en el suelo: ds: distancia detector-suelo, fs: distancia fuente-suelo, fb: distancia fuente-blanco.

muestra la presencia de una concentración mayor de hidrógeno cuando el bloque está enterrado a 0 cm, 2 cm y 4 cm que cuando la profundidad es 6 cm y 8 cm. En estos casos el número de cuentas disminuye, lo que hace que no exista un máximo definido comparado con los otros casos. Otro aspecto que se puede observar es que cuando la posición del sistema es ± 20 cm el valor en el número de cuentas en todos los casos es similar, cercano a 130. Este valor se puede tomar como el valor para el fondo en este caso.

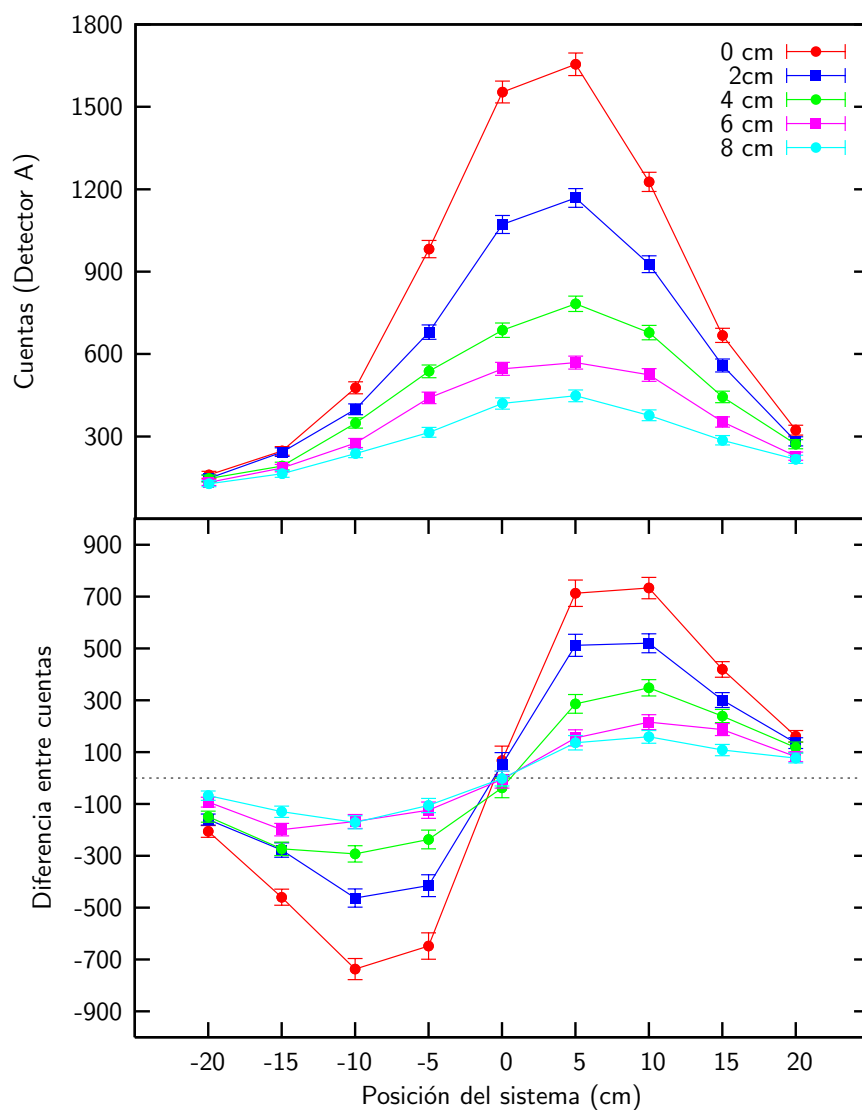
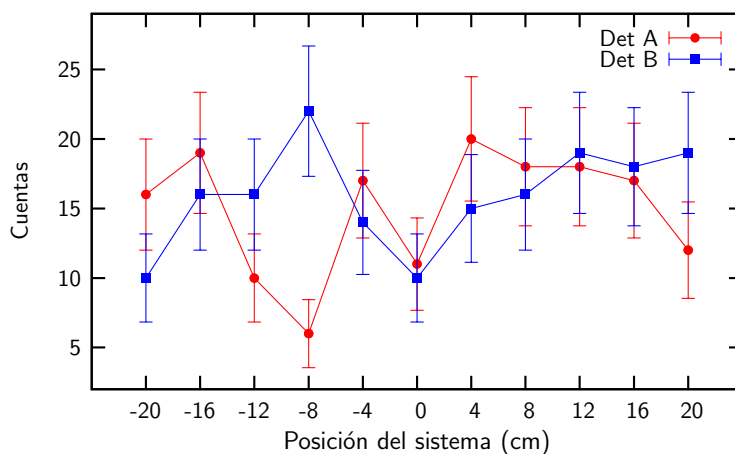


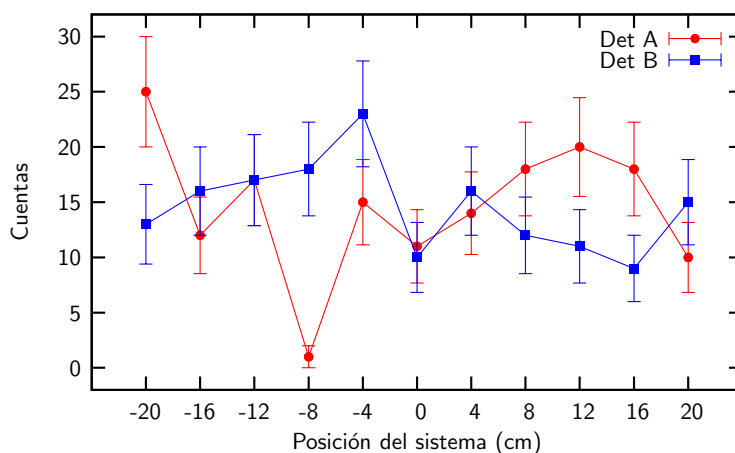
Figura 3.12. Número de cuentas en el detector como función de la posición del sistema (detectores + ^{252}Cf). En el caso del bloque de polietileno enterrado a 0 cm, 2 cm, 4 cm, 6 cm y 8 cm respecto a la superficie del suelo

Mina de prueba de polietileno

En la figura 3.13 se observa el número de cuentas para el caso de la mina de prueba de polietileno como función de la posición del sistema cuando se encuentra enterrada a 0 cm (figura 3.13(a)) y 2 cm (figura 3.13(b)). Los resultados no son concluyentes. Al parecer el número de cuentas en este caso se refiere al fondo.



(a) 0 cm



(b) 2 cm

Figura 3.13. Número de cuentas en el detector como función de la posición del sistema, en el caso de la mina de polietileno, enterrada a (a) 0 cm y (b) 2 cm, respecto de la superficie del suelo.

Para determinar qué es lo que está sucediendo, primero se enviaron 10^6 neutrones sobre la muestra (figura 3.14(a)). Lo único que se obtiene es un aumento en el número de cuentas, debido precisamente a que aumenta el número de neutrones que interactúan con el polietileno, pero aumentar el número de neutrones incidentes lleva a que el número de cuentas en el fondo aumente también. En la figura 3.14(b) se muestra el comportamiento del número de cuentas cuando se aumenta la densidad del polietileno 100 veces, tomando el valor $\rho_{\text{Poly}} = 92 \text{ g/cm}^3$. Aquí si se observan señales distintivas que, como en el caso del bloque de polietileno, permiten determinar la posición de la mina de prueba. Entonces, se puede decir que el número

de hidrógenos contenido por cm^3 en la muestra determina si es posible la detección o no del material para la geometría y dimensiones utilizadas. En la tabla 3.3 se muestra el número de hidrógenos/ cm^3 para las dos densidades utilizadas. Este valor se calcula como sigue:

$$\#H/\text{cm}^3 = \#H \cdot \frac{\rho \cdot 6.02 \times 10^{23}}{W}, \quad (3.1)$$

con ρ la densidad y W el peso molecular.

También se observa en la figura 3.14(b) que se verifica nuevamente la ley de reflexión especular, la distancia más cercana entre el detector y la fuente que coincide con el centro de la mina es cuando el sistema se encuentra en 0 cm.

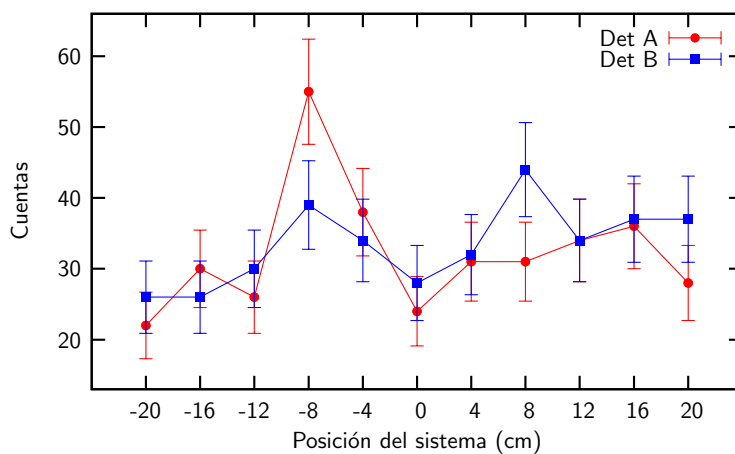
Material	Fórmula Química	Peso Molecular g	Densidad g/ cm^3	# H/ cm^3
TNT	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$	227.1	1.654	2.186×10^{22}
			165.4	2.193×10^{24}
Polietileno	$(\text{CH}_2\text{—})_6$	86	0.92	9.019×10^{22}
			92	9.016×10^{24}

Tabla 3.3. Propiedades características generales para el trinitrotolueno (TNT) y el polietileno, variando la densidad.

Otra aproximación a la solución de este problema, es variar la distancia entre el sistema detector-fuente y el suelo. Los resultados se muestran para el Detector A en la figura 3.15, donde al disminuir la distancia entre el sistema y el suelo aumenta el número de cuentas, pero no es concluyente en cuanto a si hay una mayor concentración de hidrógeno.

Mina de prueba de TNT

En este caso se utiliza una mina de TNT, cuyas propiedades se encuentran en la tabla 3.1. Como se observa en la figura 3.16 los resultados no son concluyentes para la configuración geométrica simulada. Se obtienen en promedio que el número de cuentas es similar cuando la superficie superior de la mina se encuentra a nivel del suelo (figura 3.16(a)) como cuando se encuentra enterrada (figura 3.16(b)). Nuevamente se aumentó la densidad del TNT a 100



(a) 1 millón de eventos

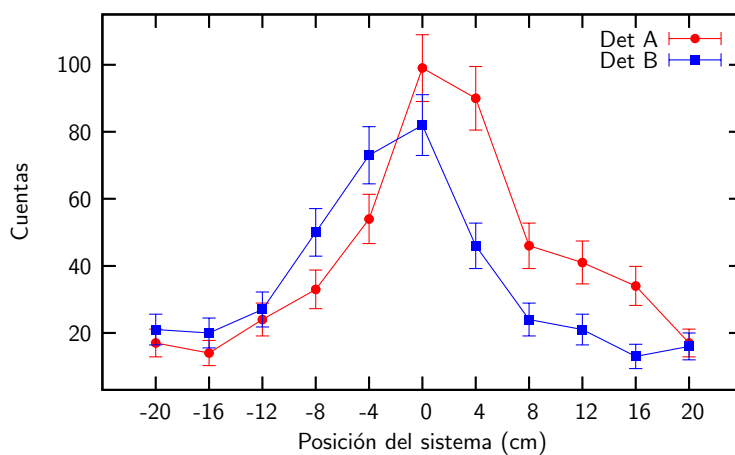
(b) $\rho_{\text{Poly}} = 92 \text{ g/cm}^3$

Figura 3.14. Número de cuentas en el detector como función de la posición del sistema, en el caso de la mina de polietileno enterrada a 0 cm de la superficie del suelo, (a) aumentando el número de neutrones incidentes sobre la muestra, (b) aumentado la densidad del polietileno 100 veces.

veces su valor original (figura 3.16(c)) pero en este caso no se mejora la señal, y no es posible determinar la posición del blanco.

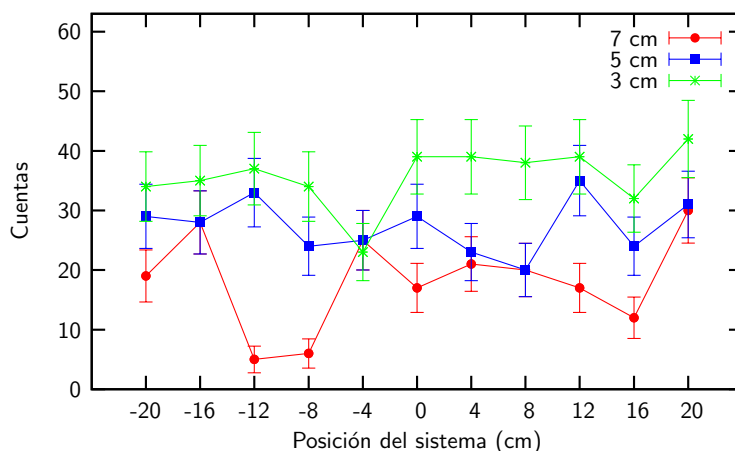
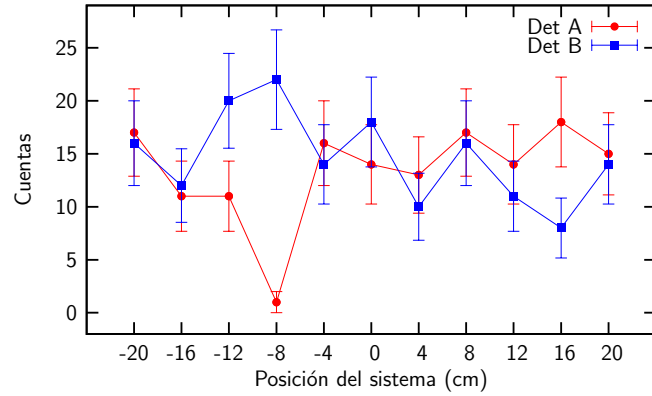


Figura 3.15. Número de cuentas en el detector A como función de la posición del sistema, en el caso de la mina de polietileno, variando la distancia entre el sistema (detector-fuente) y el suelo.

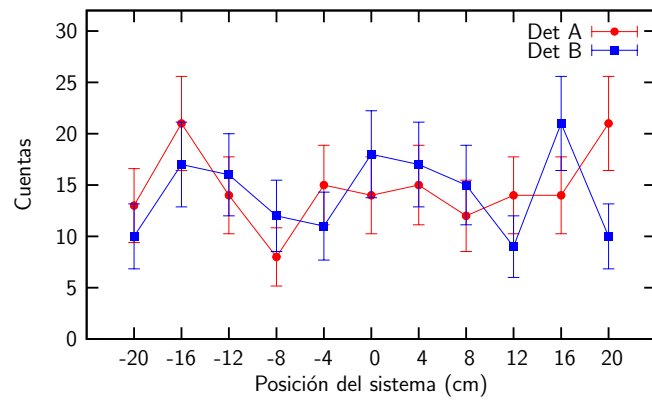
3.4.3. Incluyendo humedad en el suelo

Para ver el efecto de la humedad en el proceso de retrodispersión de neutrones utilizamos el bloque de polietileno enterrado a 0 cm para el cual obtuvimos una buena señal con suelo seco. Luego se aumentó el porcentaje de agua en el suelo. En la figura 3.12 el porcentaje de humedad es cero y el valor cuando la posición del sistema es -20 cm es cercano a 130, así en la figura 3.17, al aumentarse la humedad, se observa que -además de incrementarse el número de cuentas en los máximos- también se incrementa el valor del fondo, tomando como referencia el valor para el caso sin humedad.

En el caso de la diferencia en el número de cuentas se observa que para este caso particular la detección es posible y no se puede afirmar cual es el valor de humedad para el cual la detección no se puede llevar a cabo. Esto se debe a que el número de hidrógenos presentes en la muestra sigue siendo mucho mayor que el del medio que lo rodea. Es necesario llevar a cabo simulaciones donde se contemple el aumento en el porcentaje de humedad para encontrar un valor para el cual la detección sea posible.



(a) 0 cm



(b) 2 cm

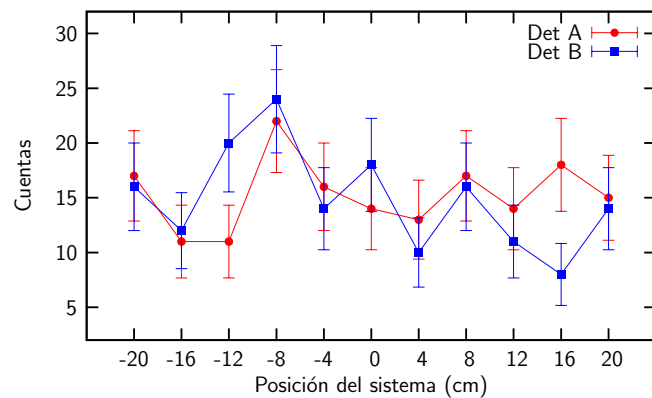
(c) $\rho_{TNT}=165.4 \text{ g/cm}^3$

Figura 3.16. Número de cuentas en el detector como función de la posición del sistema, en el caso de la mina de prueba (TNT), enterrada a (a) 0 cm y (b) 2 cm, respecto de la superficie del suelo.

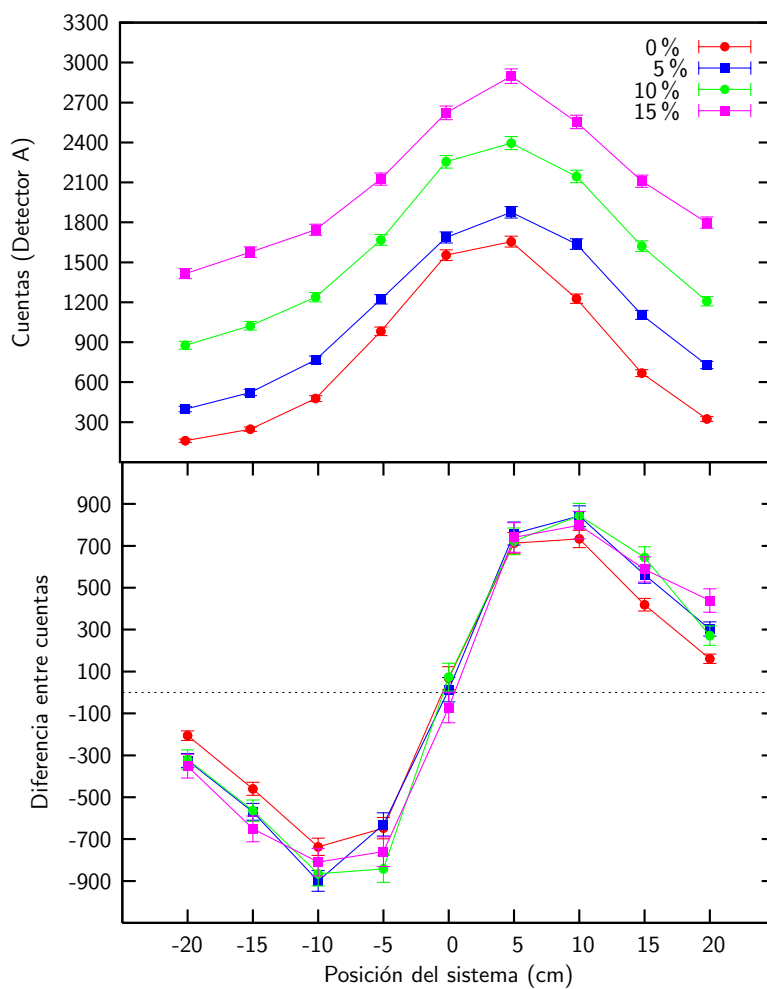


Figura 3.17. Número de cuentas y diferencia entre ellas en el detector como función de la posición del sistema, cuando se introduce humedad en diferentes porcentajes.

CAPÍTULO 4

Conclusiones y Expectativas

Por medio de la experimentación y la simulación usando Monte Carlo a través del paquete de programaxmas Geant4, se estudió la posibilidad de detectar material orgánico sobre el suelo o enterrado en él a través del método de retrodispersión de neutrones

Como un primer acercamiento al método de retrodispersión se llevaron a cabo pruebas experimentales con un montaje experimental sencillo. Se utilizaron dos detectores de ^3He y una fuente de neutrones rápidos de ^{252}Cf ubicados en un soporte móvil sobre una caja de arena que simula el suelo, el soporte se puede mover de izquierda a derecha sobre la superficie de la caja. Como blancos se utilizaron: un bloque de polietileno y dos minas de prueba, una simulando TNT no explosivo y la otra de polietileno. Se obtienen resultados claros en el caso en el que el blanco es el bloque de polietileno ubicado tanto sobre la superficie de suelo, como enterrado en él cuando la distancia entre los detectores es de 18 cm. A partir del análisis de esos resultados, especialmente observando los máximos en el número de cuentas en una distribución de número de cuentas como función de la posición del sistema, entendiéndose éste como los arreglos de detectores y la fuente, se concibe la idea de una ley de reflexión especular para neutrones, en donde se tiene en cuenta que cuando el centro del blanco está a medio camino entre la fuente y el detector, aparece un máximo en el valor del número de cuentas, lo que permite determinar la posición en la que se encuentra el material escondido.

Los resultados experimentales en el caso de la mina de prueba simulante de TNT, para una distancia de 18 cm entre los detectores no son claros, en este caso no se puede afirmar que su detección sea posible, ya que no se pueden diferenciar máximos en el número de cuentas

registrado por el detector. Al hacer una comparación entre los volúmenes de los blancos (bloque de polietileno y mina de prueba) se encuentra que, la relación entre ellos resulta se cercana a la relación entre los números de cuentas en los dos casos. Para obtener mejores resultados experimentales para el caso de la mina de prueba, se disminuye la distancia entre los detectores a 6 cm. Para este caso se distinguen los valores máximos en el número de cuentas, lo que nos llevaría a pensar que el problema de detección para esta caso particular se debió a la disposición experimental utilizada.

Además se tiene que para el tipo de geometría utilizada, el comportamiento de la diferencia entre el número de cuentas para dos detectores, juega un papel importante en la detección de elementos escondidos, la diferencia existente, en general, debe ser mayor que el número de cuentas registrado para el fondo, para que se pueda determinar si hay o no, material escondido. Si no hay presencia de material orgánico, el valor de la diferencia entre el número de cuentas debe corresponder al valor tomado para el fondo, y las variaciones entre el número de cuentas, es un buen indicador de la presencia de material orgánico escondido.

Cabe anotar que la parte experimental ofreció una buena referencia para la simulación, ayudó a delimitar tanto la geometría a simular como los diferentes parámetros a tener en cuenta. Además permitió el contacto con el método de manera experimental, lo que orientó el análisis y buena conclusión de la simulación.

Para el caso de la simulación se utilizó un arreglo de detectores en vez de un par de detectores con el objetivo de incrementar la sección eficaz de detección y por lo tanto el número de neutrones lentos detectados. Salvo esta diferencia con la parte experimental, los montajes simulado y experimental son similares. Se obtienen buenos resultados en el caso en el que el blanco es el bloque de polietileno, tanto sobre la superficie del suelo y enterrado en él. Se observan los máximos en el número de cuentas en los detectores, además del valor en la diferencia entre ellas, lo que permite asegurar que para el caso del bloque de polietileno utilizado en la simulación es posible su detección. Además para el mismo tipo de material, polietileno, la variación en el volumen del mismo hace que la detección sea exitosa o no, este es uno de los factores que se debe tener en cuenta tanto en la parte experimental como en la simulación, aunque el material presente la misma densidad, el mismo $\#H/cm^3$, si su volumen es distinto la respuesta ante el método de retrodispersión es distinta.

En el caso de la mina de prueba, los resultados no son concluyentes para la geometría simulada. En este caso no se obtiene información que confirme la presencia de anomalías de hidrógeno y por lo tanto la presencia de la mina. Estos resultados se pueden mejorar cambiando como primera medida la disposición geométrica de los detectores para determinar el comportamiento del número de cuentas como función de la posición de los detectores.

Al tener en cuenta la humedad en el suelo en algún porcentaje, se observa que el número de cuentas proveniente del fondo se incrementa, esto debido a que aumenta la cantidad de

hidrógenos en el suelo, y por lo tanto hay un mayor número de neutrones que sufren termalización y son retrodispersados. Con los resultados encontrados no se puede afirmar a que valor límite de humedad la detección es posible, para esto es necesario implementar nuevos casos en los que la humedad aumente.

Aunque en general la simulación se llevó a cabo en condiciones propicias para maximizar el efecto de la retrodispersión de neutrones, suelo sin contenido de hidrógeno en contraste con muestras que lo contienen en mayor proporción, los resultados ofrecen una corroboración del método de retrodispersión de neutrones, además de fijar parámetros tanto en el número de cuentas a esperar, como el comportamiento en su diferencia, dependiendo de la posición del material respecto del sistema detector-fuente, la profundidad a la cual se encuentra enterrado, o la respuesta para diferentes volúmenes de la muestra.

Teniendo en cuenta que los resultados obtenidos no son definitivos y hacen parte de una investigación en marcha, son el primer paso dentro del intento de comprender el método de retrodispersión de neutrones, hay mucho por hacer, este método se puede aplicar al caso particular de Colombia, donde se definan los tipos de suelo colombiano y se utilice las dimensiones apropiadas para una mina antipersona. Es claro que para el caso colombiano, la presencia de humedad en el suelo es relevante, lo que hace que se deba aplicar este método de manera conjunta con otra técnica nuclear, además de incluir mayor estadística en los resultados aumentando el número de neutrones rápidos incidentes sobre la muestra.

Aunque el método aquí estudiado ya ha sido investigado y aplicado en otras partes del mundo a la detección de minas antipersona [10, 20, 23, 24, 25], ésta es la primera aproximación que se hace con este objetivo en Colombia, primero como un ejercicio académico en donde se entiende y se estudia el método, y en donde se evidencia que utilizar sólo una técnica nuclear no es suficiente. Lo que nos conduce a concluir que necesario estudiar otras técnicas aplicadas a la resolución de éste problema, como la detección de material orgánicos utilizando radiación gamma y otras técnicas que involucren neutrones.

Bibliografía

- [1] J. Byrne. *Neutrons, Nuclei and Matter*. Institute of Physics Publishing, first edition, (1994).
- [2] J. Gerl G. Nebbia. *Europhysics News*, 2005.
- [3] J. Csikai B. Király, L. Oláh. *Rad. Phys. Chem.*, **61**, 781 (2001).
- [4] A. Buffler F. D. Brooks and M. S. Allie. *Rad. Phys. Chem.*, **71**, 749 (2004).
- [5] G. Viesti *et al.* *Nucl. Inst. and Meth*, A **422**, 918 (1999).
- [6] R. Dóczy B. Király, T. Sanami and J. Csikai. *Nucl. Inst. and Meth*, B **213**, 452 (2004).
- [7] A. Buffler. *Rad. Phys. Chem.*, **71**, 853 (2004).
- [8] G. Nebbia *et al.* *Nucl. Phys.*, A **752**, 469c (2005).
- [9] J. Obhodas *et al.* *Nucl. Inst. and Meth*, B **213**, 445 (2004).
- [10] E. Fioretto *et al.* *Nucl. Inst. and Meth*, B **213**, 457 (2004).
- [11] S. Agostinelli *et al.* *Nucl. Inst. and Meth*, A **506**, 253 (2003).
- [12] A. Buffler. *Nucl. Inst. and Meth*, A **173**, 483 (2001).
- [13] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Springer-Verlag, (1994).
- [14] F. Glenn. *Radiation Detection and Measurement*. John-Wiley & Sons. Inc., (2000).

- [15] G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, (2000).
- [16] A. Oed. *Nucl. Inst. and Meth, A* **525**, 62 (2004).
- [17] <http://www.nndc.bnl.gov/exfor7/endl00.htm>. *Evaluated Nuclear Data File (ENDF)*, (2006).
- [18] W. R. Mills and R. L. Caldwell. *Rev. Sci. Instr.*, **33**, 866 (1962).
- [19] Z. Fishelson S. Shalev and J. M. Cuttler. *Nucl. Inst. and Meth, A* **71**, 292 (2001).
- [20] A. Buffler F. D. Brooks, M. Drogg and M. S. Allie. *Appl. Radiat. Isot.*, **61**, 27 (2004).
- [21] J. Csikai and I. ElAgib. *Nucl. Inst. and Meth., A* **432**, 410 (1999).
- [22] V. R. Born and C. W. E. van Eijk C. P. Datema. *Nucl. Inst. and Meth, A* **488**, 441 (2002).
- [23] C. P. Datema V. J. Born and C.W.E. van Eijk. The status of the Delft University landmine detector (dunlad). *Proceedings of the Final RCM on the Application of Nuclear Techniques to Anti-personnel Landmines Identification.*, IAEA, Vienna, (2003).
- [24] G. Nebbia et al G. Viesti, M. Lunardon. Performance and limitations of neutron backscattering sensors. *EUDEM2-SCOT-2003, International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO.*, Vrije Universiteit, Brussels, (2003).
- [25] A. Buffler F. D. Brooks and M. S. Allie. Hydad systems for detecting anti-personnel landmines. *Proceedings of the Final RCM on the Application of Nuclear Techniques to Anti-personnel Landmines Identification.*, IAEA, Vienna, (2003).
- [26] G. Viesti et al. *Appl. Radiat. Isot.*, **64**, 706 (2006).
- [27] F.D. Brooks and M. Drogg. *Appl. Radiat. Isot.*, **63**, 565 (2005).
- [28] IAEA 2003. *Proceedings of the Final RCM on the Application of Nuclear Techniques to Anti-personnel Landmines Identification.*, IAEA, Vienna, (2003).
- [29] <http://root.cern.ch/>. *The ROOT System Home Page 2006*.
- [30] S. G. Prussin W. C. Sailor and M. S. Derzon. *Nucl. Inst. and Meth, A* **270**, 527 (1988).
- [31] C. Rigollet M. Maucec. *Appl. Radiat. Isot.*, **61**, 35 (2004).
- [32] AEA Technology QSA. *Sources*, (2004).
- [33] <http://www.lndnc.com>. *LND, INC*, (2007).
- [34] C. W. Evan Eijk C. P. Datema, V. R. Born. *DUNBLAD: the Delft University Neutron Backscattering Landmine Detector*, (2002).