

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO  
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES

---

Facultad de Ciencias

TESIS

*Para obtener el título de Físico*

**Determinación Experimental de la  
Contribución por Dispersión de Neutrones al  
Campo de Referencia del LSCD-ININ**

*Presenta:*

Bruno Navarro Hurtado

*Asesor:*

Dr. Juan Carlos Morales Rivera

*Coasesor:*

Dr. Héctor Javier Mendoza Nava

5 de noviembre de 2025



## RESUMEN

---

En este trabajo se determinó la contribución por dispersión de una sala de neutrones, para establecer un campo de referencia, del Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del ININ. Las mediciones fueron realizadas con un detector Berthold D7547 Wildback en una esfera de Bonner de 10 pulgadas de diámetro, irradiada con una fuente de neutrones de referencia de  $^{241}\text{Am-Be}$ . La contribución por dispersión se determinó mediante el método de conos de sombra y el método semi-empírico obteniendo resultados consistentes dentro de las incertidumbres calculadas. Adicionalmente, se realizaron simulaciones Monte Carlo cuyos resultados fueron también consistentes con aquellos determinados de forma experimental.



*No conoceré el miedo. El miedo mata la mente.  
El miedo es la pequeña muerte que conduce a la destrucción total.  
Afrontare mi miedo. Permitiré que pase sobre mí y a través de mí.  
Y cuando haya pasado, volveré mi ojo interior sobre su camino.  
Allá donde haya pasado el miedo, ya no habrá nada.  
Solo estaré yo.*

— Frank Herbert:1965

## AGRADECIMIENTOS

---

Me encuentro profundamente agradecido con todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de tesis, las palabras nunca serán comparables con las facilidades que brindaron para obtener este logro.

A mi asesor, Dr. Juan Carlos y mi coasesor, Dr. Héctor Javier, quienes siempre estuvieron dispuestos a orientarme, me impulsaron a aprender más de lo necesario y su paciencia nunca tuvo fondo.

A la M. en C. Marissa Maldonado, quien fue una guía indispensable para el desarrollo de esta tesis, nunca dejó de compartirme sus enseñanzas y siempre me ayudó a corregir mis errores.

Al Dr. Enrique Martínez, por su crítica constructiva y por siempre ofrecer una mano a los alumnos de física nuclear.

A todo el personal del Centro de Metrología de Radiaciones Ionizantes, por su cálido recibimiento e inclusión.

A la Universidad Autónoma del Estado de México, por permitirme desarrollarme profesionalmente, y al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, por aceptarme en su institución y brindarme el espacio y los recursos para mi trabajo de tesis.

A mis padres y hermana, por su amor, paciencia y constante apoyo en todo lo que hago, sin ustedes no habría estado ni cerca de empezar este trabajo.

A Aridai, quien siempre estuvo a mi lado durante y después de la carrera, por su amor, por motivarme y no dejarme rendir en nada de lo que hago.

A mis grandes amigos, Go, Te, Ma, Li, Ka, Ca, Ka, Sa, quienes a pesar de no tener una relación directa con este trabajo siempre han estado ahí para escucharme, hacerme reír y motivarme.

A todos aquellos que me permitieron escribir esta tesis, les estaré siempre agradecido.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>I</b>	<b>CONCEPTOS</b>	<b>1</b>
1	INTRODUCCIÓN	3
2	GENERALIDADES	5
2.1	Radiación ionizante . . . . .	5
2.1.1	Descubrimiento de los rayos X . . . . .	5
2.1.2	Descubrimiento de la radiactividad . . . . .	5
2.2	Radiación neutrónica . . . . .	6
2.2.1	Primeros descubrimientos del neutrón . . . . .	6
2.2.2	Reacciones nucleares . . . . .	7
2.3	Protección radiológica . . . . .	8
2.3.1	Surgimiento de la protección radiológica . . . . .	8
2.3.2	Primeras recomendaciones de PR . . . . .	8
2.3.3	Aspectos biológicos de la protección radiológica . . . . .	9
2.3.4	Magnitudes usadas en la protección radiológica . . . . .	9
2.3.5	Sistemas de limitación de dosis para PR . . . . .	10
2.3.6	Protección radiológica de neutrones . . . . .	12
2.4	Metrología de radiaciones ionizantes . . . . .	12
2.4.1	Magnitudes y unidades . . . . .	12
2.4.2	Magnitudes radiométricas . . . . .	13
3	MARCO TEÓRICO	15
3.1	Metrología de neutrones . . . . .	15
3.1.1	Principios fundamentales . . . . .	15
3.1.2	Campos de referencia . . . . .	16
3.1.3	Fuentes de neutrones . . . . .	16
3.1.4	Tasa de fluencia producida por una fuente de neutrones . . . . .	16
3.1.5	Corrección por decaimiento . . . . .	17
3.1.6	Sala de calibración . . . . .	18
3.1.7	Características importantes . . . . .	18
3.1.8	Principios para la calibración con fuentes de neutrones . . . . .	19
3.2	Caracterización de la dispersión . . . . .	20
3.2.1	Método de conos de sombra . . . . .	20
3.2.2	Método semi-empírico . . . . .	22
3.2.3	Corrección por fondo . . . . .	24
3.3	Validación de los métodos . . . . .	25
3.4	Estimación de incertidumbres de medida . . . . .	26
3.4.1	Definición de incertidumbre . . . . .	26
3.4.2	Modelo de medición . . . . .	26
3.4.3	Incertidumbre tipo A . . . . .	27

3.4.4	Incertidumbre tipo B . . . . .	28
3.4.5	Incertidumbre típica combinada . . . . .	28
3.4.6	Distribuciones de probabilidad . . . . .	30
3.4.7	Incertidumbre expandida . . . . .	31
3.4.8	Pasos para la evaluación de la incertidumbre . .	34
3.5	Simulación Monte Carlo . . . . .	35
3.5.1	Origen del método Monte Carlo . . . . .	35
3.5.2	Transporte de partículas . . . . .	35
3.5.3	Metodología . . . . .	36
3.5.4	Códigos de simulación de transporte de neutrones	36
<b>II DISEÑO EXPERIMENTAL</b>		<b>37</b>
4	OBJETIVOS	39
4.1	Objetivo general . . . . .	39
4.1.1	Objetivos particulares . . . . .	39
5	MATERIALES Y MÉTODOS	41
5.1	Instrumentos . . . . .	41
5.1.1	Sala de neutrones . . . . .	41
5.1.2	Fuente de neutrones . . . . .	42
5.1.3	Detector . . . . .	43
5.2	Método de conos de sombra . . . . .	44
5.3	Método semi-empírico . . . . .	47
5.4	Simulación Monte Carlo . . . . .	47
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
6.1	Método de conos de sombra . . . . .	49
6.2	Método semi-empírico . . . . .	51
6.3	Resultados de ambos métodos . . . . .	54
7	CONCLUSIONES	59
<b>III APÉNDICES</b>		<b>61</b>
A	CORRECCIONES ADICIONALES	63
A.1	Corrección por fondo . . . . .	63
A.2	Corrección por decaimiento . . . . .	63
B	PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRES	65
B.1	Cuentas por segundo . . . . .	65
B.2	Cuentas por segundo sin fondo (cps) . . . . .	67
B.3	Constante de decaimiento . . . . .	68
B.4	Ley de decaimiento . . . . .	69
B.5	Intensidad angular de la fuente . . . . .	70
B.6	Factor de atenuación del aire $F_A(l)$ . . . . .	71
B.7	Factor de atenuación del aire $F'_A(l)$ . . . . .	72
B.8	Constante característica $k$ . . . . .	73
B.9	Respuesta a Fluencia $R_\Phi$ . . . . .	74
B.10	Neutrones directos $N_D$ . . . . .	75
B.11	Contribución por dispersión $D_c$ . . . . .	76
B.12	Fluencia $\varphi$ . . . . .	77

B.13	Factor de corrección geométrico $F_1(l)$ . . . . .	78
B.14	Ecuación 17 . . . . .	79
B.15	Contribución fraccional por dispersión $S$ . . . . .	81
C	CÓDIGO DE LA SIMULACIÓN	83
D	PRODUCTOS DE LA TESIS	101
	BIBLIOGRAFÍA	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1	Primera fotografía de Rx, tomada por Roentgen a la mano de su esposa [5]. . . . .	5
Figura 2	Diagrama de los experimentos hechos por Irene, Joliot y Chadwick. . . . .	7
Figura 3	Red de eventos y situaciones para representar la exposición de la población a las fuentes radiactivas. . . . .	11
Figura 4	Se representa el comportamiento de los neutrones que salen de la fuente junto con una línea a guiones que representa el ángulo sólido que proyecta la fuente sobre el detector. 1-. Los neutrones siguen la trayectoria con la que salieron de la fuente, 2-. Dispersión por la sala o estructuras de soporte, 3-. <i>Air-outscatter</i> y 4-. <i>Air-inscatter</i> . . . . .	19
Figura 5	Representación gráfica del fenómeno, los neutrones provenientes de la fuente colisionan con las moléculas de aire y se ven dispersados fuera de la trayectoria entre la fuente y el detector. . . . .	22
Figura 6	Comparación representativa de la cantidad de neutrones dentro del volumen del detector a distancias pequeñas y a distancias grandes tales que $l^2 \gg (r_f + rD)^2$ , y $F_1(l) \approx 1$ . . . . .	23
Figura 7	Ilustración del fenómeno, la contribución <i>inscatter</i> aumenta la lectura del detector, mientras que la contribución <i>outscatter</i> la disminuye. El efecto neto $A$ toma en cuenta los neutrones que no llegan al detector debido a la dispersión del aire por medio de la resta <i>inscatter</i> menos <i>outscatter</i> . . . . .	24
Figura 8	Diagrama de la sala de neutrones del LSCD-ININ, junto con la posición de los instrumentos dentro de la sala. . . . .	41
Figura 9	Dibujo de la fuente de neutrones con dimensiones. La sección gris representa las dimensiones del encapsulamiento, mientras que la sección roja representa el volumen activo. . . . .	42
Figura 10	Detector centellador con tubo fotomultiplicador (izquierda) y esfera de Bonner (derecha). . . . .	43

Figura 11	Diagrama del detector, se muestra el cristal centellador ubicado en el centro de la esfera de polietileno, junto con el tubo foto-multiplicador.	43
Figura 12	Diagrama del sistema de adquisición de datos.	44
Figura 13	Arreglo experimental del método de conos de sombra, con la fuente del lado izquierdo, el cono de sombra en el centro y el detector dentro de la esfera de polietileno del lado derecho.	45
Figura 14	Esquema del arreglo experimental con las dimensiones del cono y las distancias a las que se encuentra cada elemento del experimento entre sí. . . . .	45
Figura 15	Gráfica de los datos experimentales y ajuste lineal por mínimos cuadrado ponderados. . . . .	54
Figura 16	Gráfica de los datos experimentales y el ajuste lineal por mínimos cuadrado ponderados después de eliminar los puntos fuera de la tendencia lineal. . . . .	56
Figura 17	Comparación de los resultados experimentales con los resultados de las simulaciones. . . . .	58

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1	Magnitudes fundamentales y unidades del SI.	13
Tabla 2	Valores de $t_p(\nu_{eff})$ de la distribución t de Student, para distintos niveles de confianza p [15].	34
Tabla 3	Comparación de los valores obtenidos de los dos factores de atenuación del aire a las 3 distancias de medición. . . . .	47
Tabla 4	Resultados de la mediciones sin cono a las 3 distancias. Se muestran las lecturas sin fondo $M_T(l)$ . . . . .	49
Tabla 5	Resultados de la mediciones con cono a las 3 distancias. Se muestran las lecturas sin fondo $M_S(l)$ . . . . .	49
Tabla 6	Resultados de la constante característica k y la respuesta a fluencia $R_\Phi$ a las 3 distancias de medición. . . . .	50
Tabla 7	Resultados de la contribución por neutrones directos $N_D$ y la contribución por dispersión $D_c$ a las 3 distancias de medición. . . . .	50
Tabla 8	Resultados obtenidos del cálculo de la fluencia $\varphi$ para las 25 distancias de medición. . . . .	51
Tabla 9	Resultados obtenidos del cálculo del factor de corrección geométrico para las 25 distancias de medición. . . . .	51
Tabla 10	Resultados de las mediciones obtenidas a las 25 distancias con incertidumbres. Se muestran las lecturas sin fondo $M_T(l)$ . . . . .	52
Tabla 11	Valores obtenidos del lado izquierdo de la ecuación (17). . . . .	53
Tabla 12	Parámetros obtenidos del ajuste lineal por mínimos cuadrados ponderados. . . . .	54
Tabla 13	Resultados de la contribución por dispersión $D_s$ a las 3 distancias de medición para el método semi-empírico. . . . .	55
Tabla 14	Comparación de la contribución por dispersión obtenida por ambos métodos. . . . .	55
Tabla 15	Parámetros obtenidos del ajuste lineal después de eliminar los puntos fuera de la tendencia lineal. . . . .	56
Tabla 16	Contribución por dispersión $D_s$ para el método semi-empírico con la nueva contribución fraccional por dispersión S. . . . .	56

Tabla 17	Comparación de la contribución por dispersión obtenida por ambos métodos después de obtener la nueva contribución fraccional $S$ . . .	57
Tabla 18	Resultados obtenidos de la <i>tally</i> de flujo para las simulaciones sin cono a las tres distancias de medición. . . . .	57
Tabla 19	Resultados obtenidos de la <i>tally</i> de flujo para las simulaciones con cono a las tres distancias de medición. . . . .	57
Tabla 20	Resultados de la contribución por dispersión $D_m$ determinados a través de las simulaciones Monte Carlo. . . . .	58
Tabla 21	Comparación de la contribución por dispersión de los métodos experimentales con la simulación Monte Carlo. . . . .	58
Tabla 22	Información de las magnitudes de entrada. . .	66
Tabla 23	Estimación de la incertidumbre. . . . .	67
Tabla 24	Información de las magnitudes de entrada. . .	67
Tabla 25	Estimación de la incertidumbre. . . . .	68
Tabla 26	Información de las magnitudes de entrada. . .	68
Tabla 27	Estimación de la incertidumbre. . . . .	68
Tabla 28	Información de las magnitudes de entrada. . .	69
Tabla 29	Estimación de la incertidumbre. . . . .	69
Tabla 30	Información de las magnitudes de entrada. . .	70
Tabla 31	Estimación de la incertidumbre. . . . .	70
Tabla 32	Información de las magnitudes de entrada. . .	71
Tabla 33	Estimación de la incertidumbre. . . . .	71
Tabla 34	Información de las magnitudes de entrada. . .	72
Tabla 35	Estimación de la incertidumbre. . . . .	72
Tabla 36	Información de las magnitudes de entrada. . .	73
Tabla 37	Estimación de la incertidumbre. . . . .	74
Tabla 38	Información de las magnitudes de entrada. . .	74
Tabla 39	Estimación de la incertidumbre. . . . .	75
Tabla 40	Información de las magnitudes de entrada. . .	75
Tabla 41	Estimación de la incertidumbre. . . . .	76
Tabla 42	Información de las magnitudes de entrada. . .	76
Tabla 43	Estimación de la incertidumbre. . . . .	77
Tabla 44	Información de las magnitudes de entrada. . .	77
Tabla 45	Estimación de la incertidumbre. . . . .	78
Tabla 46	Información de las magnitudes de entrada. . .	78
Tabla 47	Estimación de la incertidumbre. . . . .	79
Tabla 48	Información de las magnitudes de entrada. . .	80
Tabla 49	Estimación de la incertidumbre. . . . .	80
Tabla 50	Información de las magnitudes de entrada. . .	81
Tabla 51	Estimación de la incertidumbre. . . . .	81

## ÍNDICE DE CÓDIGOS

---

1	Código utilizado para las simulaciones . . . . .	83
---	--	----

Parte I

CONCEPTOS



## INTRODUCCIÓN

---

La radiación de neutrones tiene presencia en innumerables aplicaciones en industria e investigación debido a las propiedades clave de este tipo de partículas: 1) los neutrones son eléctricamente neutros, lo que les permite interactuar directamente con los núcleos atómicos a través de la fuerza nuclear fuerte, 2) poseen un momento magnético intrínseco asociado a su espín, haciéndolos una buena herramienta para estudiar materiales y estructuras magnéticas, 3) su energía y su longitud de onda, pueden ajustarse en un rango que coincide con las distancias interatómicas y las escalas de la materia condensada, siendo ideales para investigar estructuras y procesos a nivel atómico y molecular [1].

Algunas aplicaciones son las radiografías de neutrones, útiles para la inspección de combustibles nucleares o para la evaluación de las estructuras internas de un reactor nuclear; la biología estructural, que encuentra un gran interés en los ensamblajes moleculares de las proteínas, los virus, liposomas e incluso proteínas más complejas como el ADN; los reactores nucleares de potencia, que utilizan isótopos inestables como el  $^{235}\text{U}$  para producir reacciones de fisión en cadena acompañadas de una gran liberación de energía, para después ser transformada mediante distintos procesos en energía eléctrica.

Estas aplicaciones han puesto en evidencia la creciente necesidad de detectar y medir campos de neutrones, así como cuantificar el riesgo que entraña la radiación neutrónica para las personas expuestas; en este sentido, se han establecido magnitudes que relacionan una dosis neutrónica dada con los efectos biológicos que produce en los seres humanos.

La medición de estas dosis se realiza con instrumentos y/o materiales cuyas propiedades atómicas o nucleares permiten medir la radiación ionizante. En términos de protección radiológica, estos instrumentos son de gran importancia, ya que permiten evaluar la dosis del personal ocupacional, para mantenerlas siempre por debajo de límites que garanticen el uso seguro de radiaciones ionizantes.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) ha establecido restricciones de dosis para situaciones de exposición planificada. Estas sirven como un límite superior de las dosis que podrían estar presentes en una exposición como una forma básica

de protección. De acuerdo con las recomendaciones del ICRP, se menciona que las dosis de radiación superiores a los 100 mSv ya representan un incremento importante para la aparición de efectos deterministas y un grado de riesgo alto de cáncer para exposiciones de una sola instancia o a lo largo de un año. Para los límites de dosis, la ICRP recomienda para el personal ocupacional, que la dosis efectiva no supere los 20 mSv por año promediados en un periodo de 5 años, junto con la condición de que en ningún año se superen los 50 mSv. Para el público se recomienda 1 mSv por año [2].

Para la vigilancia de las dosis ocupacionales, es indispensable la correcta calibración de los dispositivos encargados de medir la radiación, de manera que los valores obtenidos sean confiables para cumplir con los sistemas de limitación de dosis para el personal ocupacional y el público en general. La calibración es una "operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación" [3]. Las mediciones tienen una naturaleza estadística que se hace compleja debido a todas las variables que pueden influir en el mesurando. El valor de la medición solo puede asegurarse dentro de un intervalo de incertidumbre. En el Centro de Metrología de Radiaciones Ionizantes del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), se busca desarrollar las Capacidades de Medición y Calibración (CMCs) para las magnitudes de dosis equivalente ambiental  $H^*(10)$ , y dosis equivalente personal  $H_p(d)$  en campos de neutrones, de acuerdo con el estándar internacional ISO 8529 – 2 [4]. Entre las contribuciones a un campo de referencia que la norma puntualiza, se enfatizan las correcciones por dispersión neutrónica por las paredes, suelo y aire de la sala de calibración, que debe ser caracterizada de forma precisa para establecer un campo de referencia. La norma propone cuatro métodos para la medición de los neutrones dispersados, en este trabajo se realizó el estudio por medio de dos de ellos, siendo estos el método semi-empírico y el método de conos de sombra.

## GENERALIDADES

---

### 2.1 RADIACIÓN IONIZANTE

#### 2.1.1 Descubrimiento de los rayos X

El descubrimiento de la radiación ocurrió un 8 de noviembre de 1895, mientras Wilhelm Conrad Roentgen trabajaba con un tubo de Crookes que estaba situado cerca de una pantalla de cartón recubierta de platinocianuro de bario. Cada vez que se producía una descarga eléctrica dentro del tubo catódico, era posible observar una débil luminiscencia en la superficie del cartón, aun cuando el tubo estaba completamente opacado por una cubierta negra que impedía el paso de luz visible. Estas observaciones llevaron a Roentgen a intuir que la fluorescencia en el cartón debía ser producida por un tipo de luz invisible, siendo esta desconocida en ese momento, la nombro como rayos X (Rx).

Continuando con sus experimentos alrededor de este nuevo fenómeno, Roentgen decidió cambiar la pantalla fluorescente por una placa fotográfica, y el 22 de diciembre de ese mismo año obtuvo la primera fotografía de Rx (Figura 1), capturando en ella la forma ósea de la mano de su esposa.

#### 2.1.2 Descubrimiento de la radiactividad

Siguiendo con los experimentos relacionados con Rx, Becquerel en 1896, comenzó un estudio en el que analizó la relación que existe entre la emisión de luz visible y la emisión de Rx. Utilizó sales de uranio expuestas a la luz del sol para hacerlas fluorescentes, posteriormente las envolvió en papel negro y luego las depositó encima de placas fotográficas para observar la emisión de Rx. La placa fotográfica revelada mostró manchas oscuras similares a aquellas obtenidas con Rx.

Luego de un tiempo, Becquerel reveló una placa fotográfica que estaba debajo de una bandeja de sales de uranio que no habían sido expuestas al sol, ya que tanto las sales como la placa permanecieron varios días dentro de un cajón, una vez revelada la placa fotográfica,



Figura 1: Primera fotografía de Rx, tomada por Roentgen a la mano de su esposa [5].

Becquerel observó las mismas manchas que con las sales de uranio expuestas al sol.

Después de reproducir sus observaciones, llegó a la conclusión de que era posible prescindir de la luz del sol y de la fluorescencia para obtener las mismas manchas en la placa fotográfica, y que las sales de uranio emitían rayos invisibles por si solas.

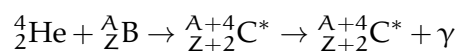
Poco después se descubrió que los Rx eran capaces de hacer que el aire se comportara como un conductor eléctrico con cargas libres, estas cargas podían ser recogidas por medio de un campo eléctrico inducido sobre la masa de aire. Madame Curie haciendo uso de esta propiedad fue capaz de medir la intensidad de los Rx así como la radiación de las sales de uranio que Becquerel había descubierto. Utilizó una cámara de ionización y un electrómetro conectado a esta, repitió los experimentos de Becquerel y observó que la intensidad de radiación era directamente proporcional a la cantidad de sales de uranio medidas. En 1898 Curie y su esposo Pierre descubrieron el polonio y el radio, siendo este último el utilizado por Curie para nombrar al nuevo fenómeno descubierto, la radiactividad.

## 2.2 RADIACIÓN NEUTRÓNICA

### 2.2.1 Primeros descubrimientos del neutrón

Tiempo después, en 1930 Walther Bothe y Herbert Becker mostraron que los átomos de berilio (Be), boro (B), flúor (F) y litio (Li) producían un tipo de radiación muy penetrante después de ser bombardeados por partículas  ${}^4_2\text{He}$  producidas por polonio.

Tal radiación era capaz de penetrar plomo y no podía ser desviada por campos electromagnéticos, fue asociada a los rayos  $\gamma$ . Asumieron que estos núcleos ligeros capturaban las partículas  ${}^4_2\text{He}$  y en el proceso liberaban rayos  $\gamma$  como exceso de energía de la reacción:



Un año más tarde, Irene Curie llegó a resultados similares a los de Bothe y Becker después de estudiar la radiación emitida de las reacciones de berilio y litio, encontró que esta radiación era capaz de atravesar tres veces el grosor de plomo que atravesaban los rayos  $\gamma$  más penetrantes emitidos por elementos radiactivos descubiertos hasta ese momento. Para explicar este efecto asumió que se trataba de rayos  $\gamma$  de muy alta energía.

Dos años después de sus primeras observaciones, Irene Curie y Joliot Curie, midieron la ionización producida por las reacciones de berilio

y observaron que aumentaba cuando situaban materiales altos en hidrógeno enfrente de la ventana de la cámara de ionización. La Figura 2 muestra un diagrama del efecto que observaron, este fue asociado a la eyección de protones; la hipótesis de Bothe y Becker parecía ser correcta.

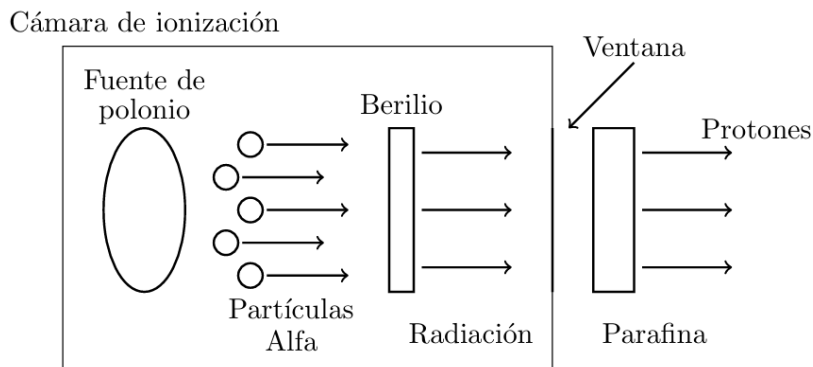
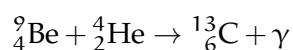


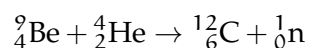
Figura 2: Diagrama de los experimentos hechos por Irene, Joliot y Chadwick.

### 2.2.2 Reacciones nucleares

Partiendo de las ideas de Rutherford, quien sugirió la existencia de una partícula subatómica compuesta de un protón ligado a un electrón dentro de la estructura del núcleo atómico. James Chadwick decidió repetir los experimentos de las reacciones de Be con partículas  ${}^4_2\text{He}$ , y mediante un análisis de conservación de energía y momento, encontró que la hipótesis de los rayos  $\gamma$  era inconsistente con los datos conocidos hasta entonces. En su publicación [6] hace alusión a la reacción:



Para ese entonces el defecto de masa de  ${}^{13}_6\text{C}$  se conocía con bastante precisión y la energía de la  $\gamma$  emitida no podía ser más de  $14 \times 10^6$  volts. Tal energía no podía dar lugar a esa reacción, por lo que James propuso que la radiación emitida consistía de una partícula de masa 1 y carga 0, los neutrones:



Así, en 1932 James Chadwick descubrió el neutrón, una partícula que forma parte del núcleo atómico, que carece de carga y tiene una masa muy similar a la del protón.

## 2.3 PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

### 2.3.1 Surgimiento de la protección radiológica

Después del descubrimiento de las radiaciones ionizantes, comenzaron a surgir diversas aplicaciones dentro de la medicina e industria como las radiografías industriales o la esterilización de alimentos. Sin embargo, pronto se documentaron quemaduras y cánceres entre los usuarios de estas aplicaciones. Estos hallazgos evidenciaron la importancia de desarrollar medidas de protección contra este nuevo tipo de tecnologías.

Tiempo después distintos países comenzaron a desarrollar sus propios reglamentos, pero no fue hasta 1925 que el Congreso Internacional de Radiología (ICR) en Londres, consideró normalizar los estándares de protección de forma internacional. Su principal interés era tener una forma de cuantificar las mediciones de radiaciones ionizantes por lo cual se creó el organismo encargado de dicha tarea, la Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (ICRU) [7].

En 1928, en Estocolmo se fundó el Comité Internacional contra los Rayos X y el Radio (IXRPC), que en la actualidad es conocido como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) [7].

Al final de la Segunda Guerra Mundial, en 1951 la comisión estableció el primer límite de dosis de aproximadamente 150 mSv/año para el personal ocupacional. Este límite ha sido reducido gradualmente, hasta 1990 con su última actualización, en el cual se fijó el límite anual de 20 mSv promediados en cinco años [7].

### 2.3.2 Primeras recomendaciones de PR

Solo un año después del descubrimiento de los Rx, aparecieron las primeras recomendaciones para la protección contra la radiación de Rx, propuestas por Wolfram Fuchs:

- Hacer la exposición lo más corta posible.
- No estar a menos de 30 cm del tubo de rayos X.
- Cubrir la piel con vaselina y utilizar una capa extra de esta en las áreas más expuestas.

Wolfram Fuchs había establecido los 3 principios de la protección radiológica con sus recomendaciones, tiempo de exposición, distancia con respecto a la fuente y blindaje contra la radiación.

### 2.3.3 Aspectos biológicos de la protección radiológica

Los efectos de la RI sobre el cuerpo humano pueden clasificarse de dos formas:

**Efectos deterministas:** Se trata de reacciones nocivas sobre el tejido, sus efectos son atribuidos a la muerte de un gran número de células debido a altas dosis de radiación.

**Efectos estocásticos:** Corresponden a aquellos que pueden o no aparecer de forma aleatoria y están relacionados con las modificaciones en la molécula del ADN, además de que no existe una dosis umbral establecida y la probabilidad de que aparezcan aumenta con la dosis recibida.

Para los efectos deterministas la existencia de una dosis umbral se debe a que el daño por radiación sobre un conjunto de células que componen un tejido, no es visible clínicamente hasta que dicho umbral es alcanzado, y si la dosis aumenta las lesiones empeoran y su recuperación se vuelve más tardía o nula. Este tipo de lesiones pueden presentarse como inflamación del tejido o quemaduras y desprendimiento del mismo, dependiendo de la gravedad de la lesión.

En el caso de los efectos estocásticos, los daños por radiación están relacionados con la aparición de cáncer por daños al ADN en células y mutaciones en genes y cromosomas. La ICRP menciona que aunque existen excepciones, a dosis debajo de los 100 mSv es viable suponer que la aparición de cáncer crecerá de forma directamente proporcional al aumento de dosis equivalente en órganos y tejidos [2].

Más allá del cáncer, también existe la inducción de otras enfermedades debido a la radiación. En un seguimiento realizado desde 1968 de las muertes de los supervivientes de las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki, se ha encontrado que existe una relación con las dosis de radiación y las enfermedades del corazón, las enfermedades respiratorias ó los desórdenes digestivos [8].

### 2.3.4 Magnitudes usadas en la protección radiológica

Para cuantificar el efecto de las radiaciones ionizantes sobre los humanos, se han establecido distintas magnitudes dosimétricas basadas en la cantidad de energía depositada por unidad de masa. Estas magnitudes dosimétricas tienen una jerarquización definida de la siguiente manera:

Dosis absorbida: Cantidad de energía depositada por la radiación sobre un material o tejido biológico.

Dosis equivalente: Se trata de la dosis absorbida corregida por un factor de ponderación para determinar el daño producido por distintos tipos de radiación.

Dosis efectiva: Es la dosis equivalente corregida por la susceptibilidad que tienen distintos órganos y tejidos a los efectos biológicos de la radiación.

Dado que no es posible medir directamente la dosis equivalente y la dosis efectiva, es necesario introducir las magnitudes operacionales para la evaluación de las dosis en órganos y tejidos. Las magnitudes operacionales brindan una estimación del valor de las dosis de los individuos frente a una exposición o exposición potencial en la mayoría de los casos de irradiación.

Para estimar la dosis que va a recibir un individuo en un lugar específico se utiliza la dosis equivalente ambiental  $H^*(10)$ . Este es medido en un punto del área a 10 mm de profundidad de un detector esférico que simula tejido blando.

Para estimar la dosis individual se utiliza la dosis equivalente personal  $H_p(d)$ . Esta magnitud representa la dosis absorbida a una profundidad  $d$  debajo de un punto de la superficie del cuerpo humano en tejido blando, simulando la absorción. Para la dosis efectiva se toma en consideración  $H_p(10)$  con una profundidad  $d = 10$  mm y con un punto sobre la superficie del cuerpo en el que los dosímetros individuales son usados habitualmente.

Los valores de estas magnitudes se consideran suficientemente precisos para la evaluación de la dosis efectiva cuando los valores se encuentran por debajo de los límites de protección de dosis. En este sentido, si los dosímetros personales son usados en una parte del cuerpo que represente la exposición a la cual se está expuesto de manera uniforme y a dosis bajas, el valor de  $H_p(10)$  representa una estimación de la dosis efectiva dentro de la precisión que se busca para los fines de protección radiológica.

#### 2.3.5 *Sistemas de limitación de dosis para PR*

Para tener un seguimiento de las exposiciones a las que se encuentra la población general, provenientes de fuentes naturales y artificiales, resulta conveniente ver las exposiciones como una red de eventos y situaciones.

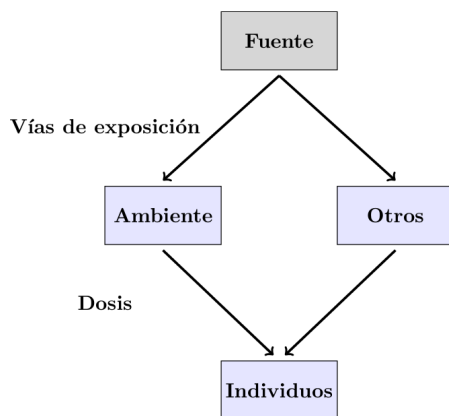


Figura 3: Red de eventos y situaciones para representar la exposición de la población a las fuentes radiactivas.

La Figura 3 muestra el comienzo de la red en la fuente, la radiación viaja a través de las vías de exposición como el ambiente u otras vías, para finalmente llegar a los individuos induciendo una dosis sobre ellos.

Las distintas partes de la red pueden tratarse de forma separada, de tal manera que en una situación determinada es posible actuar directamente sobre las partes que influyen más en una exposición.

Para la protección radiológica se pueden ubicar distintos puntos en la red sobre los cuales se pueden tomar medidas, como la fuente o las vías de exposición, también es posible trasladar a los individuos de ubicación o modificar sus características. Generalmente se escoge la vía ambiental de forma que en ella se encuentre el vínculo entre la fuente y la dosis a la que los individuos están expuestos.

La ICRP clasifica los escenarios de exposición en tres, considerando todas las circunstancias posibles [2].

**Situaciones de exposición planificada:** Se trata de escenarios donde se introducen y operan fuentes de manera intencional. En estos escenarios se tienen exposiciones normales que habrán de ocurrir y exposiciones potenciales que no se sabe con anticipación que ocurrirán.

**Situaciones de exposición de emergencia:** Son escenarios inesperados que pueden ocurrir durante una exposición planificada y que requieren de medidas urgentes para reducir y evitar riesgos.

**Situaciones de exposición existente:** Son escenarios donde la exposición ya existe y se deben tomar decisiones sobre su control en ese mismo momento.

También se consideran tres tipos de exposiciones:

Exposición ocupacional: Se considera como toda aquella exposición a la que los trabajadores están expuestos como resultado de sus actividades laborales.

Exposición médica de pacientes: Son todos los procedimientos, intervenciones, diagnósticos y terapias con uso de radiaciones a las que los pacientes están expuestos. Las exposiciones son intencionales y siempre son en beneficio del paciente.

Exposición del público: Son todas las exposiciones que no son exposiciones ocupacionales ni exposiciones médicas de pacientes. Las fuentes de exposición de mayor contribución para el público son las fuentes naturales, pero también existen exposiciones del público a fuentes artificiales.

### 2.3.6 *Protección radiológica de neutrones*

La protección radiológica frente a neutrones sigue las mismas recomendaciones que para otro tipo de radiaciones. Los neutrones pueden clasificarse de acuerdo a su energía como; neutrones térmicos con una energía típica de 0.025 eV, neutrones rápidos con una energía típica de 0.5-10 MeV y neutrones de alta energía, con energías que superan los 20 MeV [9].

Una de las medidas de protección radiológica de mayor importancia es el blindaje de las fuentes radiactivas. El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) menciona en [10] que el concreto (por su alto contenido en agua) es el material constructivo más adecuado para el blindaje de neutrones. Cualquier material rico en hidrógeno es ideal para la moderación de los neutrones.

También se emplean materiales absorbentes de neutrones térmicos como boro o cadmio, y debido a la emisión de rayos gamma tras su captura, se añaden materiales densos como el plomo en el blindaje.

Finalmente, para un blindaje completo se combinan capas: hierro en el exterior para reducir la energía de los neutrones, polietileno para moderarlos, boro para absorberlos y plomo para atenuar los rayos gamma.

## 2.4 METROLOGÍA DE RADIACIONES IONIZANTES

### 2.4.1 *Magnitudes y unidades*

Las magnitudes son útiles para describir fenómenos físicos de forma cuantitativa. El valor de las magnitudes físicas se expresa como el

producto de un número con su unidad, mientras que la unidad es usada como la referencia de la magnitud física correspondiente.

En el Sistema Internacional de Unidades, las magnitudes fundamentales son las mostradas en la Tabla 1. Todas las magnitudes derivadas pueden ser expresadas en términos de las magnitudes fundamentales, que están dadas en términos de las siete constantes universales [11]:

- La frecuencia de transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio-133  $\Delta\nu_{Cs} = 9192631770$  Hz.
- La velocidad de la luz en el vacío  $c = 299792458$  m/s.
- La constante de Planck  $h = 6.62607015 \times 10^{-34}$  J·s.
- La carga elemental  $e = 1,602176634 \times 10^{-19}$  C.
- La constante de Boltzmann  $k = 1,380649 \times 10^{-23}$  J/K.
- La constante de Avogadro  $N_A = 6,02214076 \times 10^{23}$  mol<sup>-1</sup>.
- La eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  Hz  $K_{cd} = 683$  lm/W.

Tabla 1: Magnitudes fundamentales y unidades del SI.

Magnitudes fundamentales	Unidades	Constantes universales que definen la unidad
Distancia	Metro [m]	$c, \Delta\nu_{Cs}$
Masa	Kilogramo [kg]	$h, c, \Delta\nu_{Cs}$
Tiempo	Segundo [s]	$\Delta\nu_{Cs}$
Corriente	Ampere [A]	$e, \Delta\nu_{Cs}$
Temperatura	Kelvin [K]	$k, h, c, \Delta\nu_{Cs}$
Cant. sustancia	Moles [mol]	$N_A$
Luminosidad	Candela [cd]	$I_c, h, c, \Delta\nu_{Cs}$

#### 2.4.2 Magnitudes radiométricas

Para conocer en profundidad las características de un campo de radiaciones en un punto de interés, es necesario caracterizar las magnitudes radiométricas con las que se está trabajando.

##### *Intensidad de emisión*

La intensidad de emisión  $N$ , es el número de partículas que es emitida desde o es recibida por una fuente.

*Fluencia*

La fluencia  $\Phi$ , es la razón de cambio de la cantidad de partículas  $dN$  que atraviesan una esfera de área transversal  $da$ .

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (1)$$

*Emisión de neutrones por una fuente*

La emisión de neutrones por una fuente  $B$ , es la razón de cambio de la cantidad de neutrones  $dN$  que son emitidos en un intervalo de tiempo  $dt$ , en todas direcciones.

$$B = \frac{dN}{dt} \quad (2)$$

*Distribución angular de la emisión de neutrones*

La distribución angular de la emisión de neutrones  $B_{\Omega}$ , es la razón de cambio de emisión de neutrones  $dB$  con respecto a un ángulo sólido  $d\Omega$ .

$$B_{\Omega} = \frac{dB}{d\Omega} \quad (3)$$

*Tasa de fluencia de campo libre*

La tasa de fluencia de campo libre  $\varphi$ , esta definida como la razón de la distribución angular de la emisión de neutrones  $B_{\Omega}$  sobre la distancia  $l$  elevada al cuadrado.

$$\varphi = \frac{B_{\Omega}}{l^2} \quad (4)$$

## MARCO TEÓRICO

---

### 3.1 METROLOGÍA DE NEUTRONES

#### 3.1.1 *Principios fundamentales*

Debido a la ausencia de carga, los métodos para detectar y medir neutrones se basan en dos principios fundamentales:

- 1-. La activación, que ocurre al momento de bombardear con neutrones a una sustancia produciendo radiactividad artificial. Cuando los elementos estables de una sustancia absorben neutrones producen isótopos radiactivos, la actividad inducida está relacionada con el número de neutrones incidentes. Por otra parte, la radiactividad está relacionada con la energía de los neutrones incidentes, permitiendo caracterizar el espectro neutrónico a partir de la activación de los materiales irradiados.
- 2-. Los neutrones desplazan a los protones después de colisionar, lo que permite determinar el flujo neutrónico a partir de los protones de retroceso. Asimismo, debido a que ambos poseen masas muy similares, los neutrones transfieren casi toda su energía a los protones, lo que permite medir la energía de los neutrones incidentes.

Los detectores de neutrones se basan en la detección de las partículas cargadas producidas por estos después de interactuar con la materia.

Existen detectores basados en los fenómenos de ionización producidos por las partículas cargadas. Cuando se produce un pulso eléctrico debido a la ionización, éste es registrado por medio de instrumentos electrónicos que miden la variación de voltaje. Después del conteo y análisis de cada pulso, es posible determinar la cantidad de radiación ionizante y, dependiendo del tipo de detector, también se puede determinar la energía de la misma. Algunos detectores que funcionan con base en este principio son los detectores gaseosos, como los detectores proporcionales y las cámaras de ionización.

También existen detectores basados en los destellos producidos en ciertas sustancias después de ser excitadas por radiaciones ionizantes. Estos destellos también son cuantificables con uso de dispositivos

electrónicos. Este principio es el utilizado por los detectores de centelleo.

### 3.1.2 Campos de referencia

Los campos de referencia están asociados a fuentes cuyas características son bien conocidas como su energía, intensidad y dirección. Estos campos han sido caracterizados y certificados previamente por instituciones de metrología o centros de investigación nuclear.

Los campos de referencia sirven para calibrar instrumentos de detección de neutrones, así como para realizar estudios sobre dosimetría, blindajes, aplicaciones médicas o industriales, etcétera.

### 3.1.3 Fuentes de neutrones

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ya ha definido las fuentes de referencia o patrones secundarios que pueden utilizarse para la calibración de los dispositivos encargados de medir neutrones [12]. Estos son el  $^{252}\text{Cf}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  moderado con  $\text{D}_2\text{O}$  y  $^{241}\text{Am-Be}$ .

Las fuentes deben ser trazables a un patrón primario o patrón nacional, establecido por un laboratorio de referencia.

Además, deben contar con un encapsulamiento esférico o cilíndrico para disminuir los efectos por anisotropía en la intensidad angular.

La fuente de neutrones de  $^{241}\text{Am-Be}$  produce neutrones mediante el decaimiento radiactivo del isótopo de americio en partículas  $\alpha$ . Estas partículas  $\alpha$  son capturadas por núcleos de berilio, el cual libera un neutrón por medio de la reacción:



### 3.1.4 Tasa de fluencia producida por una fuente de neutrones

La tasa de fluencia de neutrones producida por una fuente está directamente relacionada con su intensidad de emisión y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y el punto de interés en el espacio. Debido a su construcción, las fuentes de neutrones no tienen una emisión isotrópica. Para fuentes cilíndricas, la intensidad angular no varía mucho en el ángulo azimutal, por otra parte, alrededor de su ángulo polar la

emisión tiene variaciones relevantes en el campo de la metrología. De lo anterior, se ha encontrado que la dirección preferencial para mediciones con fuentes cilíndricas de neutrones, es  $90^\circ$ . Esta es la dirección que debe utilizarse durante las mediciones [12].

### 3.1.5 Corrección por decaimiento

El decaimiento radiactivo es un proceso estocástico mediante el cual un núcleo inestable decae en otro a través de la emisión de partículas o radiación electromagnética. Se produce en núcleos con  $z > 82$  y para algunos isótopos inestables con  $z < 83$ . La tasa de decaimiento es proporcional (por medio de una constante  $\lambda$ ) al número de núcleos originales  $N$  (sin decaer) en una muestra, se tiene:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (6)$$

Integrando a ambos lados de (6), con  $N_0$  en el tiempo  $t = 0$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \left( \frac{N}{N_0} \right) = -\lambda t$$

Así, el número total de núcleos radiactivos que quedan después del tiempo  $t$  será:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Si en la ecuación (7) hacemos  $t = T_{1/2}$ , entonces  $N = N_0/2$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$-\ln(2) = -\lambda T_{1/2}$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \quad (8)$$

De esta forma, conociendo la vida media  $T_{1/2}$ , podemos conocer la constante de decaimiento  $\lambda$  y sustituirla en (7) para obtener la cantidad de núcleos  $N$  que hay al tiempo  $t$ . La vida media  $T_{1/2}$  de una sustancia se define como el tiempo que tarda en reducirse a la mitad el número de núcleos de una muestra radiactiva.

### 3.1.6 *Sala de calibración*

En el diseño de una sala de calibración para instrumentos en campos de neutrones, deben tenerse en cuenta dos aspectos fundamentales: el primero enfocado en la protección radiológica, con las dimensiones de la sala lo más grandes posible junto con paredes gruesas hechas de concreto como blindaje, el segundo enfocado en mantener las condiciones de referencia establecidos. Los valores de las correcciones por dispersión debida a la sala y al aire junto con su incertidumbre dependen ampliamente de las dimensiones de la sala de calibración y no deben exceder el 40 % de la lectura total del detector [4].

### 3.1.7 *Características importantes*

Debido a que los neutrones no poseen carga eléctrica, su interacción con la materia es únicamente a través de colisiones elásticas e inelásticas, no existen interacciones de Coulomb. Las colisiones se llevan a cabo cuando ocurre un intercambio de momento y energía entre dos cuerpos, los neutrones emitidos por una fuente tienen un momento y una energía asociados, cuando colisionan con la materia estas características cambian, provocando una dispersión de los neutrones. La Figura 4 ilustra la forma en la que los neutrones se dispersan en este sistema. Para caracterizar esta dispersión, se deben tener en consideración los siguientes casos de fuentes de dispersión.

#### *Dispersión*

Los neutrones son dispersados por las paredes, techo y suelo de la sala de neutrones, su contribución en la lectura del detector se puede determinar por métodos experimentales. Esta contribución puede ser la más significativa de todas y depende del diseño de la sala y de sus dimensiones. Las estructuras encargadas de mantener en posición los instrumentos también contribuyen a la dispersión, por ello deben ser lo más ligeras posible y no deben estar hechas de materiales con alto contenido de hidrógeno como el polietileno.

*Air-outscatter*

Los neutrones emitidos por la fuente, son dispersados hacia afuera del ángulo sólido proyectado por la fuente sobre el detector, debido a la atenuación producida en el aire. Este efecto aumenta de forma lineal con la distancia de separación que hay entre la fuente y el detector.

*Air-inscatter*

Los neutrones que se encuentran fuera del camino directo entre la fuente y el detector son dispersados por el aire, y puede que la dirección que tomen después de ser dispersados sea hacia la posición del detector. De la misma forma que el *air-outscatter*, la dispersión debida a este caso aumenta de forma lineal con la distancia de separación entre la fuente y el detector.

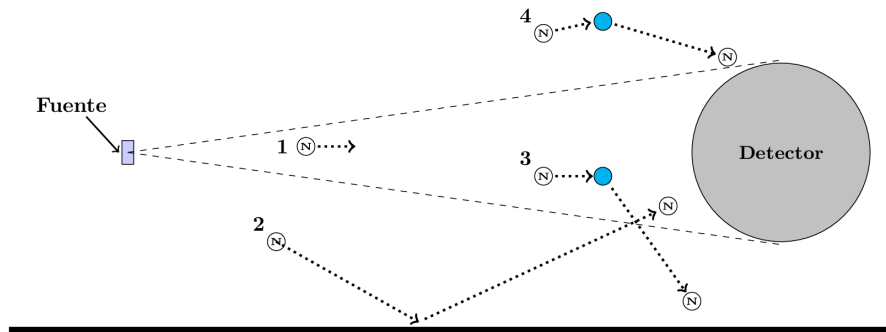


Figura 4: Se representa el comportamiento de los neutrones que salen de la fuente junto con una línea a guiones que representa el ángulo sólido que proyecta la fuente sobre el detector. 1-. Los neutrones siguen la trayectoria con la que salieron de la fuente, 2-. Dispersión por la sala o estructuras de soporte, 3-. *Air-outscatter* y 4-. *Air-inscatter*.

## 3.1.8 Principios para la calibración con fuentes de neutrones

La respuesta a fluencia de campo libre de un instrumento está dada por:

$$R_{\Phi} = \frac{M_c}{\varphi} \quad (9)$$

donde  $M_c$  es la lectura medida corregida para todos los efectos exteriores (factores de corrección) y  $\varphi$  es la tasa de fluencia a la cual el instrumento ha sido expuesto:

$$\varphi = \frac{B_{\Omega}}{l^2} \quad (10)$$

donde:

$l$  Distancia centro-centro entre la fuente y el detector.

$B_{\Omega}$  Intensidad angular de la fuente.

y a su vez:

$$B_{\Omega} = \frac{B \cdot F_1(\theta)}{4\pi} \quad (11)$$

donde:

$B$  Intensidad de la fuente de neutrones (emisión total en  $4\pi$ )

$F_1(\theta)$  Factor de corrección por anisotropía.

Por otro lado, también se tiene la constante característica del arreglo fuente-detector del experimento, completamente corregida para los efectos de dispersión, se tiene:

$$k = M_c \cdot l^2 \quad (12)$$

De (9) y (10) obtenemos:

$$k = R_{\Phi} \cdot \varphi \cdot l^2$$

$$k = R_{\Phi} \cdot B_{\Omega} \quad (13)$$

La constante  $k$  es específica para cada combinación fuente-detector, ya que depende de  $B_{\Omega}$  y de  $R_{\Phi}$ .

### 3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA DISPERSIÓN

#### 3.2.1 Método de conos de sombra

Este método permite medir la contribución por dispersión de forma directa. Se posiciona un cono truncado en el camino directo entre la fuente y el detector, de tal manera que todos los neutrones directos provenientes de la fuente sean sombreados por el cono sin llegar a alcanzar el detector. Así, la lectura del detector corresponde únicamente a la contribución por dispersión del campo de neutrones.

Para comparar la contribución por dispersión de forma porcentual, es necesario determinar la contribución por neutrones directos del campo total. Se deben realizar dos mediciones para cada distancia, una con cono  $M_S(l)$  que mide los neutrones dispersados, y otra sin cono  $M_T(l)$  que mide la contribución total del campo (neutrones dispersados más neutrones directos). La contribución por neutrones directos se puede obtener por la resta de las mediciones sin cono  $M_T(l)$  a las mediciones con cono  $M_S(l)$ , mediante la siguiente expresión:

$$[M_T(l) - M_S(l)] F_A(l) = \frac{k}{l^2} \quad (14)$$

donde  $F_A(l)$  es el factor de atenuación del aire (*air-outscatter*) que fue mencionado en la sección 3.1.7.

De acuerdo a [4], se deben tener las siguientes consideraciones para el arreglo experimental:

- El área sombreada por el cono  $A_S$ , debe ser mayor por un factor de dos comparada con el área que proyecta el detector  $A_D$  sobre la fuente, es decir  $A_S > 2A_D$ . Esto garantiza que los neutrones directos provenientes de la fuente sean sombreados.
- La distancia entre la parte posterior del cono y el centro del detector, debe ser como mínimo igual a la longitud del cono que se este utilizando para realizar las mediciones, de forma que los neutrones dispersados no sean sombreados por el cono.

Después de realizar varias medidas de  $M_S(l)$  y  $M_T(l)$  a distintas distancias, se puede determinar la respuesta a fluencia  $R_\Phi$  del instrumento, así como la contribución por dispersión a la lectura del mismo.

*Factor de corrección  $F_A(l)$*

El factor de corrección dado por la ecuación (15) toma en cuenta la dispersión de neutrones por el aire que se encuentra en el camino directo entre la fuente y el detector, haciendo que la lectura de este se vea reducida por todos los neutrones que el aire dispersa y no llegan hasta él. La Figura 5 representa este fenómeno.

$$F_A(l, E) = \exp[l\Sigma(E)] \quad (15)$$

$$\Sigma(E) = [3.88\sigma_N(E) + 1.04\sigma_O(E)]10^{-5} \quad (16)$$

siendo  $l$  la distancia y  $\Sigma(E) = 833 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$  la sección eficaz macroscópica para el aire.

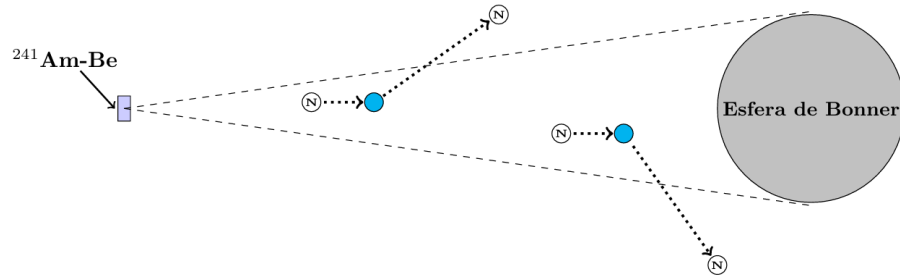


Figura 5: Representación gráfica del fenómeno, los neutrones provenientes de la fuente colisionan con las moléculas de aire y se ven dispersados fuera de la trayectoria entre la fuente y el detector.

### 3.2.2 Método semi-empírico

El método semi-empírico determina la contribución de neutrones dispersados por la sala con ayuda de una ecuación, que está basada en la suposición de que la contribución por dispersión en la lectura del detector, puede ser deducida a partir de la ley del inverso cuadrado.

La lectura del detector  $M_T(l)$ , correspondiente a la contribución total del campo (neutrones provenientes de la fuente más neutrones dispersados), está corregida por un factor de corrección geométrico  $F_1(l)$  y un término que toma en cuenta la dispersión total del aire (*air-scatter*) dado por  $(1 + Al)$ . Así, la lectura corregida  $M_T(l)$ , se relaciona con la respuesta a fluencia y con la contribución por dispersión a través de la siguiente expresión:

$$\frac{M_T(l)}{\phi F_1(l)(1 + Al)} = R_\Phi (1 + Sl^2) \quad (17)$$

La cantidad  $S$  es la contribución fraccional por dispersión debida a la sala, a la distancia de medición unitaria.

Para determinar la contribución por dispersión se deben tomar varias medidas del campo total de neutrones  $M_T(l)$ , a distintas distancias de separación fuente-detector  $l$ , posteriormente se deben sustituir valores del lado izquierdo de la ecuación (17) y graficarse contra  $l^2$ . La gráfica tendrá un comportamiento lineal, y por medio de un ajuste lineal ponderado por mínimos cuadrados, es posible determinar la respuesta a fluencia  $R_\Phi$  que es correspondiente a la ordenada al origen del ajuste lineal, mientras que la pendiente del ajuste dará la contribución fraccional por dispersión de la sala  $S$ .

*Corrección geométrica*

Los datos obtenidos de cada lectura deben ser corregidos por los efectos de tamaño finito de la fuente o el detector, la Figura 6 ilustra este fenómeno. Para una fuente puntual irradiando a un detector esférico,  $F_1(l)$  puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$F_1(l) = 1 + \delta \left\{ \frac{2l^2}{r_D^2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r_D^2}{l^2} \right)^{1/2} \right] - 1 \right\} \quad (18)$$

donde:

$R_D$  Radio del detector.

$\delta$  Parámetro de eficacia de neutrones.

Esta expresión indica que la respuesta del detector incrementa por un factor de  $(1 + \delta G)$  arriba del esperado de acuerdo a la ley del inverso cuadrado. El término  $G$  representa el número de neutrones que entran al volumen del detector y el parámetro  $\delta$  toma en cuenta la probabilidad de que estos neutrones generen una respuesta en el detector [13].

Para valores de  $l/r_D > 2$ , la ecuación (18) se reduce a:

$$F_1(l) = 1 + \delta \left( \frac{r_D}{2l} \right)^2 \quad (19)$$

$\delta$  depende ligeramente del radio del detector, de acuerdo a [4], el valor recomendado para todos los casos es  $\delta = 0.5 \pm 0.1$

Detector a distancias pequeñas      Detector a distancias grandes

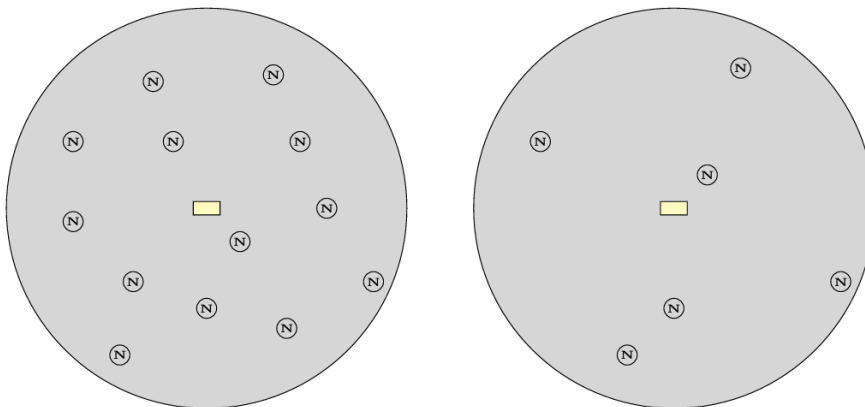


Figura 6: Comparación representativa de la cantidad de neutrones dentro del volumen del detector a distancias pequeñas y a distancias grandes tales que  $l^2 \gg (r_f + r_D)^2$ , y  $F_1(l) \approx 1$

### Corrección por dispersión total del aire.

Ya que solo se busca determinar la contribución por dispersión de la sala, es necesario corregir la lectura  $M_T(l)$  por los efectos de dispersión del aire. A diferencia del método de conos de sombra, donde únicamente se considera el aire que está en el camino directo entre la fuente y el detector (correspondiente a los neutrones directos), en este método es necesario considerar los efectos del volumen total de aire dentro de la sala (correspondiente a la contribución total del campo de neutrones), es decir el efecto *inscatter* y *outscatter* discutido en la sección 3.1.7.

La corrección está dada por el término  $(1 + A)$  donde  $A$  es el efecto neto de la dispersión del aire (*inscatter* menos *outscatter*), la Figura 7 ilustra el fenómeno. Los valores de  $A$  están dados en [14].

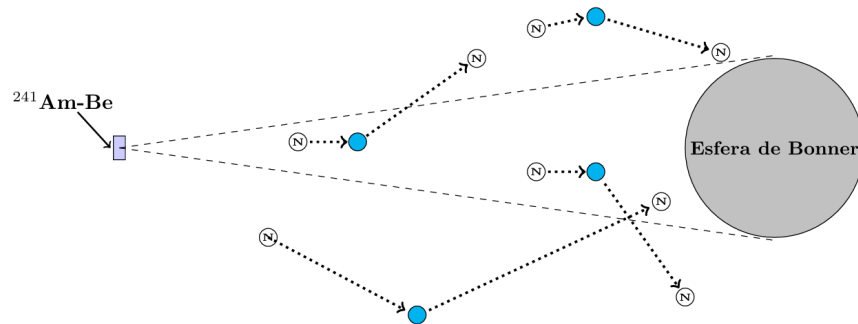


Figura 7: Ilustración del fenómeno, la contribución *inscatter* aumenta la lectura del detector, mientras que la contribución *outscatter* la disminuye. El efecto neto  $A$  toma en cuenta los neutrones que no llegan al detector debido a la dispersión del aire por medio de la resta *inscatter* menos *outscatter*.

### 3.2.3 Corrección por fondo

Los detectores de neutrones no son selectivos, además de detectar los neutrones provenientes de una fuente también pueden detectar neutrones provenientes del ambiente. Esto provocaría un sesgo en la lectura del detector.

Para evitar ese sesgo se debe realizar una corrección por fondo en las lecturas. El fondo constituye cualquier contribución ajena a la fuente o al fenómeno que se desea medir. El fondo puede estar constituido por radiación ambiental (neutrones cósmicos), radiactividad natural del entorno o ruido electrónico.

Para corregir una lectura por fondo podemos utilizar la siguiente expresión:

$$N = N_T - N_F \quad (20)$$

donde:

- N Cuentas reales
- $N_T$  Cuentas totales
- $N_F$  Cuentas del fondo

### 3.3 VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS

Es posible comparar ambos métodos (conos de sombra y semi-empírico) por medio de las ecuaciones que los describen. Si reescribimos la ecuación (17) como:

$$\frac{M_T(l)}{F_1(l)(1 + Al)(1 + Sl^2)} = R_\Phi \cdot \varphi \quad (21)$$

podemos decir que el lado izquierdo de (21) corresponde a los neutrones directos (corregidos por  $F_1(l)$  y  $(1 + Al)$ ), ya que la lectura total  $M_T(l)$  está siendo dividida por la contribución por dispersión  $(1 + Sl^2)$ . Esto es igual al producto  $R_\Phi \cdot \varphi$ .

Por otro lado, la ecuación (14) con ayuda de (13) puede escribirse como:

$$[M_T(l) - M_S(l)] F_A(l) = \frac{R_\Phi \cdot B_\Omega}{l^2} \quad (22)$$

donde el lado izquierdo representa los neutrones directos (corregidos por  $F_A(l)$ ). Si ahora sustituimos  $B_\Omega$  utilizando (10), tenemos:

$$[M_T(l) - M_S(l)] F_A(l) = R_\Phi \cdot \varphi \quad (23)$$

Podemos observar que tanto (21) como (23) son equivalentes entre sí por medio de  $R_\Phi \cdot \varphi$ , y los resultados que se obtengan de la contribución por dispersión de la sala a través de cualquiera de los dos métodos, pueden ser validados con el otro.

### 3.4 ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRES DE MEDIDA

#### 3.4.1 Definición de incertidumbre

La incertidumbre de una medida está asociada a la precisión que puede tener el resultado de una medición, en este sentido la incertidumbre es una medida de la dispersión de todos los valores existentes que el mensurando puede tomar, de acuerdo a un modelo que lo describe.

Para obtener el valor de un mensurando se debe realizar una medición que tenga bien definido el modelo que describe a ese mensurando. El mensurando se describe por medio de un método de medida descrito de forma general con operaciones lógicas, y un procedimiento de medida donde se tiene un conjunto de operaciones dadas por el método de medida, que incluye los cálculos necesarios para obtener un resultado [15].

Dentro de la práctica existen distintas fuentes que pueden contribuir a la incertidumbre de una medición, algunas de ellas son:

- Una definición incompleta o incorrecta del mensurando
- Que la muestra del mensurando no sea suficientemente representativa
- Resolución de los instrumentos de medición
- No considerar los efectos ambientales sobre la medición
- Valores del mensurando distintos, obtenidos de observaciones repetidas en condiciones aparentemente idénticas

#### 3.4.2 Modelo de medición

Para la mayor parte de los casos, el mensurando  $y$  depende de  $n$  magnitudes de entrada,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , para poder ser determinado por medio de una función de la forma:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (24)$$

Al mismo tiempo, las magnitudes de entrada de las que depende el mensurando  $y$ , pueden considerarse como mensurandos que dependen de otras magnitudes de entrada. Es importante que la función  $f(x_i)$  sea lo más amplia posible y contenga cada magnitud de entrada y factores de corrección que sean susceptibles a contribuir de forma significativa en la incertidumbre del resultado de una medida.

Si la función  $f(x_i)$  es lo más amplia posible y no representa la magnitud de salida  $y$  con la exactitud esperada, es necesario introducir en  $f(x_i)$  magnitudes de entrada que representen la falta de conocimiento de un fenómeno que afecte los resultados de la medida, y eliminen la falta de representación de la función  $f(x_i)$  [15].

Las magnitudes de entrada de un modelo pueden clasificarse de dos formas:

- Magnitudes donde sus valores e incertidumbres pueden ser determinados directamente en el proceso de su medición. Pueden ser obtenidos a partir de una o varias observaciones, o por decisiones basadas en la experiencia de quien las determina. Estas pueden ser correcciones de las lecturas de los instrumentos o correcciones debido a magnitudes de influencia externa como las condiciones atmosféricas de un experimento.
- Magnitudes donde sus valores e incertidumbres son obtenidos de fuentes externas, como certificados de calibración o valores tomados de alguna publicación.

### 3.4.3 Incertidumbre tipo A

Para obtener la mejor estimación posible de la esperanza matemática  $\mu$  de una variable aleatoria  $q$  que se ha medido  $n$  veces de forma independiente y en las mismas condiciones, se utiliza la media aritmética  $\bar{q}$  definida como:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (25)$$

De esta manera se puede obtener la media aritmética  $\bar{x}_i$  de una magnitud de entrada  $x_i$  obtenida a partir de  $n$  observaciones independientes para determinar el valor de  $y$  en la ecuación (24).

La dispersión en los valores de  $y$  representa la repetibilidad del proceso de medición, este puede depender de distintos factores, como la forma de medir, el método utilizado e incluso de la persona que está midiendo. La forma de representar esta dispersión es a través de la desviación estándar  $\sigma$ , dada por:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (26)$$

#### 3.4.4 Incertidumbre tipo B

Para el caso de magnitudes de entrada  $x_i$  que no son obtenidas a partir de observaciones repetidas, la varianza  $u(x_i)$  asociada, se determina por medio de un criterio basado en toda la información disponible sobre cómo la magnitud  $x_i$  varía, de acuerdo con [16] esta puede ser obtenida o determinada por:

- Certificados de calibración
- Resolución de los instrumentos
- Resultados de mediciones previas
- Experiencia de las personas que estén realizando mediciones
- Incertidumbres asociadas a valores procedentes de libros, artículos o manuales

La evaluación tipo B de la incertidumbre típica está basada en los conocimientos generales y experiencia de quien la determina y no debe considerarse menos precisa que la evaluación tipo A, especialmente en casos donde se tiene un número pequeño de observaciones independientes para determinar la incertidumbre.

#### 3.4.5 Incertidumbre típica combinada

##### *Magnitudes de entrada independientes*

La incertidumbre típica del mensurando  $y$  puede ser obtenida utilizando las incertidumbres típicas de las magnitudes de entrada  $x_i$ . La incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  está definida como la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada  $u_c^2(y)$ , dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (27)$$

donde  $f(x_i)$  es la función que define al mensurando dada por la ecuación (24) y cada  $u(x_i)$  es una incertidumbre típica que fue determinada de acuerdo al tipo A o al tipo B,. De esta manera  $u_c^2(y)$  describe la dispersión de los valores del mensurando  $y$ .

La expresión (27) se obtiene a partir de una desarrollo en series de Taylor de primer orden de la ecuación (24) y recibe el nombre de *Ley de propagación de la incertidumbre* [15].

La ecuación (27) no solo representa la incertidumbre combinada del mensurando  $y$ , sino que también contiene información de cómo la

incertidumbre típica de cada magnitud de entrada  $x_i$  influye sobre la incertidumbre del mensurando  $y$ . Las derivadas parciales  $\partial f(x_i)/\partial x_i$ , o coeficientes de sensibilidad, describen esta contribución sobre el mensurando. De forma que, la variación de  $y$  producida por la incertidumbre típica de  $x_i$  está dada por  $(\partial f(x_i)/\partial x_i)u(x_i)$ , y la incertidumbre combinada  $u_c(y)$  puede definirse como la raíz de la suma de cada uno de los términos que representan la incertidumbre asociada de  $y$  debido a la incertidumbre típica de cada magnitud de entrada  $x_i$ . La ecuación (27) se puede escribir como:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (28)$$

donde:

$$c_i = \partial f(x_i)/\partial x_i, \quad u_i(y) = |c_i| \cdot u(x_i).$$

#### *Magnitudes de entrada dependientes*

La ecuación (24) también puede tener magnitudes de entrada que sean dependientes entre sí, para estos casos las ecuaciones (27) y (28) no son útiles para determinar la incertidumbre combinada del mensurando, ya que estas son válidas únicamente para magnitudes de entrada independientes y no describen la codependencia que puede existir en la incertidumbre de dos o más magnitudes de entrada.

Para considerar la dependencia entre las magnitudes de entrada, la ecuación para la varianza combinada del mensurando es:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \frac{\partial f(x_j)}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (29)$$

donde  $u(x_i, x_j)$  representa la covarianza que existe entre las magnitudes de entrada  $x_i$  y  $x_j$ , la dependencia entre ambas magnitudes viene dada por el coeficiente de correlación:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (30)$$

El coeficiente de correlación toma valores desde  $-1$  a  $1$  y cuando  $r(x_i, x_j) = 0$ , no existe dependencia en las magnitudes de entrada, y de la ecuación (29) se puede recuperar la ecuación (27), para magnitudes de entrada independientes [15].

### 3.4.6 Distribuciones de probabilidad

Cuando se determina el valor de las incertidumbres de las magnitudes de entrada, también es útil conocer la distribución de probabilidad que tienen estos valores. Las distribuciones de probabilidad más comunes según [16], son:

#### *Distribución normal*

Los resultados de las mediciones que han sido obtenidos mediante varias observaciones independientes, generalmente siguen un comportamiento como el de la distribución normal. Para esta distribución la incertidumbre está dada por la ecuación (26).

#### *Distribución rectangular*

La distribución rectangular (también llamada distribución uniforme) tiene un intervalo delimitado por  $a_+$  y  $a_-$ , dentro de estos, los valores de las incertidumbres tienen la misma probabilidad de aparecer y una probabilidad nula de estar fuera. Esta distribución se asocia con frecuencia a la resolución de los instrumentos o a su tolerancia.

El valor esperado de una magnitud de entrada  $x_i$  con una distribución rectangular se define como:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad (31)$$

y su incertidumbre típica:

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad (32)$$

si la diferencia de  $(a_+ - a_-) = 2a$  la ecuación (32) se reduce a:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (33)$$

#### *Distribución triangular*

De forma similar que en la distribución rectangular, se tienen dos intervalos que delimitan la distribución, pero la probabilidad de que los valores del centro aparezcan es más grande y disminuye hacia

los límites de la distribución. En numerosos casos de la física es más conveniente utilizar una distribución triangular a una distribución rectangular.

El valor esperado de una magnitud de entrada  $x_i$  con una distribución triangular delimitada por  $a_+$  y  $a_-$ , es el mismo que el de la distribución rectangular:

$$x_i = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad (34)$$

y su incertidumbre típica:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (35)$$

con  $a = (a_+ - a_-)$

#### *Distribución de Poisson*

Esta distribución describe la ocurrencia de un número de eventos independientes y con tasa promedio constante en un intervalo de tiempo o espacio fijos. El valor esperado de esta distribución se define únicamente como  $x_i = \lambda$  y su incertidumbre típica como la raíz del valor esperado:

$$u(x_i) = \sqrt{\lambda} \quad (36)$$

Esta distribución será de especial importancia durante este trabajo, ya que describe el comportamiento de las lecturas obtenidas por el detector de neutrones.

#### 3.4.7 *Incertidumbre expandida*

En algunos casos es suficiente expresar la incertidumbre de los resultados de una medición como la incertidumbre combinada, sin embargo, a veces es necesario proporcionar un nivel de confianza asociado a esta incertidumbre.

*Es importante notar en la ecuación (36), que a medida que el valor de  $\lambda$  aumenta, el valor de su incertidumbre típica disminuye, mostrando la importancia de tener una muestra amplia del experimento que tenga este comportamiento.*

*Nivel de confianza*

Cuando los valores del mensurando siguen una distribución normal, la incertidumbre del mejor estimado representa un intervalo con una probabilidad  $p$  del 68 %. Si es necesario contar con una probabilidad mas grande, se debe aumentar el tamaño del intervalo por un factor de cobertura  $k$ . Tal que:

$$U = k \cdot u_c \quad (37)$$

La ecuación (37) es llamada incertidumbre expandida. Esta expresión representa un intervalo de los valores que puede tomar el mensurando con respecto al nivel de confianza o probabilidad  $p$ .

*Grados de libertad*

El número de grados de libertad  $\nu$  asociado a la incertidumbre de una magnitud, es una medida de la confianza que se tiene sobre esa incertidumbre. A mayor número de grados de libertad, más confiable será la incertidumbre.

Para las incertidumbres tipo A, el número de grados de libertad  $\nu$  está en función del número de mediciones hechas y de la cantidad de parámetros utilizados para estimar los datos. Por ejemplo, un ajuste lineal determinado a partir de  $M$  puntos con  $m$  parámetros en la ecuación tendrá  $M - m$  grados de libertad.

Para el caso de las incertidumbres tipo B, los grados de libertad se determinan de acuerdo al criterio de quien realiza los cálculos, basándose en toda la información disponible a su alcance. Para este caso, los grados de libertad de la fuente de incertidumbre  $i$  se pueden determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\nu_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (38)$$

El término entre corchetes es la incertidumbre relativa de  $u(x_i)$ , determinada de forma subjetiva. Por ejemplo, si se considera que el valor de  $u(x_i)$  es confiable en un 50 %, la incertidumbre relativa sería  $\Delta u(x_i)/u(x_i) = 0.5$ , esto correspondería a  $\nu_i = 2$  grados de libertad de acuerdo a (38).

Por otro lado, similar a la incertidumbre combinada se tienen los grados de libertad efectivos  $\nu_{eff}$  que consideran los grados

de libertad asociados a las incertidumbres de cada una de las magnitudes de entrada. Se determinan usando la siguiente expresión:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (39)$$

#### *Distribución t de Student*

La distribución t de Student es útil para determinar intervalos de confianza para mensurandos que tienen valores con una distribución normal. Está en términos de los grados de libertad  $\nu$ ; cuando los grados de libertad son pocos, las colas de la distribución se vuelven más pesadas reflejando una incertidumbre mayor sobre la varianza del mensurando y, a medida que  $\nu$  tiende a infinito la distribución t se aproxima a una distribución normal. Su función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(t, \nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi\nu}} \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \left(1 + \frac{t^2}{\nu}\right)^{-(\nu+1)/2} \quad (40)$$

donde  $\Gamma(x)$  corresponde a la función gamma.

A partir de esta distribución se define un factor de cobertura  $t_p(\nu_{eff})$  que es obtenido a partir de la función inversa de la distribución t de Student  $T^{-1}$  y un nivel de confianza p:

$$t_p(\nu_{eff}) = T^{-1}\left(\frac{1+p}{2}, \nu_{eff}\right) \quad (41)$$

Así, la incertidumbre expandida puede escribirse como:

$$U = t_p(\nu_{eff})u_c \quad (42)$$

Los valores de  $t_p(\nu_{eff})$  ya han sido calculados y pueden obtenerse de tablas como la Tabla 2 o a partir de software estadístico.

Tabla 2: Valores de  $t_p(v_{\text{eff}})$  de la distribución t de Student, para distintos niveles de confianza  $p$  [15].

Grados de libertad $\nu$	Probabilidad					
	68.27	90	95	95.45	99	99.73
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077

### 3.4.8 Pasos para la evaluación de la incertidumbre

1. Determinar la formulación matemática que relaciona las magnitudes de entrada  $x_i$  con el mensurando  $y$ , esta debe ser lo más amplia posible, considerando todas las correcciones que puedan influir sobre los valores de la incertidumbre del mensurando.
2. Determinar el valor esperado de cada magnitud de entrada  $x_i$  de forma estadística o por otro de los métodos mencionados anteriormente.
3. Para cada magnitud de entrada del mensurando, evaluar la incertidumbre típica  $u(x_i)$  utilizando la incertidumbre tipo A o tipo B según corresponda para cada magnitud de entrada.
4. Si existe dependencia, determinar la covarianza entre las magnitudes de entrada.
5. Una vez obtenida la información anterior, calcular el resultado del mensurando  $y$  a partir de la función  $f(x_i)$ .
6. Determinar la incertidumbre típica combinada  $u_c(y)$  del resultado de  $y$  utilizando las incertidumbres y covarianzas de las magnitudes de entrada.
7. Si es el caso, dar una incertidumbre expandida, donde se proporcione un intervalo definido por un factor de cobertura, que contenga la mayor parte de la distribución de valores que el mensurando puede tomar. El factor de cobertura  $k$  se deberá escoger de acuerdo al nivel de confianza que el intervalo requiera.
8. Realizar un presupuesto de incertidumbres, donde sea documentado el resultado del mensurando junto con su

incertidumbre combinada o expandida, así como la forma en que los valores del mensurando fueron obtenidos a partir de las magnitudes de entrada.

### 3.5 SIMULACIÓN MONTE CARLO

#### 3.5.1 *Origen del método Monte Carlo*

El método Monte Carlo es una herramienta de análisis numérico que busca el muestreo de los valores de las variables de un problema determinado por medio de números pseudoaleatorios. Los valores de un muestreo son obtenidos a partir de las distribuciones de probabilidad de las variables del problema, su solución se obtiene después de analizar el muestreo por medio de métodos estadísticos.

Antes de ser conocido como método Monte Carlo, el método llevaba el nombre de 'muestreo estadístico' y originalmente se utilizaba para resolver integrales de comportamiento complejo, difíciles de resolver de forma analítica.

Fueron John Von Neumann y Stanislaw Ulam que con el surgimiento de las máquinas mecánicas para cálculos aritméticos, nombraron al muestreo estadístico como método Monte Carlo mientras trabajaban en el proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial.

#### 3.5.2 *Transporte de partículas*

En la física nuclear, el método Monte Carlo es considerado un método experimental ya que la forma en la que las partículas son transportadas es la misma que en la naturaleza.

El transporte de las partículas utiliza la ecuación de transporte de Boltzmann para describir las funciones de distribución del problema. Las funciones de distribución son muestreadas de forma aleatoria con un generador de números pseudoaleatorios y después de un alto número de historias se obtienen valores promedio del transporte de las partículas.

En general, el método Monte Carlo debe ser capaz de seguir la trayectoria de una partícula en un medio, de su interacción con los átomos y la producción de partículas secundarias que componen al medio para obtener resultados eficaces.

### 3.5.3 Metodología

Para obtener resultados de alguna variable física a través de este método, se debe asignar una función de densidad de probabilidad  $p(x)$  que represente el comportamiento de esa variable. A partir de esta función se escoge un conjunto de números  $x_i$  para el muestreo, de forma que  $p(x)dx$  modela la probabilidad de que un número  $x_i$  se encuentre en el intervalo comprendido entre  $x$  y  $x + dx$ . Para ello la función de densidad de probabilidad debe ser positiva  $p(x) \geq 0$ , integrable y normalizable tal que:

$$\int_a^b p(x)dx = 1 \quad (43)$$

donde  $a$  y  $b$  cumplen:  $-\infty < a < b < \infty$

También se puede considerar una función de distribución  $c(x)$ , que considera la suma de todas las probabilidades de cada valor de  $x_i$  perteneciente a la función de densidad de probabilidad  $p(x)$ .

$$c(x) = \int_a^x p(x')dx' \quad (44)$$

De forma que, cuando  $x = b$  la integral es la unidad,  $c(b) = 1$ .

### 3.5.4 Códigos de simulación de transporte de neutrones

Para las simulaciones Monte Carlo enfocadas en el transporte de neutrones existen distintas opciones como MCNP5, Serpent, Geant 4, Penelope, OpenMC, etcétera. Cada programa tiene una forma particular de usarse, pero las características del método para cada uno son las mismas:

- Se deben identificar las variables aleatorias junto con sus funciones de distribución de probabilidad del sistema a simular.
- Generar el muestreo de números aleatorios uniformemente distribuidos.
- Con el muestreo generado, calcular los valores de las variables aleatorias del sistema asociadas a sus respectivas funciones de densidad de probabilidad.
- Con los cálculos obtenidos para cada variable aleatoria, determinar su media y desviación estándar.

Parte II

DISEÑO EXPERIMENTAL



## OBJETIVOS

---

### 4.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la contribución por dispersión al campo de referencia de la sala de neutrones del Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica, en el Departamento de Metrología de Radiaciones Ionizantes del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

#### 4.1.1 *Objetivos particulares*

1. Realizar mediciones con un detector de neutrones con moderador, acoplado a un espectrómetro; utilizando la metodología de conos de sombra y del método semi-empírico.
2. Determinar la contribución por dispersión por los métodos matemáticos apropiados.
3. Determinar la respuesta a fluencia del instrumento, con el formalismo del método de conos de sombra y del método semi-empírico.
4. Determinar la consistencia en los resultados obtenidos por ambos métodos.
5. Implementar simulaciones basadas en el método Monte Carlo para modelar el experimento y contrastar los resultados de las simulaciones con los obtenidos empíricamente.



## MATERIALES Y MÉTODOS

## 5.1 INSTRUMENTOS

## 5.1.1 Sala de neutrones

La sala de neutrones en el LSCD-ININ tiene una geometría octagonal con un apotema de 4 m y está diseñada para que la contribución por dispersión sea la menor posible, para ello cuenta con un piso falso hecho de rejilla metálica. Debajo de este se encuentra un sótano de 3 m de profundidad, el techo tiene una altura de 5.5 m, 4 de sus paredes están hechas de una lámina delgada de acero al carbón y las otras cuatro están hechas de concreto para proteger a todo el Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE) del Centro de Metrología de Radiaciones Ionizantes. La Figura 8 muestra un diagrama de la forma que tiene la sala de neutrones.

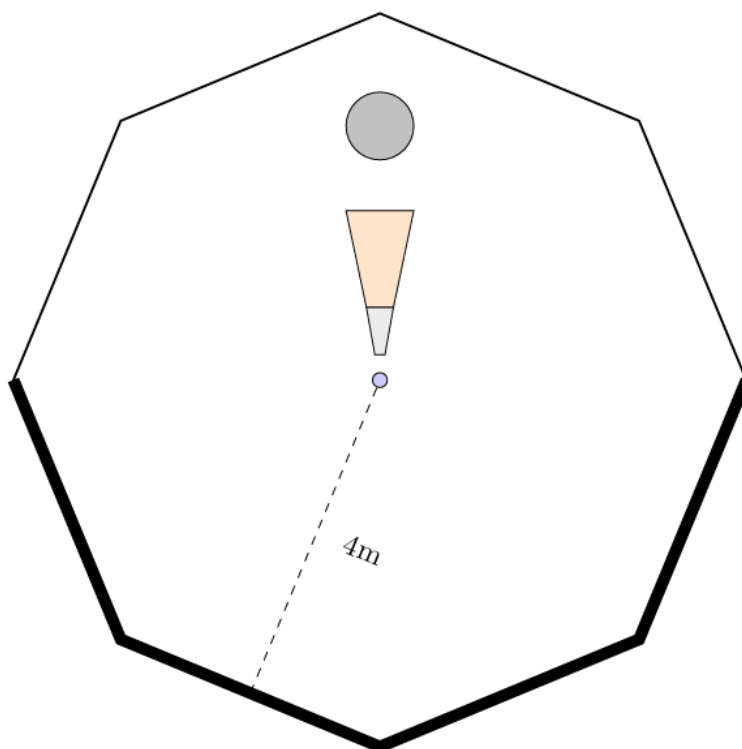


Figura 8: Diagrama de la sala de neutrones del LSCD-ININ, junto con la posición de los instrumentos dentro de la sala.

## 5.1.2 Fuente de neutrones

Se utilizó una fuente de neutrones de  $^{241}\text{Am-Be}$  con las siguientes características:

Material activo: Americio 241 y óxido de berilio

Encapsulado: Acero inoxidable grado 316L/300

Normativas: ISO-29199/ ISO-9987

Actividad  $^{241}\text{Am}$ : 6.5 Ci

Flujo de neutrones:  $(1.00 \pm 0.20) \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1} (4\pi)$

Factor de anisotropía a  $90^\circ$ : 1.0248

Diámetro activo: 13 mm

Longitud activa: 25 mm

La fuente fue calibrada en fluencia en baño de manganeso y cálculo del factor de anisotropía por un laboratorio primario. La Figura 9 muestra un esquema de la fuente con sus dimensiones.

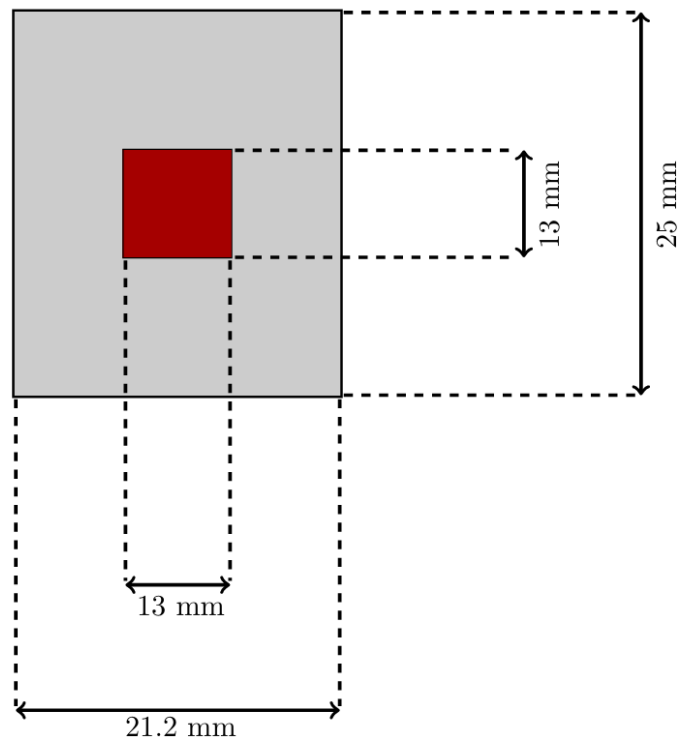


Figura 9: Dibujo de la fuente de neutrones con dimensiones. La sección gris representa las dimensiones del encapsulamiento, mientras que la sección roja representa el volumen activo.

5.1.3 *Detector*

Se utilizó un detector centellador modelo Berthold Wildbad D7547, con una esfera moderadora de polietileno de 25.4 cm (Figura 10). El cristal centellador tiene forma cilíndrica con un diámetro de 0.1 cm y una altura de 0.2 cm; está hecho de yoduro de litio con impurezas de europio  ${}^6\text{Li}(\text{Eu})$ . La Figura 11 muestra la posición del detector dentro de la esfera moderadora. Cuando los neutrones moderados llegan al cristal reaccionan con el  ${}^6\text{Li}$  produciendo partículas alfa y tritio mediante la siguiente reacción:



Figura 10: Detector centellador con tubo foto-multiplicador (izquierda) y esfera de Bonner (derecha).

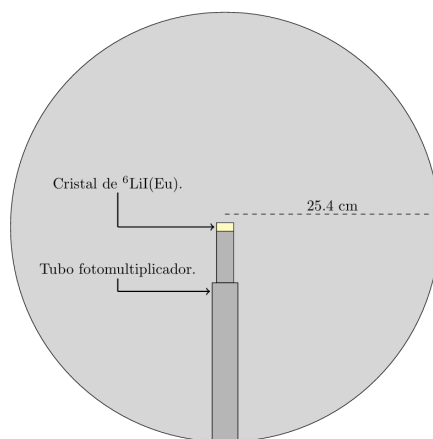


Figura 11: Diagrama del detector, se muestra el cristal centellador ubicado en el centro de la esfera de polietileno, junto con el tubo foto-multiplicador.

Las partículas cargadas ( ${}^4_2\text{He}$  y  ${}^3_1\text{H}$ ) producen excitaciones en los átomos de Eu, que regresan a su estado base emitiendo un fotón que llegará al tubo foto-multiplicador. El fotón produce foto-electrones, que generan pulsos eléctricos a ser procesados al llegar al pre-amplificador. Este se encarga de aumentar suavemente los picos de las energías sin distorsionarlos para después llegar a un amplificador y finalmente a la tarjeta multicanal. La tarjeta multicanal se encarga de clasificar los pulsos por su altura, que es proporcional a la energía transferida por la partícula cargada al Eu.

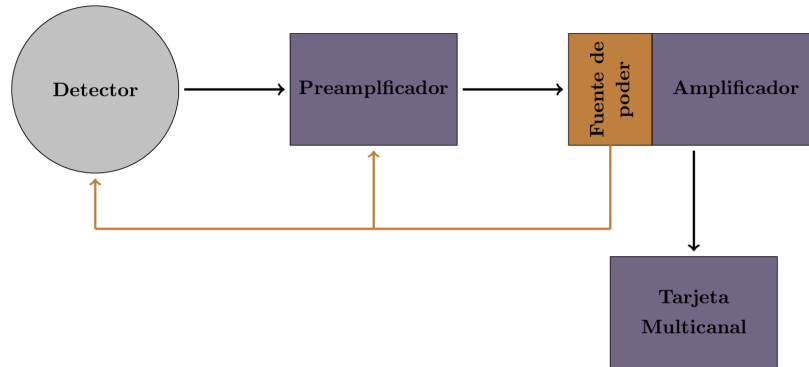


Figura 12: Diagrama del sistema de adquisición de datos.

## 5.2 MÉTODO DE CONOS DE SOMBRA

Para el método de conos de sombra se realizaron seis mediciones con tiempos suficientes para recolectar 10000 cuentas en cada una de ellas, para que la incertidumbre estadística no rebasara el 1%. También, se midió el fondo natural de neutrones y posteriormente se restó a todas las mediciones. Los conteos se realizaron a 110, 120 y 130 cm de distancia entre el centro de la fuente y el centro del detector, con y sin cono de sombra. Se utilizó un cono de 50 cm de longitud compuesto por dos materiales, 16 cm de hierro y 34 cm de parafina con un diámetro frontal de 6.66 cm y un diámetro posterior de 17.26 cm, siguiendo las recomendaciones de [4], la distancia entre la parte posterior del cono y el detector es como mínimo igual a la longitud del cono, es decir 50 cm. Las Figuras 13 y 14 muestran el arreglo experimental del método y un esquema de él, respectivamente.



Figura 13: Arreglo experimental del método de conos de sombra, con la fuente del lado izquierdo, el cono de sombra en el centro y el detector dentro de la esfera de polietileno del lado derecho.

Es importante notar que la composición del cono está diseñada para ensombrecer los neutrones rápidos y los neutrones lentos. La parte del cono compuesta por hierro se encarga de dispersar todos los neutrones directos, mientras que la parte compuesta de parafina se encarga de termalizar los neutrones rápidos que lograron atravesar la porción de hierro, de esta manera es seguro decir que ningún neutrón directo llegará al detector.

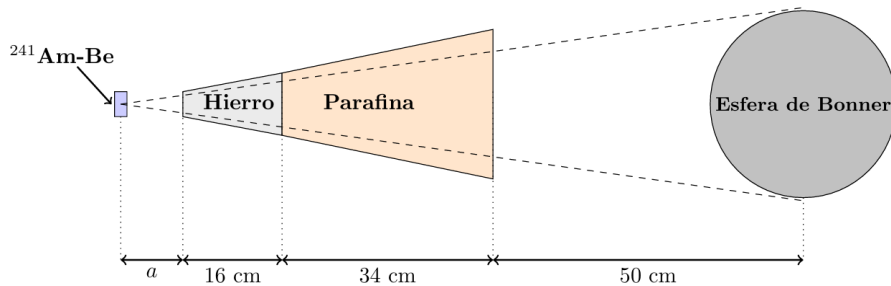


Figura 14: Esquema del arreglo experimental con las dimensiones del cono y las distancias a las que se encuentra cada elemento del experimento entre sí.

#### 5.2.0.1 Correcciones por las condiciones atmosféricas del LSCD.

El factor de corrección por atenuación del aire  $F_A(l)$  toma en cuenta el sesgo en la lectura del detector debido al aire presente en el camino directo entre la fuente y el detector; sin embargo, este factor de corrección está dado para condiciones atmosféricas estándar, para las cuales la densidad del aire es de  $\rho = 1.18 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ . Las condiciones atmosféricas del LSCD al momento de realizar las mediciones corresponden a una temperatura de  $18.9^\circ\text{C}$ , una presión atmosférica de  $710.47 \text{ hPa}$  y una humedad relativa de  $58.5\%$ . Estas

condiciones nos dan una densidad del aire  $\rho' = 8.42 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ . Para considerar esta densidad en el cálculo de atenuación del aire, se modificaron las ecuaciones (15) y (16) con  $\Sigma(E) = [n_N \sigma_N(E) + n_O \sigma_O(E)] \times 10^{-5}$  con  $\sigma_N(E)$  y  $\sigma_O(E)$  como las secciones eficaces del nitrógeno y el oxígeno, y su densidad en número de núcleos por  $\text{cm}^3$   $n_N$  y  $n_O$ , definidos por la siguiente expresión:

$$n_x = \frac{N_A w_x \rho}{m} \quad (46)$$

donde:

- $N_A$  Número de Avogadro.
- $w_x$  Fracción de peso del elemento  $x$ .
- $\rho$  Densidad del aire.
- $m$  Peso atómico del aire.

Así, el factor de corrección por atenuación del aire a condiciones atmosféricas estándar toma la siguiente forma, utilizando (46) en (15)

$$\begin{aligned} F_A(l) &= \exp \{ [n_N \sigma_N(E) + n_O \sigma_O(E)] \times 10^{-5} \cdot l \} \\ F_A(l) &= \exp \left\{ \left[ \frac{N_A w_N \rho}{m} \sigma_N(E) + \frac{N_A w_O \rho}{m} \sigma_O(E) \right] \times 10^{-5} \cdot l \right\} \\ F_A(l) &= \exp \left\{ \frac{N_A \rho l}{m} [w_N \sigma_N(E) + w_O \sigma_O(E)] \times 10^{-5} \right\} \end{aligned} \quad (47)$$

$$\frac{\ln F_A(l)}{\rho} = \left\{ \frac{N_A l}{m} [w_N \sigma_N(E) + w_O \sigma_O(E)] \times 10^{-5} \right\} \quad (48)$$

si sustituimos por la densidad del aire  $\rho'$  que se encuentra en las instalaciones del LSCD en la ecuación (47), tenemos:

$$F'_A(l) = \exp \left\{ \frac{N_A \rho' l}{m} [w_N \sigma_N(E) + w_O \sigma_O(E)] \times 10^{-5} \right\} \quad (49)$$

Sustituyendo (48) en (47), podemos llegar a una expresión que considere la atenuación del aire con las condiciones atmosféricas del LSCD.

$$F'_A(l) = \exp \ln[F_A(l)] \frac{\rho'}{\rho} \quad (50)$$

$$F'_A(l) = F_A(l)^{\rho'/\rho} \quad (51)$$

Los distintos valores obtenidos de  $F_A(l)$  y de  $F'_A(l)$  se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Comparación de los valores obtenidos de los dos factores de atenuación del aire a las 3 distancias de medición.

Distancia [cm]	$F_A(l)$	$u(F_A(l))$	$F'_A(l)$	$u(F'_A(l))$
110	1.0086	0.0001	1.0061	0.0001
120	1.0095	0.0002	1.0068	0.0001
130	1.0104	0.0002	1.0074	0.0001

### 5.3 MÉTODO SEMI-EMPÍRICO

Para este método se realizaron 25 mediciones a diferentes distancias desde 26 cm hasta 130 cm; se tomaron las mismas consideraciones que en el método de conos de sombra, 10,000 cuentas por cada medición. A cada medición se le restó el fondo natural de neutrones y las distancias tomadas fueron desde el centro de la fuente hasta el centro del detector. Para determinar la contribución por dispersión se deben sustituir valores del lado izquierdo de la ecuación (17) y graficar estos contra la distancia  $l^2$ . Con estos datos se realiza un ajuste lineal por medio de mínimos cuadrados ponderados utilizando la incertidumbre combinada de cada dato obtenido y finalmente con los parámetros obtenidos del ajuste es posible obtener un valor de  $R_\Phi$  y de  $S$ .

Antes de realizar el ajuste lineal ponderado es necesario calcular los valores de la fluencia  $\phi$  y del factor de corrección geométrico  $F_1(l)$ . Para obtener los valores de la fluencia a las distintas distancias de medición se debe dividir la intensidad angular  $B_\Omega$  entre el cuadrado de la distancia a la que se hizo cada medición.

### 5.4 SIMULACIÓN MONTE CARLO

Además de los métodos experimentales, se realizaron simulaciones por el método Monte Carlo para tener otro punto de comparación del experimento. Se utilizó un programa basado en Python de uso libre llamado OpenMC [17], capaz de simular el transporte de neutrones y fotones. Para poder realizar una simulación en OpenMC es necesario definir tres parámetros, que son la geometría donde ocurre el transporte de las partículas, los materiales con los que estas partículas van a interactuar y la configuración de la simulación donde se toma en cuenta el tipo de fuente a modelar, su espectro energético,

el número de partículas de la simulación y las cantidades que se quieren medir.

Para determinar la contribución por dispersión con Monte Carlo, se realizó un procedimiento similar al método de conos de sombra. Se hicieron 6 simulaciones, 3 sin cono y 3 con cono a 110 cm 120 cm y 130 cm, una para cada distancia.

### *Geometría*

Para la geometría de la sala de neutrones se utilizaron los planos del Departamento de Metrología de Radiaciones Ionizantes. Se modelaron todas las estructuras que se consideró tendrían un mayor impacto sobre la contribución por dispersión. Estas fueron las paredes y láminas del octágono, el suelo falso de rejilla metálica, el sótano junto con la tierra de alrededor, el techo y el torno encargado de mover el detector y el cono. También se modelaron los instrumentos como el detector (esfera de Bonner, cristal centelleador y soporte) y el cono de sombra.

### *Materiales*

Para definir los materiales de la simulación se utilizó un compendio de materiales [18] de donde se obtuvieron la densidad y la composición elemental de cada una de las estructuras de la sala de neutrones.

### *Configuración*

Para la configuración de la simulación se definió la posición espacial de una fuente de neutrones isotrópica, con un espectro energético obtenido de [19] y una intensidad de  $9.003620.24s^{-1}$ . También se le indicó a OpenMC que midiera flujo con la *tally flux* en la celda correspondiente al cristal del detector, y se definió el modo de simulación como de fuente fija (*fixed source*) junto con el número de lotes (*batches*) y partículas a simular. En este caso 500 *batches* con  $4 \times 10^6$  partículas, para tener un total de  $2 \times 10^9$  partículas en toda la simulación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 MÉTODO DE CONOS DE SOMBRA

Las Tablas 4 y 5 presentan los resultados obtenidos de las 6 mediciones hechas para el método de conos de sombra, 3 mediciones sin cono  $M_T(l)$  y 3 mediciones con cono  $M_S(l)$ . Todas las mediciones fueron corregidas por la contribución por fondo usando los resultados del apéndice A.1. Los resultados también se muestran con sus respectivas incertidumbres<sup>1</sup>.

Tabla 4: Resultados de la mediciones sin cono a las 3 distancias. Se muestran las lecturas sin fondo  $M_T(l)$ .

Distancia [cm]	Cuentas [s <sup>-1</sup> ]	u(N) [s <sup>-1</sup> ]	Tiempo [s]	$M_T(l)$ [cps]	u( $M_T(l)$ ) [cps]
110	$1.04 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	900	11.40	0.11
120	$1.34 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	1300	10.14	0.09
130	$2.47 \times 10^4$	$0.02 \times 10^4$	2700	8.97	0.06

Tabla 5: Resultados de la mediciones con cono a las 3 distancias. Se muestran las lecturas sin fondo  $M_S(l)$ .

Distancia [cm]	Cuentas [s <sup>-1</sup> ]	u(N) [s <sup>-1</sup> ]	Tiempo [s]	$M_S(l)$ [cps]	u( $M_S(l)$ ) [cps]
110	$9.19 \times 10^3$	$0.10 \times 10^3$	6000	1.35	0.02
120	$9.45 \times 10^3$	$0.10 \times 10^3$	6000	1.40	0.02
130	$9.60 \times 10^4$	$0.03 \times 10^4$	58999	1.45	0.01

Una vez obtenidas las mediciones corregidas por fondo del método de conos, así como el factor de atenuación del aire, se puede calcular la constante característica del arreglo fuente-detector, junto con la respuesta a fluencia a las tres distancias de medición, utilizando las ecuaciones (14) y (13), respectivamente. Para ello, se determina la intensidad angular de la fuente usando la intensidad de la fuente

<sup>1</sup> Las incertidumbres de la distancia y del tiempo son las mismas para todas las mediciones, y resulta inconveniente mostrarlas en las tablas. Se incluyen en el apéndice B

corregida por decaimiento calculada en la sección A.2 y el factor corrección por anisotropía.

$$B_{\Omega} = \frac{B \cdot F_1(\theta)}{4\pi}$$

$$B_{\Omega} = \frac{(9.0036 \times 10^6)(1.0248)}{4\pi}$$

$$\boxed{B_{\Omega} = 7.3425 \times 10^5 \text{ s}^{-1}}$$

Ahora es posible calcular los valores de  $k$  y de la respuesta a fluencia  $R_{\Phi}$  a las tres distancias, los resultados y sus incertidumbres se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados de la constante característica  $k$  y la respuesta a fluencia  $R_{\Phi}$  a las 3 distancias de medición.

Distancia [cm]	$k$ [ $\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ ]	$u(k)$ [ $\text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ ]	$R_{\Phi}$ [ $\text{cm}^2$ ]	$u(R_{\Phi})$ [ $\text{cm}^2$ ]
110	$1.22 \times 10^5$	$0.02 \times 10^5$	0.166	0.003
120	$1.27 \times 10^5$	$0.02 \times 10^5$	0.172	0.002
130	$1.28 \times 10^5$	$0.01 \times 10^5$	0.174	0.002

Finalmente, para determinar la contribución por dispersión es necesario realizar la resta de las mediciones con cono a las mediciones sin cono para obtener la contribución de neutrones directos  $N_D$ .

$$N_D = M_T(l) - M_S(l) \quad (52)$$

Con estos datos se puede realizar una comparación con las mediciones hechas con cono para conocer la contribución por dispersión  $D_c$  a las 3 distancias de medición. Los resultados de esta contribución con incertidumbres se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados de la contribución por neutrones directos  $N_D$  y la contribución por dispersión  $D_c$  a las 3 distancias de medición.

Distancia [cm]	$N_D$ [cps]	$u(N_D)$ [cps]	$D_c$	$u(D_c)$
110	10.04	0.11	0.135	0.002
120	8.74	0.09	0.159	0.003
130	7.52	0.06	0.193	0.003

## 6.2 MÉTODO SEMI-EMPÍRICO

Los resultados obtenidos de la fluencia mediante la ecuación (10) con incertidumbres se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8: Resultados obtenidos del cálculo de la fluencia  $\varphi$  para las 25 distancias de medición.

Distancia [cm]	$\varphi$ [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$u_c(\varphi)$ [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Distancia [cm]	$\varphi$ [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	$u_c(\varphi)$ [cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]
26.07	$1.08 \times 10^3$	$0.01 \times 10^3$	76.07	$1.27 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$
28.07	$9.32 \times 10^2$	$0.06 \times 10^2$	80.07	$1.15 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$
32.07	$7.14 \times 10^2$	$0.04 \times 10^2$	84.07	$1.04 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$
36.07	$5.64 \times 10^2$	$0.03 \times 10^2$	88.07	$9.47 \times 10^1$	$0.05 \times 10^1$
40.07	$4.57 \times 10^2$	$0.03 \times 10^2$	92.07	$8.67 \times 10^1$	$0.05 \times 10^1$
44.07	$3.78 \times 10^2$	$0.02 \times 10^2$	98.07	$7.63 \times 10^1$	$0.04 \times 10^1$
48.07	$3.18 \times 10^2$	$0.02 \times 10^2$	104.07	$6.78 \times 10^1$	$0.04 \times 10^1$
52.07	$2.71 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$	110.07	$6.06 \times 10^1$	$0.03 \times 10^1$
56.07	$2.34 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$	114.82	$5.57 \times 10^1$	$0.03 \times 10^1$
60.07	$2.03 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$	119.82	$5.11 \times 10^1$	$0.03 \times 10^1$
64.07	$1.79 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$	124.82	$4.71 \times 10^1$	$0.02 \times 10^1$
68.37	$1.57 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$	129.82	$4.36 \times 10^1$	$0.02 \times 10^1$
72.07	$1.41 \times 10^2$	$0.01 \times 10^2$			

Para el cálculo del factor de corrección geométrico, se utilizó la ecuación (19), con un parámetro de eficacia de neutrones  $\delta = 0.48$  para esferas moderadoras de 25.4 cm de diámetro obtenido de [13], y un radio del detector  $R_D = 12.51$  cm. El cálculo del factor de corrección a cada distancia con incertidumbres se encuentra en la tabla 9.

Tabla 9: Resultados obtenidos del cálculo del factor de corrección geométrico para las 25 distancias de medición.

Distancia [cm]	$F_1(l)$	$u_c(F_1(l))$	Distancia [cm]	$F_1(l)$	$u_c(F_1(l))$
26.07	1.0276	0.0017	76.07	1.0032	0.0002
28.07	1.0238	0.0015	80.07	1.0029	0.0002
32.07	1.0183	0.0011	84.07	1.0027	0.0002
36.07	1.0144	0.0009	88.07	1.0024	0.0002
40.07	1.0117	0.0007	92.07	1.0022	0.0001

Tabla 9: Resultados obtenidos del cálculo del factor de corrección geométrico para las 25 distancias de medición.

Distancia [cm]	$F_1(l)$	$u_c(F_1(l))$	Distancia [cm]	$F_1(l)$	$u_c(F_1(l))$
44.07	1.0097	0.0006	98.07	1.0020	0.0001
48.07	1.0081	0.0005	104.07	1.0017	0.0001
52.07	1.0069	0.0004	110.07	1.0016	0.0001
56.07	1.0060	0.0004	114.82	1.0014	0.0001
60.07	1.0052	0.0003	119.82	1.0013	0.0001
64.07	1.0046	0.0003	124.82	1.0012	0.0001
68.37	1.0040	0.0003	129.82	1.0011	0.0001
72.07	1.0036	0.0002			

Las mediciones tomadas para el método semi-empírico a las 25 distancias consideradas corregidas por fondo se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Resultados de las mediciones obtenidas a las 25 distancias con incertidumbres. Se muestran las lecturas sin fondo  $M_T(l)$ .

Distancia [cm]	Cuentas [s <sup>-1</sup> ]	$u(N)$ [s <sup>-1</sup> ]	Tiempo [s]	$M_T(l)$ [cps]	$u(M_T(l))$ [cps]
26.07	$1.96 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	100	196.08	1.40
28.07	$1.69 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	100	168.79	1.30
32.07	$1.27 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	100	126.40	1.13
36.07	$1.02 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	100	101.19	1.01
40.07	$1.21 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	150	80.39	0.73
44.07	$1.01 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	150	66.87	0.67
48.07	$1.14 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	200	56.82	0.53
52.07	$9.62 \times 10^3$	$0.01 \times 10^4$	200	47.94	0.49
56.07	$1.06 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	250	42.29	0.41
60.07	$1.30 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	350	37.00	0.33
64.07	$1.14 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	350	32.33	0.31
68.37	$1.30 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	450	28.73	0.25
72.07	$1.18 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	450	26.03	0.24
76.07	$1.18 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	500	23.34	0.22
80.07	$1.28 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	600	21.21	0.19
84.07	$1.31 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	650	20.04	0.18

Tabla 10: Resultados de las mediciones obtenidas a las 25 distancias con incertidumbres. Se muestran las lecturas sin fondo  $M_T(l)$ .

Distancia [cm]	Cuentas [ $s^{-1}$ ]	$u(N)$ [ $s^{-1}$ ]	Tiempo [s]	$M_T(l)$ [cps]	$u(M_T(l))$ [cps]
88.07	$1.27 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	700	17.91	0.16
92.07	$1.15 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	700	16.22	0.15
98.07	$1.34 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	900	14.66	0.13
104.07	$1.22 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	900	13.36	0.12
110.07	$1.40 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	1150	12.02	0.10
114.82	$1.49 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	1300	11.29	0.09
119.82	$1.38 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	1300	10.44	0.09
124.82	$1.28 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	1300	9.67	0.09
129.82	$1.27 \times 10^4$	$0.01 \times 10^4$	1400	8.86	0.08

Después de obtener los valores del factor de corrección geométrico, la fluencia, las mediciones corregidas por fondo y un valor de  $A = 0.0001 \text{ cm}^{-1}$  (obtenido de [14]), para todas las distancias de medición, se sustituyeron valores del lado izquierdo de la ecuación (17). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11: Valores obtenidos del lado izquierdo de la ecuación (17).

Distancia [cm]	Ec.(17)	Incertidumbre	Distancia [cm]	Ec.(17)	Incertidumbre
26.07	0.176	0.002	76.07	0.182	0.002
28.07	0.177	0.002	80.07	0.183	0.002
32.07	0.173	0.002	84.07	0.190	0.003
36.07	0.176	0.002	88.07	0.187	0.003
40.07	0.173	0.002	92.07	0.185	0.003
44.07	0.174	0.002	98.07	0.190	0.003
48.07	0.177	0.002	104.07	0.195	0.003
52.07	0.175	0.002	110.07	0.196	0.003
56.07	0.179	0.002	114.82	0.200	0.003
60.07	0.180	0.002	119.82	0.201	0.003
64.07	0.179	0.002	124.82	0.202	0.003
68.37	0.181	0.002	129.82	0.201	0.003
72.07	0.182	0.002			

Se tomó como variable independiente a  $l^2$  en la ecuación (17) para graficar los resultados obtenidos de la Tabla 11 contra  $l^2$ . Esta gráfica muestra una tendencia lineal que fue ajustada por medio de mínimos cuadrados ponderados con ayuda de Origin [20]. Se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 12: Parámetros obtenidos del ajuste lineal por mínimos cuadrados ponderados.

Parámetros			
Respuesta fluencia $R_\Phi$ [cm <sup>2</sup> ]	$u(R_\Phi)$ [cm <sup>2</sup> ]	Contribución fraccional por dispersión S	$u(S)$
0.1723	0.0007	$1.09 \times 10^{-5}$	$5.87 \times 10^{-7}$

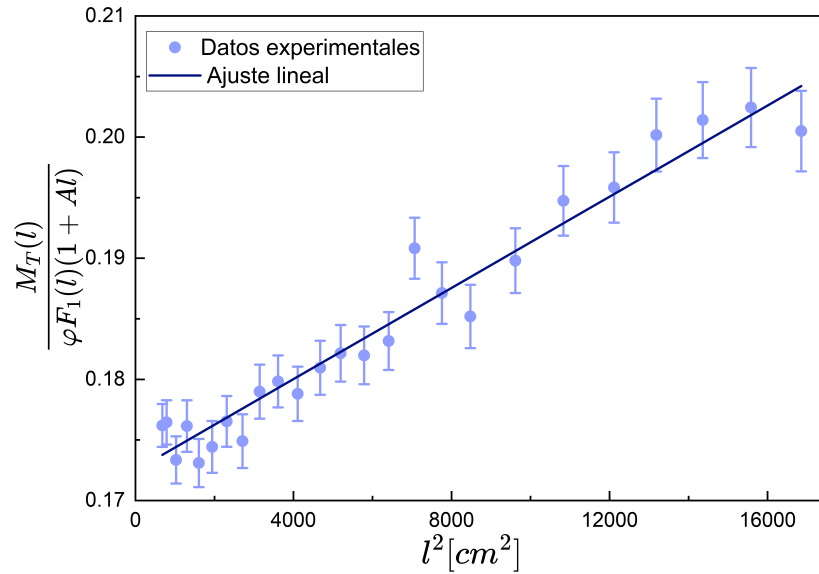


Figura 15: Gráfica de los datos experimentales y ajuste lineal por mínimos cuadrado ponderados.

Una vez que se determinaron los parámetros del ajuste lineal ponderado, fue posible determinar los valores de la respuesta a fluencia  $R_\Phi$  y de la contribución fraccional por dispersión S para este método. Los valores obtenidos se encuentran en la Tabla 12, y la gráfica de los datos con incertidumbres junto con el ajuste lineal en la Figura 15.

### 6.3 RESULTADOS DE AMBOS MÉTODOS

Las contribuciones por dispersión  $D_c$  obtenidas por el método de conos de sombra representan la contribución por dispersión

de neutrones a esas distancias específicamente. La contribución fraccional por dispersión  $S$  determinada por el método semi-empírico representa la contribución por dispersión de neutrones de manera proporcional de acuerdo a la ecuación (17). Para realizar una comparación directa entre ambos métodos, se multiplicó el valor de la contribución fraccional por dispersión  $S$  del método semi-empírico, con las distancias cuadradas  $l^2$  a las que se calculó la contribución por dispersión  $D_c$  del método de conos de sombra, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13: Resultados de la contribución por dispersión  $D_s$  a las 3 distancias de medición para el método semi-empírico.

$l^2$ [cm <sup>2</sup> ]	Contribución fraccional por dispersión $S$	Contribución por dispersión $D_s$	$u(D_s)$
12100		0.1320	0.0073
14400	$\times$ $1.0910 \times 10^{-5}$	0.1571	0.0086
16900		0.1844	0.0101

Tabla 14: Comparación de la contribución por dispersión obtenida por ambos métodos.

Distancia [cm]	Conos de sombra		Semi-empírico	
	$D_c$	$u(D_c)$	$D_s$	$u(D_s)$
110	0.1346	0.0026	0.1320	0.0073
120	0.1597	0.0029	0.1571	0.0086
130	0.1925	0.0025	0.1844	0.0101

Si observamos los resultados de la Tabla 14, la contribución por dispersión entre ambos métodos es similar para las primeras dos distancias; sin embargo, para la última distancia, se encuentran valores menos cercanos entre sí. En un segundo análisis, se eliminaron los puntos atípicos de la gráfica de la Figura 15, correspondientes a las distancias de 84.07 cm, 92.07 cm y 129.8 cm.

Después de eliminar estos puntos se repitió el ajuste lineal por mínimos cuadrados ponderados al subconjunto de datos. Los parámetros del nuevo ajuste lineal junto con su gráfica se encuentran en la Tabla 15 y la Figura 16.

Tabla 15: Parámetros obtenidos del ajuste lineal después de eliminar los puntos fuera de la tendencia lineal.

Parámetros			
Respuesta fluencia $R_\Phi$ [ $\text{cm}^2$ ]	$u(R_\Phi)$ [ $\text{cm}^2$ ]	Contribución fraccional por dispersión S	$u(S)$
0.1722	0.0005	$1.12 \times 10^{-5}$	$5.45 \times 10^{-7}$

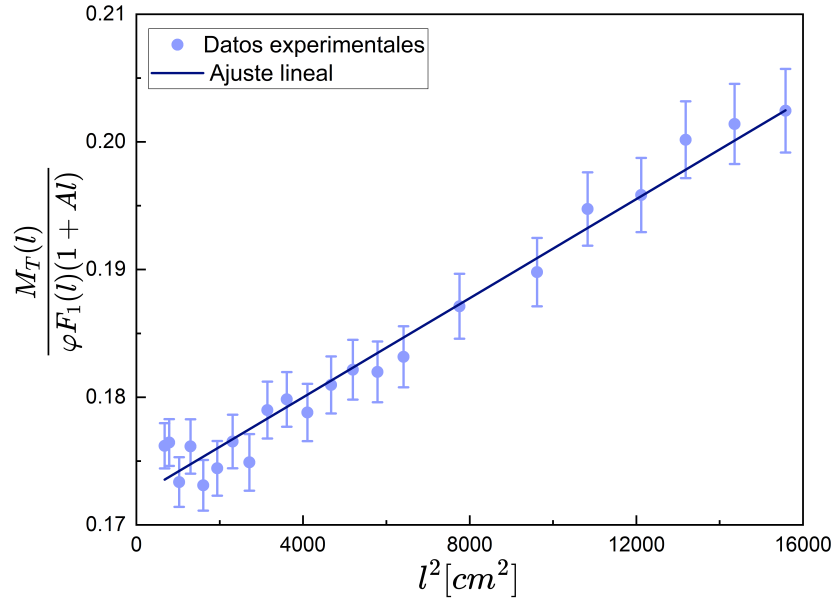


Figura 16: Gráfica de los datos experimentales y el ajuste lineal por mínimos cuadrado ponderados después de eliminar los puntos fuera de la tendencia lineal.

Con la nueva contribución fraccional por dispersión S obtenida después de repetir el ajuste lineal, se calculó nuevamente la contribución por dispersión  $D_s$ , igual que como se hizo en la Tabla 13. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: Contribución por dispersión  $D_s$  para el método semi-empírico con la nueva contribución fraccional por dispersión S.

$l^2$ [ $\text{cm}^2$ ]	Contribución fraccional por dispersión S	Contribución por dispersión $D_s$	$u(D_s)$
12100	$1.1270 \times 10^{-5}$	0.1364	0.0066
14400		0.1623	0.0079
16900		0.1905	0.0092

Tabla 17: Comparación de la contribución por dispersión obtenida por ambos métodos después de obtener la nueva contribución fraccional S.

Distancia [cm]	Conos de sombra		Semi-empírico		Diferencia
	$D_c$	$u(D_c)$	$D_s$	$u(D_s)$	
110	0.1346	0.0026	0.1364	0.0066	0.013
120	0.1597	0.0029	0.1623	0.0079	0.016
130	0.1925	0.0025	0.1905	0.0092	0.010

Los resultados de la Tabla 17 muestran una buena concordancia entre sí y las diferencias entre estos quedan dentro de las incertidumbres. Así pues, el método semi-empírico ha sido validado a través de la medición con conos de sombra, para determinar la contribución por dispersión de la sala de neutrones del LSCD del ININ.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la *tally* de flujo de las 6 simulaciones se muestran en la Tabla 18 para las simulaciones sin cono, y en la Tabla 19 para las simulaciones con cono.

Tabla 18: Resultados obtenidos de la *tally* de flujo para las simulaciones sin cono a las tres distancias de medición.

Distancia [cm]	Flujo	Incertidumbre
110	$1.21 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-7}$
120	$1.04 \times 10^{-5}$	$1.14 \times 10^{-7}$
130	$8.89 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^{-7}$

Tabla 19: Resultados obtenidos de la *tally* de flujo para las simulaciones con cono a las tres distancias de medición.

Distancia [cm]	Flujo	Incertidumbre
110	$1.16 \times 10^{-6}$	$3.41 \times 10^{-8}$
120	$1.22 \times 10^{-6}$	$3.64 \times 10^{-8}$
130	$1.14 \times 10^{-6}$	$3.30 \times 10^{-8}$

Para obtener la contribución por dispersión, se utilizaron estos datos de la misma forma que en el método de conos de sombra. Se determinó la cantidad de neutrones directos para después poder compararlos con los resultados de las simulaciones sin cono y a partir de ahí determinar una contribución por dispersión. La contribución por dispersión se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20: Resultados de la contribución por dispersión  $D_m$  determinados a través de las simulaciones Monte Carlo.

Distancia [cm]	$D_m$	$u(D_m)$
110	0.1062	0.0037
120	0.1319	0.0048
130	0.1467	0.0053

Con fines de comparación, se presentan los valores porcentuales obtenidos por el método de conos de sombra, método semi-empírico, y simulación Monte Carlo, en la Tabla 21. Podemos observar que la contribución por dispersión obtenida en las simulaciones es consistentemente menor que en los métodos experimentales, esto puede ser atribuido a la ausencia de estructuras de la sala de calibración en la geometría de la simulación.

Tabla 21: Comparación de la contribución por dispersión de los métodos experimentales con la simulación Monte Carlo.

Distancia [cm]	Conos de sombra		Semi-empírico		Simulación	
	$D_c$	$u(D_c)$	$D_s$	$u(D_s)$	$D_m$	$u(D_m)$
110	0.1346	0.0026	0.1364	0.0066	0.1062	0.0037
120	0.1597	0.0029	0.1623	0.0079	0.1319	0.0048
130	0.1925	0.0025	0.1905	0.0092	0.1467	0.0053

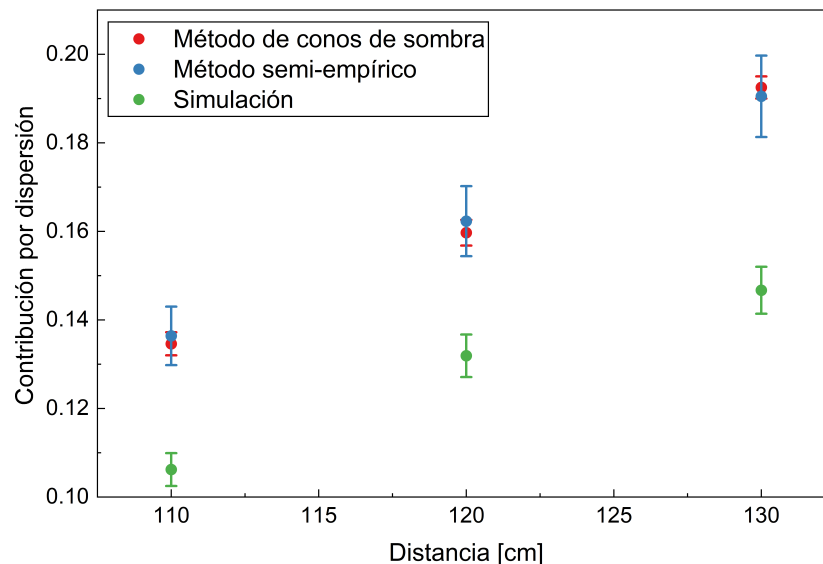


Figura 17: Comparación de los resultados experimentales con los resultados de las simulaciones.

## CONCLUSIONES

---

Se determinó la contribución por dispersión de neutrones al campo de referencia del LSCD-ININ mediante el método de conos de sombra y el método semi-empírico. Los resultados de ambos métodos mostraron una buena consistencia entre sí, con diferencias entre las contribuciones por dispersión menores al 1.6%. La contribución fraccional por dispersión  $S$  obtenida tiene un valor de  $1.1270 \times 10^{-5}$  con una incertidumbre de  $5.4514 \times 10^{-7}$ . Estos resultados están sujetos a las condiciones atmosféricas del LSCD-ININ con una temperatura de 18.9 °C, una presión atmosférica de 710.47 hPa, una humedad relativa del 58.5% y una densidad del aire de  $8.42 \times 10^{-4}$  g/cm<sup>3</sup>.

Para el método de conos de sombra se realizaron 6 mediciones, 3 con cono y 3 sin cono a 110 cm, 120 cm y 130 cm de distancia. Las distancias fueron propuestas siguiendo los requerimientos de [4]. Para el método semi-empírico se realizaron 25 mediciones desde los 26 cm hasta los 130 cm con un intervalo de separación variable de 2 cm, 4 cm y 6 cm. Se escogieron estos intervalos por las limitaciones espaciales del experimento y con la intención de que las distancias de las mediciones del método de conos de sombra coincidieran con las mediciones del método semi-empírico.

Se determinó una contribución por dispersión para el método de conos de sombra a 110 cm, 120 cm y 130 cm de distancia con valores del 13.46%, 15.97% y 19.25%, respectivamente. Por otra parte, por el método semi-empírico se encontró una contribución por dispersión a las distancias mencionadas anteriormente de 13.64%, 16.23% y 19.05%, respectivamente.

La respuesta a fluencia que se obtuvo mediante el método de conos de sombra fue de 0.1712 con una incertidumbre de 0.0024. Mientras que la respuesta a fluencia determinada por el ajuste lineal por mínimos cuadrados ponderados del método semi-empírico fue de 0.1722 cm<sup>2</sup> con una incertidumbre de 0.0005 cm<sup>2</sup>.

Basado en los resultados obtenidos de la respuesta a fluencia y la contribución por dispersión de ambos métodos, se concluyó la buena consistencia entre los dos métodos con una diferencia entre ellos menor al 1.6% y una contribución por dispersión menor al 20% para las distancias más grandes, estando dentro de las recomendaciones de [4]. Ambos métodos fueron validados satisfactoriamente.

Se realizaron un total de 6 simulaciones Monte Carlo para comparar los resultados obtenidos con los resultados experimentales del método de conos de sombra y el método semi-empírico. Dentro de la simulación se definió un sistema que mantuvo las características principales de la sala de neutrones, estas fueron su geometría y los materiales de los que está hecha la sala. También se modelaron las características de la fuente y el detector. Los resultados obtenidos de la contribución por dispersión de las simulaciones mostraron la misma tendencia que los resultados experimentales; sin embargo, los valores de la contribución por dispersión fueron menores en la simulación. Esta diferencia de valores entre ambos resultados fue atribuida a la falta de estructuras capaces de dispersar neutrones dentro de la geometría de la simulación.

Parte III

APÉNDICES



## CORRECCIONES ADICIONALES

---

### A.1 CORRECCIÓN POR FONDO

Para realizar la corrección por fondo a las mediciones hechas en el método de conos de sombra y el método semi-empírico, se colocó el detector dentro de la sala de neutrones sin fuente. La orientación del detector respecto a la sala fue la misma que se muestra en la Figura 8, a una distancia de 110 cm.

### A.2 CORRECCIÓN POR DECAIMIENTO

De acuerdo al certificado de calibración de la fuente de  $^{241}\text{AmBe}$ , su intensidad corregida al 18 de marzo del 2019 era de  $(9.081 \pm 0.012) \times 10^6 \text{s}^{-1}$ . Al momento de realizar las mediciones el día 19 de julio del 2024 la fuente tenía una edad de 5.342 años, naturalmente, la intensidad de la fuente ya no era la misma que cuando llegó al Centro de Metrología de Radiaciones Ionizantes. Utilizando la sección 3.1.5, se hizo la siguiente corrección por decaimiento:

Considerando la vida media del isótopo de  $^{241}\text{Am}$  de  $(432.6 \pm 0.6)$  años, calculamos la constante de decaimiento por medio de la ecuación (8):

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{432.6} = 0.001602$$

$$\boxed{\lambda = 0.001602 \text{ años}^{-1}}$$

Utilizando este resultado, junto con la ecuación (7), podemos conocer la intensidad de la fuente al momento de realizar las mediciones:

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

$$N = (9.081 \times 10^6) \exp\{(0.001602)(5.342)\} = 9003620.24$$

$$N = 9.0036 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

## PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRES

---

A continuación se presentan todos los cálculos realizados para determinar las incertidumbres típicas y combinadas de las mediciones y magnitudes manejadas en este trabajo<sup>1</sup>. Todas ellas fueron determinadas siguiendo los pasos de la sección 3.4.8. En este apéndice, a manera de ejemplo, solo se reportó el procedimiento completo del cálculo de la incertidumbre para el modelo de medición correspondiente a las cuentas por segundo. Para los otros modelos de medición, únicamente se reporta la información de las magnitudes de entrada y la estimación de la incertidumbre.

### B.1 CUENTAS POR SEGUNDO

Para calcular la incertidumbre de las cuentas por segundo, se utilizaran los datos de la primera fila de la Tabla 4 como ejemplo. La incertidumbre de las demás cuentas por segundo siguen el mismo procedimiento.

*Número de cuentas (N)*

De acuerdo a la sección 3.4.6, la incertidumbre del número de cuentas obtenidas por el detector es simplemente la raíz cuadrada del número de cuentas  $N = 10421$ :

$$u(N) = \sqrt{N} = 102.08$$

$$u(N) = 102.08 \text{ cuentas}$$

*Tiempo (s)*

Para obtener la incertidumbre del tiempo  $t = 900 \text{ s}$  se recurrió nuevamente a la sección 3.4.6, se propuso una distribución

---

<sup>1</sup> Existen cantidades como las cuentas por segundo, que fueron medidas varias veces para distintas distancias. En estos casos resulta inconveniente mostrar la incertidumbre para cada distancia, por lo que únicamente se muestra el cálculo de la incertidumbre de la primera fila o distancia.

rectangular para el tiempo, debido a la resolución de la electrónica. Se propuso una semiamplitud  $a = 0.005$ , así los intervalos  $a_+ = 900.005$  y  $a_- = 899.995$ . Siendo que la diferencia de los intervalos es igual a  $2a$ , podemos utilizar la ecuación (33).

$$u(t) = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.002886$$

$$u(t) = 0.002886 \text{ s}$$

*Cuentas por segundo (cps<sub>f</sub>)*

Para obtener las cuentas por segundo se dividió el número de cuentas entre el tiempo tal que:

$$\text{cps}_f = \frac{N}{t} \quad (53)$$

El valor obtenido de las cuentas por segundo del fondo fue de 0.179 cps, para calcular su incertidumbre es necesario utilizar la ecuación (27), tenemos:

$$u_c^2(\text{cps}_f) = \left(\frac{1}{t}\right)^2 (u(N))^2 + \left(-\frac{N}{t^2}\right)^2 (u(t))^2 \quad (54)$$

Sustituyendo valores en la ecuación (54), obtenemos la incertidumbre combinada de las cuentas por segundo:

$$u_c(\text{cps}_f) = \sqrt{\left(\frac{1}{900}\right)^2 (102.08)^2 + \left(-\frac{10421}{(900)^2}\right)^2 (0.002886)^2}$$

$$u_c(\text{cps}_f) = 0.113$$

Tabla 22: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Cuentas N	Medición	Tipo B	Poisson
Tiempo t	Escala	Tipo B	Rectangular

Tabla 23: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Cuentas N	10421	102.08	0.0011	0.113	500000
Tiempo t	900	0.0028	-0.012865	-0.000036	200
Resultado del mensurando	$u_c(\text{cps}_f)$	$\nu_{\text{eff}}$			
11.58	0.113	500000.10			

## B.2 CUENTAS POR SEGUNDO SIN FONDO (cps)

Modelo de medición:

$$\text{cps} = \text{cps}_f - \text{Fondo} \quad (55)$$

Coeficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial \text{cps}}{\partial \text{cps}_f} = 1 \quad (56)$$

$$\frac{\partial \text{cps}}{\partial \text{Fondo}} = -1 \quad (57)$$

Tabla 24: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Cuentas por segundo $\text{cps}_f$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Fondo $\text{cps}_f$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal

Tabla 25: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Cuentas por segundo $cps_f$	11.58	0.113	1	0.113	500000
Fondo	0.179	0.0134	-1	-0.0134	5000
Resultado del mensurando	$u_c(cps)$	$\nu_{eff}$			
11.40	0.114	504248			

## B.3 CONSTANTE DE DECAIMIENTO

Modelo de medición:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (58)$$

Coefficiente de sensibilidad  $c_i$ :

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T_{1/2}} = -\frac{0.693}{T_{1/2}^2} \quad (59)$$

Tabla 26: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Tiempo de vida media $T_{1/2}$	Certificado de calibración	Tipo B	Normal

Tabla 27: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Tiempo de vida media $T_{1/2}$	432.6	0.6	-0.0000037	-0.0000022	1250
Resultado del mensurando	$u_c(\lambda)$	$\nu_{eff}$			
0.0016019	0.0000022	1250			

## B.4 LEY DE DECAIMIENTO

Modelo de medición

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (60)$$

Coeficientes de sensibilidad  $c_i$ :

$$\frac{\partial N}{\partial N_0} = e^{-\lambda t} \quad (61)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \lambda} = N_0 t (-e^{-\lambda t}) \quad (62)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = N_0 \lambda (-e^{-\lambda t}) \quad (63)$$

Tabla 28: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Intensidad inicial $N_0$	Certificado de calibración	Tipo B	Normal
Constante de decaimiento $\lambda$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Tiempo $t$	Resolución	Tipo B	Rectangular

Tabla 29: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Intensidad inicial $N_0$	9081000	12000	0.99	11897.75	1250
Constante de decaimiento $\lambda$	0.0016019	0.0000022	-48097339.35	-106.86	1250
Tiempo $t$	5.342	0.0001	-14423.28	-1.44	50
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
9003620.24	11898.23	1250.20			

## B.5 INTENSIDAD ANGULAR DE LA FUENTE

Modelo de medición:

$$B_{\Omega} = \frac{BF_1(90^{\circ})}{4\pi} \quad (64)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial B_{\Omega}}{\partial B} = \frac{F_1(90^{\circ})}{4\pi} \quad (65)$$

$$\frac{\partial B_{\Omega}}{\partial F_1(90^{\circ})} = \frac{B}{4\pi} \quad (66)$$

Tabla 30: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Intensidad corregida B	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Factor de corrección por anisotropía $F_1(90^{\circ})$	Certificado de calibración	Tipo B	Normal

Tabla 31: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Intensidad corregida B	9003620.24	11898.23	0.08155	970.31	1250.20
Factor de corrección por anisotropía $F_1(90^{\circ})$	1.0248	0.005	716485.33	3582.42	1250
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
734254.17	3711.51	1432.42			

B.6 FACTOR DE ATENUACIÓN DEL AIRE  $F_A(l)$

Modelo de medición:

$$F_A(l) = \exp[l\Sigma(E)] \quad (67)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial F_A(l)}{\partial l} = \Sigma(E)\exp[l\Sigma(E)] \quad (68)$$

$$\frac{\partial F_A(l)}{\partial \Sigma(E)} = l\exp[l\Sigma(E)] \quad (69)$$

Tabla 32: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Distancia superficie-superficie	Resolución	Tipo B	Rectangular
Coefficiente de atenuación lineal $\Sigma(E)$	Referencia [4]	Tipo B	Normal

Tabla 33: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Distancia s-s $l$	96.43	0.5	0.00009	0.00004	1.02
Coefficiente de atenuación lineal $\Sigma(E)$	0.000089	0.000001	97.26	0.000129	1250
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
1.008619	0.0001371	84.73			

B.7 FACTOR DE ATENUACIÓN DEL AIRE  $F'_A(l)$ 

Modelo de medición:

$$F'_A(l) = F_A(l)^{\rho'/\rho}, \rho = 0.0011839 \quad (70)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial F'_A(l)}{\partial F_A(l)} = \frac{\rho'}{\rho} F_A(l)^{(\rho'/\rho)-1} \quad (71)$$

$$\frac{\partial F'_A(l)}{\partial \rho'} = F_A(l)^{\rho'/\rho} \ln(F_A(l)) \quad (72)$$

Tabla 34: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Factor de atenuación $F_A(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Densidad del aire $\rho$	Referencia [21]	Tipo B	Normal

Tabla 35: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Factor de atenuación $F_A(l)$	1.00862	0.00014	0.70941	0.00010	84.73
Densidad del aire $\rho$	0.000842	0.000003	7.29	0.000019	200
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
1.00612	0.00010	91.45			

## B.8 CONSTANTE CARACTERÍSTICA k

Modelo de medición:

$$k = [M_T(l) - M_S]F'_A(l)l^2 \quad (73)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial k}{\partial M_T(l)} = F'_A(l)l^2 \quad (74)$$

$$\frac{\partial k}{\partial M_S(l)} = -F'_A(l)l^2 \quad (75)$$

$$\frac{\partial k}{\partial F'_A(l)} = [M_T(l) - M_S]l^2 \quad (76)$$

$$\frac{\partial k}{\partial l} = 2[M_T(l) - M_S]F'_A(l)l \quad (77)$$

Tabla 36: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Lectura $M_T(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Lectura $M_S(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Factor de atenuación $F'_A(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Distancia centro-centro $l$	Medición	Tipo B	Triangular

Tabla 37: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$v_i$
Lectura $M_T(l)$	11.40	0.114	12174.07	1390.42	504248.86
Lectura $M_S(l)$	1.35	0.021	-12174.07	-253.70	28844
Factor de atenuación $F'_A(l)$	1.00612	0.00010	121571.38	12.08	91.45
Distancia centro-centro $l$	110	0.5	2223.92	1111.96	1.02
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$v_{eff}$			
122315.63	1798.40	6.98			

B.9 RESPUESTA A FLUENCIA  $R_\Phi$ 

Modelo de medición:

$$R_\Phi = \frac{k}{B_\Omega} \quad (78)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial R_\Phi}{\partial k} = \frac{1}{B_\Omega} \quad (79)$$

$$\frac{\partial R_\Phi}{\partial B_\Omega} = -\frac{k}{B_\Omega^2} \quad (80)$$

Tabla 38: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Constante característica $k$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Intensidad angular de la fuente $B_\Omega$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal

Tabla 39: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$v_i$
Constante característica $k$	122315.63	1798.40	0.000001	0.002449	6.98
Intensidad angular de la fuente $B_\Omega$	734254.17	3711.51	-0.0000002	-0.000842	1432.42
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$v_{eff}$			
0.166585	0.002590	8.73			

B.10 NEUTRONES DIRECTOS  $N_D$ 

Modelo de medición:

$$N_D = M_T(l) - M_S(l) \quad (81)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial N_D}{\partial M_T(l)} = 1 \quad (82)$$

$$\frac{\partial N_D}{\partial M_S(l)} = -1 \quad (83)$$

Tabla 40: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Lectura $M_T(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Lectura $M_S(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal

Tabla 41: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Lectura $M_T(l)$	11.40	0.114	1	0.114	504248.86
Lectura $M_S(l)$	1.35	0.021	-1	-0.021	28844
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
10.04	0.1160	528149.18			

B.11 CONTRIBUCIÓN POR DISPERSIÓN  $D_c$ 

Modelo de medición:

$$D_c = \frac{M_S(l)}{N_D} \quad (84)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial D_c}{\partial M_S(l)} = \frac{1}{N_D} \quad (85)$$

$$\frac{\partial D_c}{\partial N_D} = -\frac{M_S(l)}{N_D^2} \quad (86)$$

Tabla 42: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Neutrones directos $N_D$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Lectura $M_S(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal

Tabla 43: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$v_i$
Neutrones directos $N_D$	10.05	0.116	-0.0134	-0.0016	528149.19
Lectura $M_S(l)$	1.35	0.021	0.0995	0.0021	28844
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$v_{eff}$			
0.1346	0.0026	69228.86			

B.12 FLUENCIA  $\varphi$ 

Modelo de medición:

$$\varphi = \frac{B_\Omega}{l^2} \quad (87)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial B_\Omega} = \frac{1}{l^2} \quad (88)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial l} = -\frac{B_\Omega}{l^3} \quad (89)$$

Tabla 44: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Intensidad angular de la fuente $B_\Omega$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Distancia centro-centro $l$	Medición	Tipo B	Triangular

Tabla 45: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Intensidad angular de la fuente $B_\Omega$	734254.17	3711.51	0.0015	5.4597	1432.42
Distancia centro-centro $l$	26.07	0.05	-82.85	-4.14	1.18
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
1080.11	6.85	8.85			

B.13 FACTOR DE CORRECCIÓN GEOMÉTRICO  $F_1(l)$ 

Modelo de medición:

$$1 + \delta \left( \frac{r_D}{2l} \right)^2 \quad (90)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial F_1(l)}{\partial \delta} = \left( \frac{r_D}{2l} \right)^2 \quad (91)$$

$$\frac{\partial F_1(l)}{\partial r_D} = \delta \frac{r_D}{2l^2} \quad (92)$$

$$\frac{\partial F_1(l)}{\partial l} = -\delta \frac{r_D^2}{2l^3} \quad (93)$$

Tabla 46: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Parámetro de eficacia de neutrones $\delta$	Referencia [13]	Tipo B	Normal
Radio detector $R_D$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Distancia centro-centro $l$	Medición	Tipo B	Triangular

Tabla 47: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Parámetro de eficacia de neutrones $\delta$	0.48	0.03	0.057	0.001	25
Radio detector $R_D$	12.51	0.013	0.004	0.00006	54
Distancia centro-centro $l$	26.07	0.05	-0.002	-0.0001	1.18
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
1.028	0.00173	25.24			

## B.14 ECUACIÓN 17

Modelo de medición:

$$C = \frac{M_T(l)}{\varphi F_1(l)(1 + Al)} \quad (94)$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial C}{\partial M_T(l)} = \frac{1}{\varphi F_1(l)(1 + Al)} \quad (95)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \varphi} = -\frac{M_T(l)}{\varphi^2 F_1(l)(1 + Al)} \quad (96)$$

$$\frac{\partial C}{\partial F_1(l)} = -\frac{M_T(l)}{\varphi F_1^2(l)(1 + Al)} \quad (97)$$

$$\frac{\partial C}{\partial A} = -\frac{M_T(l)l}{\varphi F_1(l)(1 + Al)^2} \quad (98)$$

$$\frac{\partial C}{\partial l} = -\frac{M_T(l)A}{\varphi F_1(l)(1 + Al)^2} \quad (99)$$

Tabla 48: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Lectura $M_T(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Fluencia $\varphi$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Factor de corrección geométrico $F_1(l)$	Incertidumbre combinada	Tipo B	Normal
Efecto neto dispersión aire A	Referencia [14]	Tipo B	Normal
Distancia centro-centro $l$	Medición	Tipo B	Triangular

Tabla 49: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Lectura $M_T(l)$	196.08	1.40	0.0009	0.0012	500093
Fluencia $\varphi$	1080.11	6.85	-0.0001	-0.0011	8.85
Factor de corrección geométrico $F_1(l)$	1.028	0.0017	-0.1715	-0.0003	25.24
Efecto neto dispersión aire A	0.0001	0.000002	-4.58	-0.00001	25
Distancia centro-centro $l$	26.07	0.05	-0.00002	-0.000001	1.18
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
0.1762	0.0017	44			

B.15 CONTRIBUCIÓN FRACCIONAL POR DISPERSIÓN S

Modelo de medición:

$$S = \frac{R_{\Phi} S}{R_{\Phi}} \tag{100}$$

Coefficientes de sensibilidad:

$$\frac{\partial S}{\partial R_{\Phi} S} = \frac{1}{R_{\Phi}} \tag{101}$$

$$\frac{\partial S}{\partial R_{\Phi}} = -\frac{R_{\Phi} S}{R_{\Phi}^2} \tag{102}$$

Tabla 50: Información de las magnitudes de entrada.

Magnitud de entrada	Fuente de información	Tipo de incertidumbre	Distribución
Pendiente $R_{\Phi} S$	Origin [20]	Tipo B	Normal
Ordenada al origen $R_{\Phi}$	Origin [20]	Tipo B	Normal

Tabla 51: Estimación de la incertidumbre.

Magnitud de entrada $x_i$	Valor estimado de $x_i$	$u(x_i)$	$c_i$	$u_i$	$\nu_i$
Pendiente $R_{\Phi} S$	$1.94 \times 10^{-6}$	$8.93 \times 10^{-8}$	5.80	$5.18 \times 10^{-7}$	20
Ordenada al origen $R_{\Phi}$	0.1722	0.0005	$-6.54 \times 10^{-5}$	$-3.5 \times 10^{-8}$	20
Covarianza de $R_{\Phi} S$ y $R_{\Phi}$	Producto de los coeficientes de sensibilidad	$u_i$			
$-3.58 \times 10^{-11}$	$-3.80 \times 10^{-4}$	$1.36 \times 10^{-14}$			
Resultado del mensurando	$u_c(N)$	$\nu_{eff}$			
$1.1270 \times 10^{-5}$	$5.4514 \times 10^{-7}$	24.46			



## CÓDIGO DE LA SIMULACIÓN

---

A continuación se muestra el código en OpenMC utilizado para obtener los resultados de las simulaciones. La mayor parte del código es la misma para todas las simulaciones, sin embargo debido a que se hicieron 6 simulaciones distintas (con y sin cono a 3 distancias), hay ligeros cambios en la definición de las distancias que separan al detector de la fuente y de la definición del volumen que comprende al cono de sombra. El código que se muestra en este apéndice corresponde al arreglo con cono y una distancia entre la fuente y el detector de 110 cm.

Código 1: Código utilizado para las simulaciones

```
1 import openmc
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import subprocess
5
6 # DEFINICION DE LOS MATERIALES
7
8 concreto = openmc.Material(name='Concreto Portland')
9 concreto.set_density('g/cm3' , 2.30000)
10 concreto.add_element('H' , 0.010000)
11 concreto.add_element('C' , 0.001000)
12 concreto.add_element('O' , 0.529107)
13 concreto.add_element('Na' , 0.016000)
14 concreto.add_element('Mg' , 0.002000)
15 concreto.add_element('Al' , 0.033872)
16 concreto.add_element('Si' , 0.337021)
17 concreto.add_element('K' , 0.013000)
18 concreto.add_element('Ca' , 0.044000)
19 concreto.add_element('Fe' , 0.014000)
20
21 aceroc = openmc.Material(name='Acero al Carbon')
22 aceroc.set_density('g/cm3' , 7.820000)
23 aceroc.add_element('C' , 0.005000)
24 aceroc.add_element('Fe' , 0.995000)
25
26 polieti = openmc.Material(name='Polietileno No Boratado')
27 polieti.set_density('g/cm3' , 0.930000)
28 polieti.add_element('H' , 0.143716)
29 polieti.add_element('C' , 0.856284)
30 polieti.add_s_alpha_beta('c_H_in_CH2')
31
32 ladrillo = openmc.Material(name='Ladrillo Comun')
```

```
33 ladrillo.set_density('g/cm3' , 1.800000)
34 ladrillo.add_element('O' , 0.525000)
35 ladrillo.add_element('Al' , 0.005000)
36 ladrillo.add_element('Si' , 0.449000)
37 ladrillo.add_element('Ca' , 0.014000)
38 ladrillo.add_element('Fe' , 0.007000)
39
40 aceroi = openmc.Material(name='Acero Inoxidable 316L')
41 aceroi.set_density('g/cm3' , 8.000000)
42 aceroi.add_element('C' , 0.000300)
43 aceroi.add_element('Si' , 0.010000)
44 aceroi.add_element('P' , 0.000450)
45 aceroi.add_element('S' , 0.000300)
46 aceroi.add_element('Cr' , 0.170000)
47 aceroi.add_element('Mn' , 0.020000)
48 aceroi.add_element('Fe' , 0.653950)
49 aceroi.add_element('Ni' , 0.120000)
50 aceroi.add_element('Mo' , 0.025000)
51
52 hierro = openmc.Material(name='Hierro Fundido')
53 hierro.set_density('g/cm3' , 7.150000)
54 hierro.add_element('C' , 0.034000)
55 hierro.add_element('Si' , 0.026000)
56 hierro.add_element('P' , 0.003000)
57 hierro.add_element('S' , 0.001000)
58 hierro.add_element('Mn' , 0.006500)
59 hierro.add_element('Fe' , 0.929500)
60
61 tierra = openmc.Material(name='Tierra')
62 tierra.set_density('g/cm3' , 1.520000)
63 tierra.add_element('O' , 0.513713)
64 tierra.add_element('Na' , 0.006140)
65 tierra.add_element('Mg' , 0.013303)
66 tierra.add_element('Al' , 0.068563)
67 tierra.add_element('Si' , 0.271183)
68 tierra.add_element('K' , 0.014327)
69 tierra.add_element('Ca' , 0.051167)
70 tierra.add_element('Ti' , 0.004605)
71 tierra.add_element('Mn' , 0.000716)
72 tierra.add_element('Fe' , 0.056283)
73
74 parafina = openmc.Material(name='Parafina')
75 parafina.set_density('g/cm3' , 0.930000)
76 parafina.add_element('H' , 0.148605)
77 parafina.add_element('C' , 0.851395)
78 parafina.add_s_alpha_beta('c_H_in_CH2')
79
80 litio = openmc.Material(name='Litio')
81 litio.set_density('g/cm3' , 3.494)
82 litio.add_nuclide('Li6' , 0.0436)
83 litio.add_nuclide('Li7' , 0.0018)
84 litio.add_element('I' , 0.9546)
```

```

85
86
87 materials = openmc.Materials([concreto, aceroc, polieti,
      ladrillo, hierro, tierra, parafina, litio])
88
89 materials.export_to_xml()
90
91 #DEFINICION DE LA GEOMETRIA
92
93 #####
94
95 #SUPERFICIES
96
97 #MURO SUR
98 P111=openmc.Plane(a = 272336.716, b = -657478.772, c = -0.0, d =
      299786325.33292323, surface_id = 111)
99 P112=openmc.Plane(a = 272336.716, b = -657478.858, c = -0.0, d =
      271320343.15366256, surface_id = 112)
100 P113=openmc.Plane(a = -31781.472, b = -13164.364000000001, c =
      0.0, d = 14727743.215550799, surface_id = 113)
101 P114=openmc.Plane(a = 31781.472, b = 13164.2780000000048, c =
      -0.0, d = 13738303.672689795, surface_id = 114)
102 P115=openmc.Plane(a = -0.0, b = -0.0, c = -33100.00291394006, d =
      19396601.707568873, surface_id = 115)
103 P116=openmc.Plane(a = 0.0, b = 0.0, c = 33100.00291394006, d =
      9069400.798419576, surface_id = 116)
104
105 #MUIROS
106 P123=openmc.Plane(a = 170927.84, b = 70800.56850000002, c =
      -0.0, d = 71112461.1316496, surface_id = 123)
107 P132=openmc.Plane(a = -13164.364000000001, b =
      31781.471999999999, c = 0.0, d = 5333904.1638572, surface_id
      = 132)
108 P134=openmc.Plane(a = -426117.788000000006, b = -176503.82, c =
      0.0, d = 179016404.06735042, surface_id = 134)
109 P141=openmc.Plane(a = 35464.315, b = -14689.814000000002, c =
      0.0, d = 14880026.0918575, surface_id = 141)
110 P142=openmc.Plane(a = 35464.315, b = -14689.776999999991, c =
      -0.0, d = 15455995.282158494, surface_id = 142)
111 P143=openmc.Plane(a = 0.0, b = 0.0, c = -1556.693311099998, d =
      398513.4876415995, surface_id = 143)
112 P144=openmc.Plane(a = -0.0, b = -0.0, c = 1556.7028960500002, d =
      177464.1301497, surface_id = 144)
113 P145=openmc.Plane(a = -2124.5399999999963, b =
      -5129.161999999995, c = 0.0, d = 265333.3335860004,
      surface_id = 145)
114 P151=openmc.Plane(a = -43400.293999999965, b =
      -104777.80399999999, c = 0.0, d = 48384415.29028879,
      surface_id = 151)
115 P152=openmc.Plane(a = -43400.37749999999, b =
      -104777.72049999998, c = 0.0, d = 43848667.40503795,
      surface_id = 152)

```

```
116 P154=openmc.Plane(a = -0.0, b = 0.0, c = 5432.03583728, d =
      1352576.92348272, surface_id = 154)
117 P155=openmc.Plane(a = -30852.915999999998, b =
      12779.591500000002, c = 0.0, d = 1436601.836585695,
      surface_id = 155)
118
119 #COLUMNAS
120 P161=openmc.Plane(a = -33900.34 , b = 14041.993999999999, c =
      -0.0, d = 15131454.682411399, surface_id = 161)
121 P165=openmc.Plane(a = -13162.3, b = -31776.741999999996, c = 0.0,
      d = 5173911.779361799, surface_id = 165)
122 P166=openmc.Plane(a = -13162.3, b = -31776.741999999996, c = 0.0,
      d = 6641431.8904297985, surface_id = 166)
123 P176=openmc.Plane(a = 2124.61399999999987, b = 5129.1619999999995,
      c = -0.0, d = 289864.9459508001, surface_id = 176)
124 P192=openmc.Plane(a = 8227.62, b = -19863.334000000003, c =
      -0.0, d = 3655726.9958830005, surface_id = 192)
125 P196=openmc.Plane(a = 13534.7833999999998, b = 5606.320599999999,
      c = -0.0, d = 5484629.73976428, surface_id = 196)
126 P201=openmc.Plane(a = -8227.7059999999984, b =
      19863.4199999999984, c = -0.0, d = 3064707.677553001,
      surface_id = 201)
127 P211=openmc.Plane(a = 19865.999999999997, b = -8228.8239999999997,
      c = 0.0, d = 2987480.818506393, surface_id = 211)
128 P215=openmc.Plane(a = 8228.737999999997, b = 19866.000000000002, c
      = -0.0, d = 8620089.790902797, surface_id = 215)
129 P216=openmc.Plane(a = 8228.823999999997, b = 19866.086, c =
      -0.0, d = 8082498.036118199, surface_id = 216)
130 P221=openmc.Plane(a = -19866.086, b = 8228.738000000001, c =
      -0.0, d = 3196576.3369314005, surface_id = 221)
131 P231=openmc.Plane(a = -8227.7060000000033, b =
      19863.420000000002, c = -0.0, d = 8196979.799961201,
      surface_id = 231)
132 P232=openmc.Plane(a = -8227.7059999999984, b =
      19863.420000000002, c = 0.0, d = 8734480.4977738, surface_id
      = 232)
133 P236=openmc.Plane(a = 19863.420000000003, b = 8227.706, c = -0.0,
      d = 2916884.3831855995, surface_id = 236)
134 P246=openmc.Plane(a = -19863.420000000003, b =
      -8227.7059999999984, c = 0.0, d = 3266090.0957030137,
      surface_id = 246)
135 P252=openmc.Plane(a = -19865.999999999997, b = 8228.8239999999997,
      c = 0.0, d = 8329434.7881271895, surface_id = 252)
136 P256=openmc.Plane(a = 8228.737999999997, b = 19866.000000000002, c
      = -0.0, d = 2949637.523029415, surface_id = 256)
137 P306=openmc.Plane(a = 11640.960000000001, b =
      -4821.8479999999969, c = -0.0, d = 4758301.1465312,
      surface_id = 306)
138
139 #LAMINAS
140 P265=openmc.Plane(a = 221858.247500000003, b = 91896.6765, c =
      -0.0, d = 95005370.34261312, surface_id = 265)
```

```

141 P266=openmc.Plane(a = 221858.24749999997, b = 91896.75999999998
    , c = -0.0, d = 93204363.10816048, surface_id = 266)
142 P275=openmc.Plane(a = 91893.58699999997, b = 221850.8995, c =
    -0.0, d = 95362153.63923004, surface_id = 275)
143 P276=openmc.Plane(a = 91893.67050000001, b = 221850.81600000002,
    c = -0.0, d = 93562299.70413886, surface_id = 276)
144 P281=openmc.Plane(a = -91896.75999999998, b =
    221858.33100000003, c = -0.0, d = 94855526.52367081,
    surface_id = 281)
145 P282=openmc.Plane(a = -91896.67649999996, b = 221858.164, c =
    -0.0, d = 96656493.9981121, surface_id = 282)
146 P295=openmc.Plane(a = -227305.62050000002, b =
    94153.09700000004, c = -0.0, d = 99149505.67043102,
    surface_id = 295)
147 P296=openmc.Plane(a = -227305.704, b = 94153.097, c = -0.0, d =
    100993647.49214749, surface_id = 296)
148
149 #TECHO
150 P301=openmc.ZPlane(z0 = 289, surface_id = 301)
151
152 #TRAVES
153 P315=openmc.Plane(a = -7295.0, b = 17611.6875, c = -0.0, d =
    3193862.9947437495, surface_id = 315)
154 P317=openmc.Plane(a = -7294.995, b = 17611.685, c = -0.0, d =
    3003234.001878501, surface_id = 317)
155 P325=openmc.Plane(a = 7294.9974999999995, b = -17611.685, c =
    0.0, d = 2764772.158862, surface_id = 325)
156 P326=openmc.Plane(a = 250947.99999999997, b = -605841.964, c =
    0.0, d = 111502112.65295398, surface_id = 326)
157 P327=openmc.Plane(a = 7294.995, b = -17611.685, c = 0.0, d =
    3050714.0563115, surface_id = 327)
158 P366=openmc.Plane(a = 12098.2, b = 5011.24, c = 0.0, d =
    4902490.332924001, surface_id = 366)
159 P372=openmc.Plane(a = 0.0, b = -0.0, c = 4313.678998119997, d =
    1117242.8605130792, surface_id = 372)
160 P375=openmc.Plane(a = -3985.3380000000006, b =
    -1650.7800000000002, c = 0.0, d = 649928.3458704001,
    surface_id = 375)
161 P376=openmc.Plane(a = -3985.3395, b = -1650.783, c = 0.0, d =
    714634.26935025, surface_id = 376)
162 P385=openmc.Plane(a = 3985.3395, b = 1650.7815, c = -0.0, d =
    655310.7216672, surface_id = 385)
163 P386=openmc.Plane(a = 3985.3379999999997, b = 1650.78, c = -0.0,
    d = 590605.123251, surface_id = 386)
164 P391=openmc.Plane(a = -2013.6239999999998, b =
    -4861.3240000000005, c = 0.0, d = 786821.2073220001,
    surface_id = 391)
165 P392=openmc.Plane(a = -2013.628, b = -4861.3240000000005, c =
    0.0, d = 865749.0355688, surface_id = 392)
166 P394=openmc.Plane(a = 0.0, b = 0.0, c = 1973.1951185400014, d =
    589985.3404434604, surface_id = 394)

```

```
167 P401=openmc.Plane(a = -4861.32, b = 2013.6240000000003, c = 0.0,
    d = 777553.4033832, surface_id = 401)
168 P402=openmc.Plane(a = -4861.32, b = 2013.6239999999993, c =
    -0.0, d = 856481.3540543999, surface_id = 402)
169 P411=openmc.Plane(a = 4861.32, b = -2013.6240000000003, c = 0.0,
    d = 735652.5629208001, surface_id = 411)
170 P412=openmc.Plane(a = 4861.32, b = -2013.628, c = -0.0, d =
    814580.5287179999, surface_id = 412)
171 P421=openmc.Plane(a = 2013.6240000000003, b = 4861.32, c = -0.0,
    d = 726385.3084512, surface_id = 421)
172 P422=openmc.Plane(a = 2013.6279999999992, b =
    4861.3240000000005, c = -0.0, d = 805313.7066208, surface_id
    = 422)
173
174 #PERFILES
175 P511=openmc.Plane(a = 236.49840000000336, b =
    -570.95760000000081, c = -0.0, d = 123906.1194456178,
    surface_id = 511)
176 P512=openmc.Plane(a = 236.49832000000333, b =
    -570.95760000000081, c = 0.0, d = 132867.1102223459,
    surface_id = 512)
177 P514=openmc.Plane(a = 0.0, b = 0.0, c = -11201.210216099975, d =
    2876470.7834944734, surface_id = 514)
178 P523=openmc.Plane(a = 0.0, b = 0.0, c = -11201.281585799996, d =
    3174443.2014157185, surface_id = 523)
179 P524=openmc.Plane(a = 0.0, b = 0.0, c = -11201.210216099975, d =
    3183383.943415613, surface_id = 524)
180 P531=openmc.Plane(a = 7981.818300000001, b =
    -19269.813599999998, c = -0.0, d = 4317404.36447295,
    surface_id = 531)
181 P532=openmc.Plane(a = 7981.818299999999, b = -19269.8163, c =
    0.0, d = 4348690.95698496, surface_id = 532)
182 P541=openmc.Plane(a = 237.64944000000338, b =
    -573.73648000000081, c = -0.0, d = 18316.846196560262,
    surface_id = 541)
183 P542=openmc.Plane(a = 237.64944000000338, b =
    -573.73664000000082, c = 0.0, d = 27321.434311040386,
    surface_id = 542)
184 P551=openmc.Plane(a = 8080.083679999996, b =
    -19507.043039999993, c = -0.0, d = 760014.3991648802,
    surface_id = 551)
185 P552=openmc.Plane(a = 8080.083679999998, b =
    -19507.043039999993, c = 0.0, d = 791685.2274420322,
    surface_id = 552)
186 P571=openmc.Plane(a = -237.64952000000335, b =
    573.73664000000082, c = 0.0, d = 36952.9020440405, surface_id
    = 571)
187 P572=openmc.Plane(a = -237.64936000000336, b =
    573.73656000000081, c = -0.0, d = 27948.266272496403,
    surface_id = 572)
```

```

188 P581=openmc.Plane(a = -8080.080959999997, b =
      19507.043039999993, c = 0.0, d = 1119154.9904249276,
      surface_id = 581)
189 P582=openmc.Plane(a = -8080.080959999997, b =
      19507.043039999993, c = -0.0, d = 1087484.1637090556,
      surface_id = 582)
190 P601=openmc.Plane(a = -207.10824000000292, b =
      500.0036800000071, c = 0.0, d = 124749.16587811377,
      surface_id = 601)
191 P602=openmc.Plane(a = -207.10832000000295, b =
      500.0036000000071, c = -0.0, d = 116901.74999231365,
      surface_id = 602)
192 P611=openmc.Plane(a = -7041.680159999998, b =
      17000.125119999993, c = 0.0, d = 4121865.313242687,
      surface_id = 611)
193 P612=openmc.Plane(a = -7041.680159999996, b =
      17000.122399999993, c = -0.0, d = 4094263.7144972137,
      surface_id = 612)
194 P613=openmc.Plane(a = -16430.987999999999, b = 16456.186000000002,
      c = -0.0, d = 52839.269683607854, surface_id = 613)
195 P614=openmc.Plane(a = -23272.201999999997, b =
      1.805999999996101, c = -0.0, d = 164162.08055479982,
      surface_id = 614)
196 P615=openmc.Plane(a = -16450.5960000000005, b =
      -16467.1080000000015, c = 0.0, d = 180945.53181479778,
      surface_id = 615)
197
198 #VACIO HACIA AFUERA
199 P650=openmc.ZPlane(z0= 414, surface_id = 650,
      boundary_type='vacuum')
200 P660=openmc.ZPlane(z0= -736, surface_id = 660,
      boundary_type='vacuum')
201 Cz670=openmc.ZCylinder(x0 = 0, y0 = 0, r = 700, surface_id =
      670, boundary_type='vacuum')
202
203 #DETECTOR
204 S801=openmc.Sphere(x0 = 0, y0 = 110, z0 = 0, r= 12.5, surface_id
      = 801)
205 P812=openmc.ZPlane(z0= -0.1, surface_id = 812)
206 P813=openmc.ZPlane(z0= 0.1, surface_id = 813)
207 Cz814=openmc.ZCylinder(x0 = 0, y0 = 110, r= 0.5 , surface_id =
      814)
208 Cz821=openmc.ZCylinder(x0 = 0, y0 = 110, r= 2.54 , surface_id =
      821)
209 Cz822=openmc.ZCylinder(x0 = 0, y0 = 110, r= 1.905 , surface_id =
      822)
210 rpp823=openmc.model.RectangularParallelepiped(xmin = -10, xmax =
      10, ymin = 100, ymax = 120, zmin = -43.135, zmax = -42.5)
211
212 #CONO
213 cono1=openmc.model.YConeOneSided(x0 = 0, y0 = -21.7523, z0 = 0,
      r2 = 0.01094137, up=True, surface_id=901)

```

```

214 conoP902=openmc.YPlane(y0 = 10, surface_id = 902) #mas 31.7523cm
215 conoP903=openmc.YPlane(y0 = 26, surface_id = 903) #mas 16cm
216 conoP904=openmc.YPlane(y0 = 60, surface_id = 904) #mas 34cm
217
218 #TORNO
219 rpp1100=openmc.model.RectangularParallelepiped(xmin = -17.5,
          xmax = 17.5, ymin = 195, ymax = 245, zmin = -144.25, zmax =
          -130)
220 rpp1200=openmc.model.RectangularParallelepiped(xmin = -12.5,
          xmax = 12.5, ymin = 0, ymax = 195, zmin = -144.25, zmax =
          -141.24)
221
222 #PRENSA
223 rpp1301=openmc.model.RectangularParallelepiped(xmin = -1.15,
          xmax = 1.15, ymin = 98, ymax = 107.5, zmin = -42.5, zmax =
          -38.5)#ARRIBA
224 rpp1302=openmc.model.RectangularParallelepiped(xmin = -1.15,
          xmax = 1.15, ymin = 98, ymax = 107.5, zmin = -67.5, zmax =
          -63.5)#ABAJO
225 rpp1303=openmc.model.RectangularParallelepiped(xmin = -1.15,
          xmax = 1.15, ymin = 93, ymax = 98, zmin = -67.5, zmax =
          -38.5) #LARGA
226 Cz1304=openmc.ZCylinder(x0 = 0, y0 = 102, r= 0.5 , surface_id =
          1304)
227 P1305=openmc.ZPlane(z0 = -72.4, surface_id=1305)
228
229 #CELDAS
230 #####
231
232 #VACIO
233 cell0=openmc.Cell(cell_id=1, region= +Cz670 | +P650 | -P660)
234
235 #MUR0S EXTERIORES
236 cell1=openmc.Cell(cell_id=101, fill=concreto, region= -P115 &
          -P116 & -P114 & -P113 & -P111 & +P112) #MUR07
237 cell2=openmc.Cell(cell_id=102, fill=concreto, region= (-P115 &
          -P154 & -P114 & -P112 & +P123 & +P142 ) | (-P115 & -P154 &
          +P256 & +P142 & -P123 ) ) #MUR05
238 cell3=openmc.Cell(cell_id=103, fill=concreto, region= -P115 &
          -P116 & -P112 & +P134 & -P113 & +P166 & -P132 & -P161)#MUR010
239 cell4=openmc.Cell(cell_id=104, fill=ladrillo, region= -P142 &
          +P141 & -P112 & +P145 & -P143 & -P144)#MUR0ALMACEN1
240 cell5=openmc.Cell(cell_id=105, fill=concreto, region= -P115 &
          -P116 & -P151 & +P152 & +P155 & -P134)#MUR0LABERINTO
241 cell6=openmc.Cell(cell_id=106, fill=concreto, region= (-P115 &
          -P116 & +P252 & +P165 & -P134) | (-P115 & -P116 & +P134 &
          +P165 & -P166 & -P161))
242 cell7=openmc.Cell(cell_id=107, fill=ladrillo, region= -P143 &
          -P144 & +P141 & -P142 & +P176 & -P123 & +P192 & -P256
          )#MUR0ALMACEN
243
244 #COLUMNAS

```

```

245 cell8=openmc.Cell(cell_id=108, fill=concreto, region= -P115 &
    -P154 & -P142 & -P114 & +P306 & +P256)#COLUMNA500
246 cell9=openmc.Cell(cell_id=109, fill=concreto, region= (-P115 &
    -P116 & +P201 & -P114 & +P196 & -P613) | (-P115 & -P116 &
    +P613 & +P216 & -P215 & +P211 & -P114) | (-P115 & -P116 &
    -P613 & -P196 & +P216))
247 cell10=openmc.Cell(cell_id=110, fill=concreto, region=(-P115 &
    -P116 & +P236 & +P231 & +P614 & -P232) | (-P115 & -P116 &
    +P216 & +P614 & -P231) | (-P115 & -P116 & -P614 & +P216 &
    +P221 & -P215 & -P232))#COLUMNA2
248 cell11=openmc.Cell(cell_id=111 , fill=concreto , region= (-P115
    & -P116 & +P246 & +P231 & -P232 & -P615) | (-P115 & -P116 &
    -P252 & +P615 & +P231 & -P232) | (-P115 & -P116 & +P252 &
    -P161 & +P256 & +P615 & -P232)) #COLUMNA1200
249
250 #LAMINAS
251 cell12=openmc.Cell(cell_id=112 , fill=aceroc , region= -P115 &
    -P154 & -P201 & +P266 & -P265 & -P306)#LAMINA5
252 cell13=openmc.Cell(cell_id=113 , fill=aceroc , region= -P115 &
    -P154 & -P221 & -P211 & +P276 & -P275 & -P154)#LAMINA2
253 cell14=openmc.Cell(cell_id=114 , fill=aceroc , region= -P115 &
    -P154 & +P281 & -P282 & -P246 & -P236)#LAMINA1
254 cell15=openmc.Cell(cell_id=115 , fill=aceroc , region= -P115 &
    -P154 & -P165 & -P256 & +P295 & -P296)#LAMINA11
255
256 #TRAVES
257 cell16=openmc.Cell(cell_id=116 , fill=concreto , region= (-P116
    & +P154 & +P201 & -P315 & -P216 & -P196 & -P252 & -P134) |
    (-P116 & +P154 & +P252 & -P165 & -P315 & -P252))#TRAVE1
258 cell17=openmc.Cell(cell_id=117 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P154 & +P325 & -P326 & -P134 & -P152 & -P366)#TRAVE2
259 cell18=openmc.Cell(cell_id=118 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P154 & -P165 & -P256 & +P252 & -P161)#TRAVE SOBRE LAMINA11
260 cell19=openmc.Cell(cell_id=119 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P154 & -P246 & -P236 & +P231 & -P282)#TRAVE SOBRE LAMINA1
261 cell20=openmc.Cell(cell_id=120 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P154 & -P215 & +P216 & -P221 & -P211)#TRAVE SOBRE LAMINA2
262 cell21=openmc.Cell(cell_id=121 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P154 & -P112 & -P201 & +P366 & -P114)#TRAVE SOBRE LAMINAS
263 cell22=openmc.Cell(cell_id=122 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P372 & +P375 & -P376 & -P201 & -P325)#TRAVE BOVEDA 1
264 cell23=openmc.Cell(cell_id=123 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P372 & +P386 & -P385 & -P201 & -P325)#TRAVE BOVEDA 2
265 cell24=openmc.Cell(cell_id=124 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P372 & -P392 & +P391 & -P375 & -P325)#TRAVE BOVEDA 3
266 cell25=openmc.Cell(cell_id=125 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P372 & +P401 & -P402 & -P375 & -P201)#TRAVE BOVEDA 4
267 cell26=openmc.Cell(cell_id=126 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P372 & -P412 & +P411 & -P386 & -P325)#TRAVE BOVEDA 5
268 cell27=openmc.Cell(cell_id=127 , fill=concreto , region= -P116 &
    +P372 & +P421 & -P422 & -P386 & -P201)#TRAVE BOVEDA 6
269 #MUIROS SOBRE TRAVES

```

```

270 cell28=openmc.Cell(cell_id=128 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & +P375 & -P376 & -P317 & -P327)#MURO SOBRE TRAVE
    BOVEDA 1
271 cell29=openmc.Cell(cell_id=129 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & +P386 & -P385 & -P317 & -P327)#MURO SOBRE TRAVE
    BOVEDA 2
272 cell30=openmc.Cell(cell_id=130 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & -P392 & +P391 & -P375 & -P325)#MURO SOBRE TRAVE
    BOVEDA 3
273 cell31=openmc.Cell(cell_id=131 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & +P401 & -P402 & -P375 & -P201)#MURO SOBRE TRAVE
    BOVEDA 4
274 cell32=openmc.Cell(cell_id=132 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & -P412 & +P411 & -P386 & -P325)#MURO SOBRE TRAVE
    BOVEDA 5
275 cell33=openmc.Cell(cell_id=133 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & +P421 & -P422 & -P386 & -P201)#MURO SOBRE TRAVE
    BOVEDA 6
276 cell34=openmc.Cell(cell_id=134 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & +P201 & -P317 & -P402 & -P422)#MURO SOBRE TRAVE 1
277 cell35=openmc.Cell(cell_id=135 , fill=ladrillo , region= +P301 &
    -P394 & -P327 & +P325 & -P392 & -P412)#MURO SOBRE TRAVE 2
278
279 #PERFILES DEL SUELO REJADO I
280 cell36=openmc.Cell(cell_id=136 , fill=hierro , region= +P143 &
    -P514 & +P511 & -P512 & -P152 & -P123)
281 cell37=openmc.Cell(cell_id=137 , fill=hierro , region= +P511 &
    -P512 & -P152 & -P123 & +P523 & -P524)
282 cell38=openmc.Cell(cell_id=138 , fill=hierro , region= -P523 &
    +P514 & -P152 & -P123 & -P532 & +P531)
283 cell39=openmc.Cell(cell_id=139 , fill=hierro , region= -P134 &
    -P266 & -P514 & +P143 & -P542 & +P541)
284 cell40=openmc.Cell(cell_id=140 , fill=hierro , region= -P552 &
    +P551 & -P523 & +P514 & -P134 & -P266)
285 cell41=openmc.Cell(cell_id=141 , fill=hierro , region= -P542 &
    +P541 & +P523 & -P524 & -P134 & -P266)
286 cell42=openmc.Cell(cell_id=142 , fill=hierro , region= +P572 &
    -P571 & -P514 & +P143 & -P134 & -P266)
287 cell43=openmc.Cell(cell_id=143 , fill=hierro , region= +P582 &
    -P581 & -P523 & +P514 & -P134 & -P266)
288 cell44=openmc.Cell(cell_id=144 , fill=hierro , region= +P572 &
    -P571 & +P523 & -P524 & -P134 & -P266)
289 cell45=openmc.Cell(cell_id=145 , fill=hierro , region= +P602 &
    -P601 & +P143 & -P514 & -P295 & -P276)
290 cell46=openmc.Cell(cell_id=146 , fill=hierro , region= +P612 &
    -P611 & +P514 & -P523 & -P295 & -P276)
291 cell47=openmc.Cell(cell_id=147 , fill=hierro , region= -P524 &
    +P523 & +P602 & -P601 & -P295 & -P276)
292
293 #AIRE DENTRO DE LA SALA
294
295 #EN ALTURA -580 A -290

```

```

296 cell48=openmc.Cell(cell_id=148 , region= (+P524 & -P115 & +P151
      & -P134 & -P112) | (+P524 & -P115 & -P152 & +P155 & +P165 &
      -P134 & -P252) | (+P524 & -P115 & -P155 & -P151 & -P112 &
      -P123 & -P256) | (+P524 & -P115 & +P155 & -P165 & -P256 &
      -P295))
297 cell49=openmc.Cell(cell_id=149 , region= +P524 & -P115 & +P256 &
      -P266 & -P306 & -P201)
298 cell50=openmc.Cell(cell_id=150 , region= +P524 & -P115 & +P201 &
      +P256 & -P252 & -P231 & -P236)
299 cell51=openmc.Cell(cell_id=151 , region= +P524 & -P115 & +P231 &
      -P281 & -P246 & -P236)
300 cell52=openmc.Cell(cell_id=152 , region= +P524 & -P115 & +P236 &
      +P201 & -P231 & -P216 & -P196)
301 cell53=openmc.Cell(cell_id=153 , region= +P524 & -P115 & -P211 &
      -P276 & +P216 & -P221)
302
303 #AIRE EN PERFILES
304 #EN ALTURA -290 A -250
305 #SECCION1
306 cell54=openmc.Cell(cell_id=154 , region= -P524 & +P523 & +P601 &
      -P295 & -P256)
307 cell55=openmc.Cell(cell_id=155 , region= -P524 & +P523 & +P256 &
      -P252 & -P231 & +P601 & -P231 & -P216)
308 cell56=openmc.Cell(cell_id=156 , region= -P524 & +P523 & -P246 &
      +P231 & -P281 & -P236)
309 cell57=openmc.Cell(cell_id=157 , region= -P524 & +P523 & +P216 &
      -P276 & +P601 & -P221)
310 cell58=openmc.Cell(cell_id=158 , region= -P523 & +P514 & +P611 &
      -P295 & -P256)
311 cell59=openmc.Cell(cell_id=159 , region= -P523 & +P514 & +P256 &
      -P252 & -P231 & +P611 & -P231 & -P216)
312 cell60=openmc.Cell(cell_id=160 , region= -P523 & +P514 & -P246 &
      +P231 & -P281 & -P236)
313 cell61=openmc.Cell(cell_id=161 , region= -P523 & +P514 & +P216 &
      -P276 & +P611 & -P221)
314 cell62=openmc.Cell(cell_id=162 , region= -P514 & +P143 & +P601 &
      -P295 & -P256)
315 cell63=openmc.Cell(cell_id=163 , region= -P514 & +P143 & +P256 &
      -P252 & -P231 & +P601 & -P231 & -P216)
316 cell64=openmc.Cell(cell_id=164 , region= -P514 & +P143 & -P246 &
      +P231 & -P281 & -P236)
317 cell65=openmc.Cell(cell_id=165 , region= -P514 & +P143 & +P216 &
      -P276 & +P601 & -P221)
318 #SECCION2
319 cell66=openmc.Cell(cell_id=166 , region= -P524 & +P523 & +P571 &
      -P134 & -P252 & +P165 )
320 cell67=openmc.Cell(cell_id=167 , region= -P524 & +P523 & -P165 &
      +P571 & -P602 & -P295 & -P276 & -P211)
321 cell68=openmc.Cell(cell_id=168 , region= -P524 & +P523 & +P211 &
      +P571 & -P216 & -P196)
322 cell69=openmc.Cell(cell_id=169 , region= -P524 & +P523 & +P196 &
      -P266 & +P571 & -P201)

```

```
323 cell70=openmc.Cell(cell_id=170 , region= -P523 & +P514 & +P581 &
    -P134 & -P252 & +P165)
324 cell71=openmc.Cell(cell_id=171 , region= -P523 & +P514 & -P165 &
    +P581 & -P612 & -P295 & -P276 & -P211)
325 cell72=openmc.Cell(cell_id=172 , region= -P523 & +P514 & +P211 &
    +P581 & -P216 & -P196)
326 cell73=openmc.Cell(cell_id=173 , region= -P523 & +P514 & +P196 &
    -P266 & +P581 & -P201)
327 cell74=openmc.Cell(cell_id=174 , region= -P514 & +P143 & +P571 &
    -P134 & -P252 & +P165)
328 cell75=openmc.Cell(cell_id=175 , region= -P514 & +P143 & -P165 &
    +P571 & -P602 & -P295 & -P276 & -P211)
329 cell76=openmc.Cell(cell_id=176 , region= -P514 & +P143 & +P211 &
    +P571 & -P216 & -P196)
330 cell77=openmc.Cell(cell_id=177 , region= -P514 & +P143 & +P196 &
    -P266 & +P571 & -P201)
331 #SECCION3
332 cell78=openmc.Cell(cell_id=178 , region= -P524 & +P523 & -P134 &
    -P266 & -P541 & -P572)
333 cell79=openmc.Cell(cell_id=179 , region= -P523 & +P514 & -P134 &
    -P266 & -P541 & -P582)
334 cell80=openmc.Cell(cell_id=180 , region= -P514 & +P143 & -P134 &
    -P266 & -P541 & -P572)
335 #SECCION4
336 cell81=openmc.Cell(cell_id=181 , region= -P256 & -P123 & -P511 &
    +P542 & -P152 & -P134 & -P524 & +P523)
337 cell82=openmc.Cell(cell_id=182 , region= -P524 & +P523 & +P542 &
    +P256 & -P266 & -P306)
338 cell83=openmc.Cell(cell_id=183 , region= -P256 & -P152 & -P134 &
    +P552 & -P531 & -P123 & -P523 & +P514)
339 cell84=openmc.Cell(cell_id=184 , region= +P256 & -P266 & -P306 &
    +P552 & +P514 & -P523)
340 cell85=openmc.Cell(cell_id=185 , region= -P134 & -P266 & -P551 &
    +P541 & +P514 & -P523)
341 cell86=openmc.Cell(cell_id=186 , region= -P134 & +P542 & -P152 &
    -P511 & -P266 & -P306 & -P514 & +P143)
342 cell87=openmc.Cell(cell_id=187 , region= -P514 & +P143 & +P306 &
    -P511 & -P123 & -P256)
343 #SECCION5
344 cell88=openmc.Cell(cell_id=188 , region= -P123 & +P512 & -P152 &
    -P112 & -P524 & +P523)
345 cell89=openmc.Cell(cell_id=189 , region= +P152 & -P112 & -P155 &
    -P134 & -P524 & +P523)
346 cell90=openmc.Cell(cell_id=190 , region= -P134 & +P155 & +P151 &
    -P524 & +P523)
347 cell91=openmc.Cell(cell_id=191 , region= -P123 & -P112 & -P152 &
    +P532 & -P523 & +P514)
348 cell92=openmc.Cell(cell_id=192 , region= +P152 & -P112 & -P134 &
    -P155 & -P523 & +P514)
349 cell93=openmc.Cell(cell_id=193 , region= -P134 & +P155 & -P523 &
    +P514 & +P151)
```

```

350 cell94=openmc.Cell(cell_id=194 , region= -P123 & -P112 & -P152 &
      +P512 & -P514 & +P143)
351 cell95=openmc.Cell(cell_id=195 , region= +P152 & -P112 & -P134 &
      -P155 & -P514 & +P143)
352 cell96=openmc.Cell(cell_id=196 , region= -P514 & +P143 & -P134 &
      +P155 & +P151)
353
354 #EN ALTURA -250 A 114
355 #AIRE CON INSTRUMENTOS SECCION MEDIA
356 soporte = -Cz821 & +S801 & +rpp823.zmax & -P812
357 tornillo= -Cz1304 & +P1305 & -rpp823.zmin
358 regioncono1= (-cono1 & +conoP902 & -conoP903) | (-cono1 &
      +conoP903 & -conoP904)
359 region2= +P152 & -P143 & -P144 & -P112 & -P151 & -P155 & -P211
360 region1= (-P276 & -P211 & -P221 & -P152 & -P143 & -P144 & +S801
      & +rpp823 & +rpp1100 & +rpp1200 & +rpp1301 & +rpp1302 &
      +rpp1303) | (region2)
361 regionaire= region1 & ~regioncono1 & ~tornillo & ~soporte
362
363 cell97=openmc.Cell(cell_id=197 , region=regionaire)
364 cell98=openmc.Cell(cell_id=198 , region= +P151 & -P134 & -P112 &
      -P143 & -P144)
365 cell99=openmc.Cell(cell_id=199 , region= (+P221 & -P134 & -P152
      & -P252 & -P231 & -P143 & -P144 & -P216) | (+P252 & -P295 &
      -P165 & -P256 & -P143 & -P144) | (+P231 & -P281 & -P246 &
      -P236 & -P143 & -P144))
366 cell100=openmc.Cell(cell_id=200 , region= (+P211 & -P112 & -P143
      & -P144 & -P306 & -P266 & -P201) | (+P211 & +P201 & -P216 &
      -P196 & -P143 & -P144) | (+P306 & -P141 & -P112 & -P256 &
      -P143 & -P144))
367 cell101=openmc.Cell(cell_id=201 , region= (-P112 & +P142 & -P256
      & -P123 & -P143 & -P144) | (-P142 & +P141 & -P145 & -P176 &
      -P143 & -P144))
368
369 #EN ALTURA 114 A 250
370 cell102=openmc.Cell(cell_id=202 , region= (-P295 & -P256 & -P165
      & -P123 & -P112 & +P144 & -P154) | (+P144 & -P154 & +P256 &
      +P246 & -P231 & -P252))
371 cell103=openmc.Cell(cell_id=203 , region= (+P165 & -P112 & -P152
      & -P134 & -P252 & +P144 & -P154) | (+P152 & -P155 & -P151 &
      -P112 & +P144 & -P154) | (-P112 & -P134 & +P151 & +P144 &
      -P154))
372 cell104=openmc.Cell(cell_id=204 , region= (+P256 & -P246 & -P281
      & -P236 & +P144 & -P154) | (+P236 & +P614 & -P231 & +P144 &
      -P154) | (-P614 & +P256 & -P216 & +P613 & +P144 & -P154) |
      (+P256 & -P613 & -P196 & -P306 & +P144 & -P154) | (-P306 &
      +P196 & -P266 & -P201 & +P144 & -P154) | (-P211 & +P216 &
      -P276 & -P221 & +P144 & -P154))
373
374 #EN ALTURA 250 A 259
375 cell105=openmc.Cell(cell_id=205 , region= -P252 & -P231 & -P216
      & +P315 & +P154 & -P372)

```

```

376 cell106=openmc.Cell(cell_id=206 , region= -P134 & -P366 & -P325
    & -P201 & +P154 & -P372)
377 cell107=openmc.Cell(cell_id=207 , region= (-P152 & +P326 & -P366
    & -P112 & +P154 & -P372) | (+P152 & -P155 & -P151 & -P112 &
    +P154 & -P372) | (-P134 & +P151 & -P112 & +P154 & -P372))
378
379 #EN ALTURA 259 A 274
380 cell108=openmc.Cell(cell_id=208 , region= +P315 & -P216 & -P231
    & -P252 & +P372 & -P116)
381 cell109=openmc.Cell(cell_id=209 , region= -P134 & +P376 & -P201
    & -P325 & +P372 & -P116)
382 cell110=openmc.Cell(cell_id=210 , region= +P385 & -P366 & -P325
    & -P201 & +P372 & -P116)
383 cell111=openmc.Cell(cell_id=211 , region= -P375 & -P401 & -P201
    & -P421 & -P386 & -P411 & -P325 & -P391 & +P372 & -P116)
384 cell112=openmc.Cell(cell_id=212 , region= -P375 & +P402 & -P201
    & +P372 & -P116)
385 cell113=openmc.Cell(cell_id=213 , region= +P422 & -P386 & -P201
    & +P372 & -P116)
386 cell114=openmc.Cell(cell_id=214 , region= -P325 & -P375 & +P372
    & +P392 & -P116)
387 cell115=openmc.Cell(cell_id=215 , region= -P325 & -P386 & +P412
    & +P372 & -P116)
388 cell116=openmc.Cell(cell_id=216 , region= (-P112 & -P366 & +P326
    & -P152 & +P372 & -P116) | (-P155 & +P152 & -P112 & -P151 &
    +P372 & -P116) | (-P112 & -P134 & +P151 & +P372 & -P116))
389 cell117=openmc.Cell(cell_id=217 , region= -P375 & -P401 & -P201
    & -P421 & -P386 & -P411 & -P325 & -P391 & +P116 & -P394)
390
391 #AIRE FUERA DE LA SALA
392 cell118=openmc.Cell(cell_id=218 , region= -P650 & -Cz670 & +P394)
393
394 cell119=openmc.Cell(cell_id=219 , region= (+P376 & -Cz670 &
    +P301 & -P394) | (-P394 & -Cz670 & +P301 & +P385) | (-P394 &
    -Cz670 & +P301 & +P327) | (-P394 & -Cz670 & +P301 & -P375 &
    +P392 & -P327) | (-P394 & -Cz670 & +P301 & -P327 & -P386 &
    +P412) | (-P394 & -Cz670 & +P301 & -P375 & +P402 & -P317) |
    (-P394 & -Cz670 & +P301 & +P422 & -P386 & -P317) | (-P394 &
    -Cz670 & +P301 & +P317))
395
396 cell120=openmc.Cell(cell_id=220 , region= (+P372 & -P116 &
    -Cz670 & -P232 & -P246 & -P236 & +P282 ) | (+P372 & -P116 &
    -Cz670 & +P232 ) | (+P372 & -P116 & -Cz670 & +P215 ) |
    (+P372 & -P116 & -Cz670 & +P215 ) | (+P372 & -P116 & -Cz670
    & +P161 ) | (+P372 & -P116 & -Cz670 & +P113 ) | (+P372 &
    -P116 & -Cz670 & +P111 ) | (+P372 & -P116 & -Cz670 & +P114 ))
397
398 cell121=openmc.Cell(cell_id=221 , region= (+P154 & -P372 &
    -Cz670 & +P111) | (+P154 & -P372 & -Cz670 & +P114) | (+P154
    & -P372 & -Cz670 & +P215) | (+P154 & -P372 & -Cz670 & +P232)
    | (+P154 & -P372 & -Cz670 & +P282 & -P232 & -P236 & -P246) |

```

```

(+P154 & -P372 & -Cz670 & +P161) | (+P154 & -P372 & -Cz670 &
+P113))
399
400 cell122=openmc.Cell(cell_id=222 , region= (+P144 & -P154 &
-Cz670 & +P111 ) | (+P144 & -P154 & -Cz670 & +P114 & -P613 )
| (+P144 & -P154 & -Cz670 & -P306 & +P265 & -P201 & -P114 )
| (+P144 & -P154 & -Cz670 & +P215 & +P613 ) | (+P144 & -P154
& -Cz670 & +P275 & -P215 & -P221 & -P211 ) | (+P144 & -P154
& -Cz670 & +P232 & -P615 ) | (+P144 & -P154 & -Cz670 & +P232
& +P615 & -P161 ) | (+P144 & -P154 & -Cz670 & +P161 ) |
(+P144 & -P154 & -Cz670 & -P246 & -P236 & +P282 & -P232 ) |
(+P144 & -P154 & -Cz670 & -P161 & -P165 & +P296 & -P256 ) |
(+P144 & -P154 & -Cz670 & +P113 & +P161 ) | (+P144 & -P154 &
-Cz670 & +P613 & +P114 & -P215 ) | (+P144 & -P154 & -Cz670 &
+P114 & +P613 & -P215 ) | (+P144 & -P154 & -Cz670 & -P111 &
+P113 & -P161 ))
401
402 cell123=openmc.Cell(cell_id=223 , region= (-P144 & -P143 &
-Cz670 & +P113 ) | (-P144 & -P143 & -Cz670 & +P111 ) |
(-P144 & -P143 & -Cz670 & +P114 & -P613 ) | (-P144 & -P143 &
-Cz670 & +P265 & -P201 & -P306 ) | (-P144 & -P143 & -Cz670 &
+P215 ) | (-P144 & -P143 & -Cz670 & +P275 & -P215 & -P211 &
-P221 & +P613 ) | (-P144 & -P143 & -Cz670 & +P232 & -P615 )
| (-P144 & -P143 & -Cz670 & -P236 & +P282 & -P232 & -P246 )
| (-P144 & -P143 & -Cz670 & +P161 & +P615 ) | (-P144 & -P143
& -Cz670 & -P165 & +P296 & -P161 & -P256 ) | (-P144 & -P143
& -Cz670 & +P613 & -P215 & +P114 ) | (-P144 & -P143 & -Cz670
& +P232 & +P615 & -P161 ))
403
404 #TIERRA ALREDEDOR DEL SOTANO
405 cell124=openmc.Cell(cell_id=224 , fill=tierra , region= (+P143 &
-P115 & -Cz670 & +P111) | (+P143 & -P115 & -Cz670 & +P114 &
-P613) | (+P143 & -P115 & -Cz670 & +P215 & +P613) | (+P143 &
-P115 & -Cz670 & -P211 & +P275 & -P215 & -P221) | (+P143 &
-P115 & -Cz670 & +P232) | (+P143 & -P115 & -Cz670 & -P236 &
+P282 & -P232 & -P246) | (+P143 & -P115 & -Cz670 & +P161) |
(+P143 & -P115 & -Cz670 & +P296 & -P161 & -P256 & -P165) |
(+P143 & -P115 & -Cz670 & +P113) | (+P143 & -P115 & -Cz670 &
-P306 & +P265 & -P114 & -P201) | (+P143 & -P115 & -Cz670 &
+P114 & +P613 & -P215 ))
406 cell125=openmc.Cell(cell_id=225 , fill=tierra , region= +P115 &
+P660 & -Cz670)
407
408 #TECHO
409 cell126=openmc.Cell(cell_id=226, fill=concreto, region= +P116 &
-P301 & -P113 & -P111 & +P375 & -P161 & -P232)
410 cell127=openmc.Cell(cell_id=227, fill=concreto, region= +P116 &
-P301 & -P232 & -P375 & +P201 & -P215 & -P114)
411 cell128=openmc.Cell(cell_id=228, fill=concreto, region= +P116 &
-P301 & -P201 & -P114 & +P386 & -P111)
412 cell129=openmc.Cell(cell_id=229, fill=concreto, region= +P116 &
-P301 & -P111 & -P375 & -P386 & +P325)

```

```

413 cell130=openmc.Cell(cell_id=230, fill=concreto, region= +P116 &
    -P301 & -P325 & -P375 & +P391)
414 cell131=openmc.Cell(cell_id=231, fill=concreto, region= +P116 &
    -P301 & -P325 & -P386 & +P411)
415 cell132=openmc.Cell(cell_id=232, fill=concreto, region= +P116 &
    -P301 & -P375 & +P401 & -P201)
416 cell133=openmc.Cell(cell_id=233, fill=concreto, region= +P116 &
    -P301 & -P386 & -P201 & +P421)
417 cell134=openmc.Cell(cell_id=241, region= +P116 & -P301 & -Cz670
    & +P113)
418 cell135=openmc.Cell(cell_id=242, region= +P116 & -P301 & -Cz670
    & -P113 & +P161)
419 cell136=openmc.Cell(cell_id=243, region= +P116 & -P301 & -Cz670
    & +P232 & -P161)
420 cell137=openmc.Cell(cell_id=244, region= +P116 & -P301 & -Cz670
    & -P232 & +P215)
421 cell138=openmc.Cell(cell_id=245, region= +P116 & -P301 & -Cz670
    & -P215 & +P114)
422 cell139=openmc.Cell(cell_id=246, region= +P116 & -P301 & -Cz670
    & -P114 & -P113 & +P111)
423
424 #TORNO
425 cell140=openmc.Cell(cell_id=300, fill=aceroc, region=-rpp1100)
426 cell141=openmc.Cell(cell_id=301, fill=hierro, region=-rpp1200)
427
428 #PRENSA
429 cell142=openmc.Cell(cell_id=304, fill=hierro, region= (-rpp1301)
    | (-rpp1302) | (-rpp1303))
430 cell143=openmc.Cell(cell_id=305, fill=aceroc, region= -Cz1304 &
    +P1305 & -rpp823.zmin)
431
432 #DETECTOR
433 cristal=-Cz814 & +P812 & -P813
434 cell144=openmc.Cell(cell_id=307, fill=polietil, region= -S801 &
    ~cristal)
435 cell145=openmc.Cell(cell_id=308, fill=litio, region= cristal)
436 cell146=openmc.Cell(cell_id=309, fill=hierro, region= -rpp823)
437 airesoporte = -Cz822 & +S801 & +rpp823.zmin & -P812
438 cell147=openmc.Cell(cell_id=310, fill=hierro, region= soporte &
    ~airesoporte)
439 cell148=openmc.Cell(cell_id=311, region= airesoporte)
440
441 #CONO
442 cell149=openmc.Cell(cell_id = 312, fill=hierro, region=+conoP902
    & -conoP903 & -cono1)
443 cell150=openmc.Cell(cell_id = 313, fill=parafina,
    region=+conoP903 & -conoP904 & -cono1)
444
445 cells=[]
446
447 for i in range(0, 151):
448     cells.append(globals()[f'cell{i}'])

```

```

449
450 universe = openmc.Universe(cells=cells)
451
452
453 geometry = openmc.Geometry(universe)
454
455 geometry.export_to_xml()
456
457 # Definicion de los parametros
458
459 settings = openmc.Settings()
460 settings.run_mode = 'fixed source'
461 settings.batches = 100
462 settings.particles = 100000
463
464 # Definicion fuente
465
466 AmBeFuente = openmc.IndependentSource()
467
468 Energia = [4.14e-07, 1.10e-01, 3.30e-01, 5.40e-01, 7.50e-01,
           9.70e-01, 1.18e+00, 1.40e+00, 1.61e+00, 1.82e+00, 2.04e+00,
           2.25e+00, 2.47e+00, 2.68e+00, 2.90e+00, 3.11e+00, 3.32e+00,
           3.54e+00, 3.75e+00, 3.97e+00, 4.18e+00, 4.39e+00, 4.61e+00,
           4.82e+00, 5.04e+00, 5.25e+00, 5.47e+00, 5.68e+00, 5.89e+00,
           6.11e+00, 6.32e+00, 6.54e+00, 6.75e+00, 6.96e+00, 7.18e+00,
           7.39e+00, 7.61e+00, 7.82e+00, 8.03e+00, 8.25e+00, 8.46e+00,
           8.68e+00, 8.89e+00, 9.11e+00, 9.32e+00, 9.53e+00, 9.75e+00,
           9.96e+00, 1.02e+01, 1.04e+01, 1.06e+01, 1.08e+01]
469
470 Intensidad = [1.44E-02, 3.34E-02, 3.13E-02, 2.81E-02, 2.50E-02,
              2.14E-02, 1.98E-02, 1.75E-02, 1.92E-02, 2.23E-02, 2.15E-02,
              2.25E-02, 2.28E-02, 2.95E-02, 3.56E-02, 3.69E-02, 3.46E-02,
              3.07E-02, 3.00E-02, 2.69E-02, 2.86E-02, 3.18E-02, 3.07E-02,
              3.33E-02, 3.04E-02, 2.74E-02, 2.33E-02, 2.06E-02, 1.82E-02,
              1.77E-02, 2.04E-02, 1.83E-02, 1.63E-02, 1.68E-02, 1.68E-02,
              1.88E-02, 1.84E-02, 1.69E-02, 1.44E-02, 9.68E-03, 6.52E-03,
              4.26E-03, 3.67E-03, 3.81E-03, 5.06E-03, 6.25E-03, 5.52E-03,
              4.68E-03, 3.70E-03, 2.78E-03, 1.51E-03, 3.63E-04]
471
472 AmBeFuente.energy = openmc.stats.Tabular(Energia, Intensidad,
           'histogram')
473 AmBeFuente.angle = openmc.stats.Isotropic()
474 AmBeFuente.strength = 9003620.24
475 AmBeFuente.particle = 'neutron'
476
477 r=1.06
478 zmin = -1.25
479 zmax = 1.25
480 xcentro = 0
481 ycentro = 0
482
483 AmBeFuente.space = openmc.stats.Point(xyz=(0,0,0))

```

```
484
485 settings.source = AmBeFuente
486
487
488 settings.export_to_xml()
489
490
491 #Definicion Tallies
492
493 cell145_filter = openmc.CellFilter(cell145)
494
495 T1 = openmc.Tally(name = 'Tally Fluencia')
496 T1.scores = ['flux']
497 T1.filters = [cell145_filter]
498 T1.multiply_density = True
499
500 tallies = openmc.Tallies([T1])
501 tallies.export_to_xml()
```

## PRODUCTOS DE LA TESIS

---

La elaboración de este trabajo brindó la oportunidad de participar en el siguiente congreso, seminarios y la publicación de un artículo sobre los temas de esta tesis.

- Ponente en formato de poster en el "XLVI Symposium on Nuclear Physics", celebrado en Cocoyoc, Morelos, México del 6 al 9 de enero del 2025.
- Participación en el seminario estudiantil "Esteban Bárcenas Guevara", con la ponencia "Evaluación de la corrección por dispersión de neutrones usando el método semiempírico y el método de conos de sombra para el campo de referencia del LSCD-ININ" organizado por la Facultad de Ciencias, UAEMex el 28 de Febrero del 2025.
- Participación en el seminario de estudiantes de física nuclear y aplicaciones de la radiación con la ponencia "Determinación experimental de la contribución por dispersión de neutrones al campo de referencia del LSCD-ININ" del Instituto de Física, UNAM el 21 de febrero 2025.
- Artículo publicado en el sitio EPJ Web of Conference con el título "Experimental Determination of the Neutron Scatter Contribution to the Neutron Reference Field of the SSDL-ININ", el 1 de agosto 2025.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] University of Missouri Research Reactor (MURR). *Materials Science*. <https://www.murr.missouri.edu/research/materials-science/>. 2025.
- [2] «Preface, Executive Summary and Glossary». En: *Annals of the ICRP* 37.2-4 (2007), págs. 9-34. DOI: [10.1016/j.icrp.2007.10.003](https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003). eprint: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>.
- [3] NORMA MEXICANA IMNC. «Vocabulario internacional de metrología—Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM)». En: (2008).
- [4] International Organization for Standardization. *ISO 8529-2. Reference neutron radiations — Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field*. International Organization for Standardization, 2000.
- [5] U. Busch. «Wilhelm Conrad Roentgen. El descubrimiento de los rayos x y la creación de una nueva profesión médica». En: *Revista Argentina de Radiología* 80.4 (2016), págs. 298-307. ISSN: 0048-7619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rard.2016.08.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048761916301545>.
- [6] James Chadwick. «The existence of a neutron». En: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 136.830 (1932), págs. 692-708.
- [7] R.H. Clarke y J. Valentin. «The History of ICRP and the Evolution of its Policies». En: *Annals of the ICRP* 39.1 (2009). ICRP Publication 109, págs. 75-110. ISSN: 0146-6453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2009.07.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146645309000360>.
- [8] Dale L Preston, Yukiko Shimizu, Donald A Pierce, Akihiko Suyama y Kiyohiko Mabuchi. «Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950–1997». En: *Radiation research* 160.4 (2003), págs. 381-407.

- [9] International Atomic Energy Agency. *Neutron Interactions and Cross-sections*. IAEA Nuclear Energy Series – Basic Principles in Nuclear Science and Technology. Vienna, Austria, 2000. URL: <https://www.iaea.org>.
- [10] *Neutron Monitoring for Radiation Protection*. Safety Reports Series 115. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2023. ISBN: 978-92-0-151422-6. URL: <https://www.iaea.org/publications/15007/neutron-monitoring-for-radiation-protection>.
- [11] David J. Thomas. «ICRU report 85: fundamental quantities and units for ionizing radiation». En: *Radiation Protection Dosimetry* 150.4 (mayo de 2012), págs. 550-552. ISSN: 0144-8420. DOI: [10.1093/rpd/ncs077](https://doi.org/10.1093/rpd/ncs077). eprint: <https://academic.oup.com/rpd/article-pdf/150/4/550/4558428/ncs077.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs077>.
- [12] International Organization for Standardization. *ISO 8529-1. Neutron reference radiations fields — Part 1: Characteristics and Methods of Production*. International Organization for Standardization, 2021.
- [13] J B Hunt. «The calibration of neutron sensitive spherical devices». En: *Radiation protection dosimetry* 8.4 (1984), págs. 239-251. DOI: [10.1093/oxfordjournals.rpd.a083060](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a083060).
- [14] C.M. Eisenhauer, R.B. Schwartz y R.C. McCall. «Effect of Air Scatter on Calibration of Instruments for Detecting Neutrons». En: *Radiation Protection Dosimetry* 19.2 (jun. de 1987), págs. 77-84. ISSN: 0144-8420. DOI: [10.1093/oxfordjournals.rpd.a079923](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a079923). eprint: <https://academic.oup.com/rpd/article-pdf/19/2/77/9933552/77.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a079923>.
- [15] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML. «Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement». En: (2008). DOI: <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>.
- [16] United Kingdom Accreditation Service. *The expression of uncertainty and confidence in measurement*. United Kingdom Accreditation Service, 1997.
- [17] *The OpenMC Monte Carlo Code — OpenMC Documentation, Version 0.15.0*. Massachusetts Institute of Technology: Computational Reactor Physics Group. URL: <https://openmc.org/>.
- [18] R G Williams. «Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling». En: *PNNL-15870, Pacific North National Laboratory* (2011). DOI: [10.2172/1023125](https://doi.org/10.2172/1023125).

- [19] H. Kluge y K. Weise. «The Neutron Energy Spectrum of a  $^{241}\text{Am}$ -Be(Alpha,n) Source and Resulting Mean Fluence to Dose Equivalent Conversion Factors». En: *Radiation Protection Dosimetry* 2.2 (mar. de 1982), págs. 85-93. ISSN: 0144-8420. DOI: [10.1093/oxfordjournals.rpd.a080571](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a080571).
- [20] *Origin(Pro), Version 2009*. Northampton, MA, USA: OriginLab Corporation. URL: <https://www.originlab.com/>.
- [21] Alain Picard, R S Davis, M Gläser y K Fujii. «Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007)». En: *Metrologia* 45.2 (2008), págs. 149-155. DOI: [10.1088/0026-1394/45/2/004](https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/004).