



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DETECCIÓN DEL FLUJO DE NEUTRONES MEDIANTE
LA METODOLOGÍA DE TRAZAS
NUCLEARES EN SÓLIDOS EN UN
REACTOR NUCLEAR
DE INVESTIGACIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A :

NOMBRE DEL ALUMNO
CARLOS GONZÁLEZ BARRAGÁN

TUTOR
DR. GILLERMO CIRANO ESPINOSA GARCÍA

Ciudad Universitaria, CD. MX., 2020.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hojas de datos del jurado

1. Datos del alumno

González
Barragán
Carlos
5535129968
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
090205789

2. Datos del tutor

Dr.
Guillermo Cirano
Espinosa
García

3. Datos del sinodal 1

M. en C.
Manuel René de Jesús
Garduño
López

4. Datos del sinodal 2

Dra
María Isabel
Gamboa
de Buen

5. Datos del sinodal 3

Dra
Norma Yanet
Sánchez
Torres

6. Datos del sinodal 4

M. en C.
Sergio
Hernández
Zapata

7. Datos del trabajo escrito

Detección del flujo de neutrones mediante la metodología de trazas nucleares en sólidos en un reactor nuclear de investigación
64 p
2020

DETECCIÓN DEL FLUJO DE NEUTRONES MEDIANTE
LA METODOLOGÍA DE TRAZAS
NUCLEARES EN SÓLIDOS EN UN
REACTOR NUCLEAR
DE INVESTIGACIÓN

Agradecimientos:

Agradezco al Proyecto de *Aplicaciones de la Dosimetría* (PAD) del Instituto de Física (IF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Agradezco también al Dr. *Guillermo C. Espinosa García* por la dirección de esta tesis, por sus comentarios y asesoría.

También agradezco a *José Ignacio Golzarri*, por su apoyo técnico, haciendo posible este trabajo.

Este trabajo se desarrolló en el laboratorio del *Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría* del Instituto de Física de la UNAM. Agradezco el apoyo económico parcial del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN-102819: "Estudio de contenidos radiológicos en agua, suelo, alimentos y aire (parte V)".

A mis sinodales,

M. en C. Manuel René de Jesús Garduño López

Dra. María Isabel Gamboa de Buen

Dra. Norma Yanet Sánchez Torres

M. en C. Sergio Hernández Zapata

Por su tiempo y sus consejos para la mejora de mi tesis.

Dedicatoria:

A mis padres, Lorenzo González Romero y Antonia Barragán Martínez.

A mi esposa, Blanca Rosa Díaz Sánchez.

A mis hijos, Sara Patricia y Carlos Alfonso.

A mis hermanos: Leticia, Diana, Armando y Omar, por su apoyo e impulso a seguir.

A todos mis compañeros de la Facultad: Tania Santiago, Norma Yaneth Sánchez, Elizabeth Martínez, David Bucio, Walter Galván, Marco Barragán y Pedro Cervera; del CCH-Oriente: Araceli López, Marielena Moscota, Mercedes Magayon, Pablo Sánchez, Francisco Marquina y Ricardo García.

A mis amigos y sus familias de toda la vida Adán Sánchez Hernández, José García Pineda con los que he compartido esta aventura de inicio a fin.

INDICE

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1

ASPECTOS DE LA FÍSICA DE NEUTRONES

	Pág.
1.1. HISTORIA	2
1.2. NEUTRONES	4
1.2.1. Características	
1.2.2. Temperatura	
1.2.3. Velocidad	5
1.2.4. Longitud de Onda	6
1.2.5. Clasificación	7
1.2.6. Vida Media	9
1.2.7. Reacciones Nucleares	
1.2.8. Sección Eficaz para Neutrones	10
1.2.9. Generación de Neutrones	12
1.2.9.1. Reactores Nucleares	
1.2.9.2. Aceleradores de Partículas	14
1.2.9.3. Californio-252 (^{252}Cf)	
1.2.9.4. Fuentes Fijas Compuestas por un Emisor α y ^9Be	15
1.3. DETECCIÓN DE NEUTRONES	16
1.3.1. Interacción de Neutrones con Materia	
1.3.1.1. Colisiones Elásticas	17
1.3.1.2. Colisiones Inelásticas	18
1.3.1.3. Transmutaciones	
1.3.1.4. Procesos de Captura	
1.4. MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN	18
1.4.1. Esferas de Bonner	
1.4.2. Activación Inducida	19
1.4.3. Trazas Nucleares en Sólidos (TNS)	20

Capítulo 2

METODOLOGÍA

	Pág.
2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL MÉTODO DE TRAZAS NUCLEARES EN SÓLIDOS (MTNS)	23
2.2. MÉTODO DE TRAZAS NUCLEARES EN SÓLIDOS (MTNS)	23
2.2.1. Exposición a la Radiación	24
2.2.1.1. Detección de Neutrones Mediante MTNS (Reacción (n, p))	
2.2.1.2. Formación de la Trazas Latente	

2.2.1.3.	Frenado de Partículas Cargadas en la Materia	Pág. 25
2.2.1.4.	Alcance en el Medio (R)	26
2.2.1.5.	Selección del Material	
2.2.1.6.	Materiales Sensibles	27
2.2.1.7.	CR-39 Como Material Detector	
2.2.1.8.	Material Convertidor	28
2.2.2.	Grabado Químico	29
2.2.2.1.	Método de Grabado	
2.2.2.2.	Formación de la Trazas para v_T Constante	30
2.2.2.3.	Formación de la Trazas para v_T Variable	31
2.2.3.	Análisis de Trazas	32
2.2.3.1.	Conteo y Análisis de las Trazas Formadas	
2.3.	PREPARACIÓN DE LOS DETECTORES	33
2.4.	FUENTE DE NEUTRONES	33
2.4.1.	Condiciones de Exposición	34
2.4.2.	Condiciones de Grabado Químico	35
2.4.3.	Grabado Químico	
2.5.	CONDICIONES DE LECTURA	36
2.5.1.	Registro Digital de los Detectores	
2.5.2.	Análisis de las Imágenes	37
Capítulo 3		
INSTRUMENTACIÓN		
3.1.	DISPOSITIVOS DE DETECCIÓN	Pág. 39
3.2.	FUENTE DE NEUTRONES REACTOR TRIGA MARK III	39
3.2.1.	Descripción del Reactor	
3.2.2.	Núcleo del Reactor	40
3.3.	GRABADO QUÍMICO	41
3.3.1.	Solución de Grabado	
3.3.2.	Equipo para el Grabado	42
3.4.	SISTEMA DE LECTURA	43
3.4.1.	Microscopio	
3.4.2.	Cámara Fotográfica Digital	
3.4.3.	Sistema de Cómputo	44
Capítulo 4		
RESULTADOS		
4.1.	CONTEO	Pág. 47

4.2. DENSIDAD DE TRAZAS ρ	Pág. 48
4.3. DISTRIBUCIÓN DE DIÁMETROS	49
4.3.1. Diámetros a 7 kW	50
4.3.2. Diámetros a 5 kW	51
4.3.3. Diámetros a 3 kW	52
4.4. APLICACIONES	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
Bibliografía	54
Anexo	59
Glosario	61

INDICE FIGURAS

1.1 Distribución energética de Maxwell-Boltzmann	Pág. 5
1.2 Esquema de reacciones nucleares	9
1.3 Atenuación exponencial de un haz de neutrones en un material de grosor L	11
1.4 Espectro de Energías de neutrones para un reactor típico, mostrando las componentes principales	13
1.5 Proceso de fisión	13
1.6 Espectro de neutrones de diversas fuentes	16
1.7 Diagrama de dispersión elástica	17
1.8 Esferas de Bonner, Cartel Detección de neutrones mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, IFUNAM.	19
1.9 Detector de Activación Inducida, Cartel Detección de neutrones mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, IFUNAM	20
1.10 Imágenes de Trazas Nucleares, para diferentes tiempos de ataque químico $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$, (PAD) - IFUNAM	21
2.1 Diagrama del método para la detección por trazas nucleares en sólidos.	23
2.2 Esquema del paso de una partícula en (a) un cristal y (b) un polímero	25
2.3 Formula desarrollada del CR-39	27
2.4 Geometría de la traza formada por una partícula que incidió verticalmente con v_T y v_G constante	30
2.5 Trazas cuya intensidad de daño varia a lo largo de su trayectoria a tiempos $t_0 < t_1 < t_2 < t_3$	32

	Pág.	
2.6	Esquema del arreglo de los detectores para la irradiación con neutrones.	33
2.7	TRIGA Mark III tomado de la página del ININ	34
2.8	Esquema del reactor TRIGA Mark III. En la parte superior de la imagen se muestra la posición donde se colocaron los dispositivos para ser irradiados.	35
3.1	CR-39 Lantrackr (PAD) – IFUNAM	39
3.2	Espectro típico de neutrones del Reactor de Investigación Triga MARK III de Salazar. Las regiones correspondientes a los grupos de energías (térmicos, epitérmicos, y rápidos) para neutrones son claramente visibles	40
3.3	Configuración del núcleo del reactor TRIGA Mark III al momento de la irradiación	41
3.4	Instrumentación básica para el grabado químico empleada en el PAD del IFUNAM	42
3.5	Microscopio Zeiss Primo Star	43
3.6	Canon EOS 60D	44
3.7	Laptop Latitude D620	44
3.4	Equipo para registro y conteo de trazas CADIS desarrollado en el IFUNAM	45
4.1	Diferentes grados en densidad de trazas en los detectores irradiados a diferentes potencias	47
4.2	Grafica de la densidad de trazas como función de la potencia de operación	48
4.3	Distribución de los diámetros de las trazas de protones producidas en CR-39 irradiados a una potencia de operación de 7 kW	50
4.4	Distribución de los diámetros de las trazas de protones producidas en CR-39 irradiados a una potencia de operación de 5 kW	51
4.5	Distribución de los diámetros de las trazas de protones producidas en CR-39 irradiados a una potencia de operación de 3 kW	52

INDICE TABLAS

	Pág.	
1.1	Clasificación de los neutrones de acuerdo a su energía	8
1.2	Propiedades nucleares del ^{252}Cf .	15
2.1	Abundancia y sección eficaz de cada elemento presente en el CR-39	28
2.2	Abundancia de cada elemento presente en el acrílico	29
2.3	Algunos métodos de grabado utilizados en MTN	29
4.1	Conteo (trazas/campo) como función de la potencia del reactor	47
4.2	Densidad de trazas como función de la potencia del reactor	48
4.3	Densidad de trazas generadas cada segundo como función de la potencia del reactor	49

INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento de los neutrones en la década de los treinta del siglo XX, se han realizado diferentes investigaciones sobre sus propiedades y sus posibles aplicaciones; Con el desarrollo de la tecnología actual no solo se conocen de manera más precisa sus propiedades, sino también se han encontrado de nuevas posibles aplicaciones en la vida diaria y la ciencia, que van desde la medicina hasta la detección de diferentes compuestos, Por lo tanto, la generación de neutrones se ha vuelto más necesaria cada día, como consecuencia su control y detección son un pilar fundamental para su uso seguro en todas sus aplicaciones.^[33]

El objetivo de la tesis es utilizar el método de trazas nucleares en sólidos para la detección del flujo de neutrones de un reactor nuclear de investigación, como un método muy confiable para la determinación de este a diferentes potencias.

Hipótesis el número de trazas varía proporcionalmente con la potencia del reactor

El Reactor de investigación nuclear TRIGA Mark III es una de las fuentes de investigación de radioisótopos, estudios de materiales y entrenamiento de personal, este reactor puede operar en un amplio intervalos de potencias, contando con diferentes canales de irradiación según los requerimientos experimentales, una forma de asegurarse de tener el flujo de neutrones requerido no solo es el que marca el reactor sino también tener un detector de forma presencial durante la realización de estos experimentos.^[67]

Sin embargo, muchos de los detectores, debido a su tamaño, forma, alimentación de energía y tiempo de vida útil, son poco viables en diferentes procesos de exposición al flujo de neutrones, por tal motivo se vuelve necesario contar con un detector que sea fiable, económico y adaptable para experimentos donde es difícil obtener una medida precisa del flujo de neutrones que se esté aplicando en el momento de la irradiación con una mínima interferencia.

Se propone el método de trazas nucleares como un método que cubre todos estos requerimientos, además de ser sencillo de utilizarse en cualquier momento, es muy fiable y reproducible, y tiene la ventaja de no ser sensible a otros tipos de radiaciones, tener muy baja sensibilidad a luz ultravioleta y ser de sencillo almacenaje.

Esta tesis se compone de cuatro capítulos:

- **Capítulo 1 Aspectos de la Física de Neutrones**
Se describen las características y propiedades físicas de los neutrones
- **Capítulo 2 Metodología:**
Se describe el protocolo empleado
- **Capítulo 3 Instrumentación:**
Se describe la instrumentación utilizada para llevar a cabo el análisis correspondiente a cada una de las muestras
- **Capítulo 4 Resultados:**
Se describen los resultados y el análisis de las muestras, para culminar con las conclusiones.
- **Conclusiones y Recomendaciones**
- **Bibliografía**
- **Anexo**
- **Glosario**

Capítulo 1
ASPECTOS DE LA FÍSICA
DE NEUTRONES

1.1. HISTORIA

La idea de que la materia consiste de un conjunto de átomos nace desde tiempos muy antiguos por los filósofos griegos Leucipo y Demócrito alrededor del siglo V a. C. [1, 2, 3] Pero no fue sino hasta la época renacentista que el desarrollo del concepto atómico comenzó y las ideas en bruto sobre una descripción cinética de la materia fueron discutidas.

A principios del siglo XIX, John Dalton (científico británico) y Louis Joseph Gay-Lussac (físico y químico francés), llevaron a cabo experimentos químicos cuantitativos que empezaron a poner la hipótesis atómica sobre una base firme, estableciendo la idea de que los átomos pueden combinarse en forma de moléculas. [3]

Después de esto, se desarrolló la teoría cinética de los gases, en la cual las propiedades físicas de estos, tales como la presión y la temperatura podían ser entendidas en términos del movimiento de sus átomos y moléculas. Esto culminó en la formulación de la termodinámica estadística a mediados del siglo XIX por James Clerk Maxwell (físico británico), Ludwig Eduard Boltzmann (físico austriaco) y Josiah Willard Gibbs (físico estadounidense), estableciendo finalmente el concepto atómico. [3]

Hasta el siglo XIX únicamente los químicos habían explicado las clases de átomos, además de las reglas que gobiernan sus combinaciones en la materia y su clasificación sistemática (mediante la tabla periódica de Mendeléyev).

En 1895 el físico Wilhelm Conrad Röntgen (físico alemán) presenta un artículo y nueve fotografías al secretario de la sociedad física-médica de Würzburg, en el que se describe las imágenes de huesos de un ser vivo al aplicar los ahora llamados rayos X. [2]

Estos acontecimientos avivaron la curiosidad del científico Antonio Henri Becquerel (físico francés) y él supuso que era posible que existieran otros materiales que emitieran rayos X. Usando sal de uranio sintetizada por su padre, realiza un experimento que lo lleva a descubrir que en ella, existe un fenómeno que vela una placa fotográfica y que no importa la forma física o química en la que se aplique este fenómeno vuelve a suceder.

Debido a estos acontecimientos y la cercanía de Becquerel al matrimonio de Piere Curie (físico francés) y Marie Sklodowska (física Polaca), decide realizar su tesis en este tema que llamó "Radioactividad", desarrollando un nuevo método con base en la ionización. con lo que descubren el torio; posteriormente lo mejoran con piezoeléctricos con lo que descubren más elementos. [2]

El primer intento para formular un modelo del átomo fue hecho en 1898 por Joseph John Thomson (físico británico), quien dio evidencia experimental de que los átomos

debían contener electrones; sin embargo, los átomos eran eléctricamente neutros, lo cual lo llevo a suponer que los electrones estaban incrustados dentro de materia positivamente cargada responsable del volumen total del átomo. Este modelo atómico se conoció como el modelo de “Pudín de Pasas” de Thomson, en el cual el átomo es visualizado como una esfera compuesta de materia positivamente cargada con radio del orden de 10^{-10} m y cuya carga eléctrica es anulada por las cargas negativas de los electrones embebidos en la masa.^[3]

Posteriormente, Ernest Rutherford (físico y químico neozelandés), conocido por ser el padre de la física nuclear, estudio estas radiaciones y sus propiedades; una vez que logra un entendimiento de su naturaleza, las usó en sus experimentos de dispersión como pruebas de los átomos mismos y proponiendo en el proceso la existencia del núcleo atómico.^[2]

El núcleo fue descubierto primero en 1911 en los experimentos conducidos por Rutherford en dispersiones de partículas alfa por átomos, encontrando que los patrones de dispersión podían ser explicados si los átomos consistían en pequeños centros masivos de carga positiva, con electrones de carga negativa orbitando alrededor. Aun cuando muchos de sus resultados podían ser calculados suponiendo un núcleo infinitamente pequeño, las desviaciones indicaban que el tamaño nuclear era de un orden de 10^{-14} m; siendo 10 000 veces más pequeño que el diámetro del átomo mismo.^[4]

Para principios del siglo XX se creía que las partículas fundamentales que conformaban la materia eran solamente protones de carga positiva y electrones de carga negativa.

A finales de los años 20 James Chadwick (físico británico), notó serias discrepancias entre las expectativas de dispersión coulombiana y la dispersión elástica de partículas α en helio. Todo esto indicaba claramente que había algo más que la fuerza de Coulomb involucrado en la dispersión nuclear.^[5]

En 1930 Walther Wilhelm Georg Bothe y Herbert Becker (físicos alemanes), observaron que, al bombardear una muestra de berilio con partículas α (alfa), se producía una radiación más penetrante que la radiación γ (gamma), pero que al pasar a través de un gas no se producía ionización, descartando que se trataran de partículas cargadas. Además, era conocido que en ciertos materiales, esta radiación era capaz de expulsar átomos de nitrógeno e hidrógeno de alta energía, presumiblemente por colisiones elásticas.^[6]

James Chadwick propuso que debían tratarse de partículas neutras con una masa similar a la del protón, en cuyo caso su energía era de al menos 5.7 MeV para que al colisionar de frente con un protón pudiera transferirle toda su energía cinética. Otros experimentos confirmaron su hipótesis y es en 1932; anuncia el descubrimiento de una nueva partícula nuclear: el neutrón, recibiendo el premio Nobel en 1935 por su contribución.^[7] De esta forma, cualquier núcleo dado tiene

una cantidad apropiada de protones para dar la carga positiva correcta junto con un número suficiente de neutrones para dar la masa correcta. [6]

La posible existencia de algún tipo de partícula neutra había sido debatida por Rutherford varios años antes de su descubrimiento, pero al ser neutra, fue difícil de detectar. El descubrimiento del neutrón proporcionó la solución a un problema fundamental de la física nuclear, la naturaleza de las partículas en el núcleo. [6]

1.2. NEUTRONES

Un átomo está principalmente formado por dos regiones, una que es una nube de electrones de carga negativa alrededor de la segunda región que es el núcleo que se encuentra formado por protones de carga positiva y neutrones sin carga. Estos neutrones son partículas subatómicas masivas, cada neutrón se encuentra formado por tres quarks (dos quarks abajo y un quark arriba). [8]

1.2.1. Características

EL neutrón posee una masa de $1.674927351 \times 10^{-27}$ kg que es similar a la del protón, pero debido a que no posee carga no se ve afectado por campos eléctricos o magnéticos ni tampoco por interacciones coulombianas con otras partículas, [9] cabe aclarar que todos los átomos a excepción del hidrogeno son inestables sin una cantidad similar de neutrones y protones. A cualquier neutrón fuera del núcleo se le conoce como neutrón libre. [2]

1.2.2. Temperatura

Los neutrones que están en equilibrio térmico con los átomos o moléculas del medio en que se encuentran se les denomina *neutrones térmicos*. Si se realiza una aproximación de la distribución de las energías cinéticas de los neutrones, basada en la teoría cinética de los gases, se tiene que sus energías cinéticas se distribuirán estadísticamente según la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann

$$\frac{dn}{n} = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{\frac{3}{2}}} e^{\frac{-E}{kT}} \frac{1}{E^2} dE \quad 1.1$$

Donde dn es el número de neutrones con energías entre E y $E + dE$, n el número total de neutrones existentes en el sistema, $k = 8.617333 \times 10^{-5}$ (eV/K) la constante de Boltzmann, y T es la temperatura absoluta. Si se considera únicamente el número de neutrones de energía E en el sistema, entonces $dn = n(E)dE$ será el número de neutrones cuyas energías están comprendidas en el intervalo E y $E + dE$. Es decir, $dn = n(E)dE$, quedando entonces como: [10]

$$\frac{n(E)}{n} = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{\frac{3}{2}}} e^{\frac{-E}{kT}} \frac{1}{E^2} \quad 1.2$$

Calculando (1.2) para distintos valores de E a una temperatura constante, se obtiene una distribución de Maxwell-Boltzmann como se muestra en la Figura 1.1, que presenta la variación de $\frac{n(E)}{n}$ en función de la energía cinética.^[11]

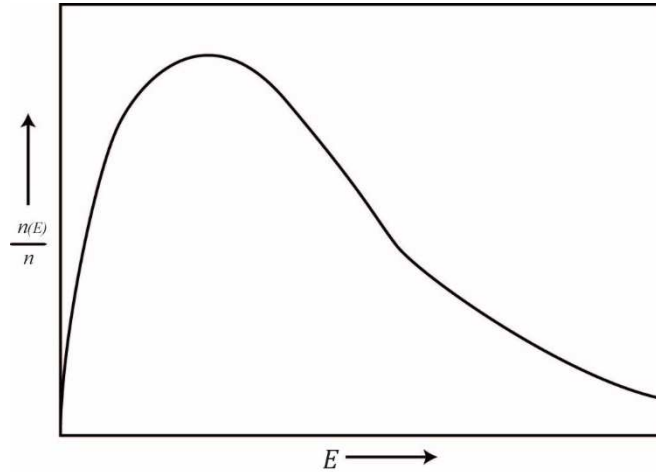


Figura 1.1 Distribución energética de Maxwell-Boltzmann

En la práctica se acostumbra utilizar la expresión:

$$E = kT \quad 1.3$$

$$E = \left(8.617333 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) T$$

Para una temperatura ambiente de 20 °C (293.15 K),^[10]

$$E = \left(8.617333 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}\right) (293.15 \text{ K}) \cong 0.025 \text{ eV} \quad 1.4$$

1.2.3. Velocidad

Ya con la energía del neutrón y considerando que la velocidad de este no se acerca a la velocidad de la luz, usaremos la ecuación de energía cinética:^[10]

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad 1.5$$

Donde m es la masa del neutrón, despejando para la velocidad obtenemos:

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad 1.6$$

Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación 1.6^[10]

$$v = \sqrt{\frac{2(0.04005 \times 10^{-19} \text{ J})}{1.674927351 \times 10^{-27} \text{ kg}}}$$

$$v = 2186.9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Si se aplica la sustitución de la ecuación directamente en la ecuación 1.3, también la encontraremos en función de la temperatura

$$v = \sqrt{\frac{2(1.3806488 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}})T}{1.674927351 \times 10^{-27} \text{ kg}}}$$

$$v = 1.283981 \times 10^2 \sqrt{T} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \mathbf{1.7}$$

1.2.4. Longitud de onda

Louis de Broglie en 1924 propuso que la materia posee propiedades de onda y de partículas, partiendo de esta propuesta empezamos con que un fotón con frecuencia f tiene la cantidad de movimiento.^[7]

$$p = \frac{hf}{c} \quad \mathbf{1.8}$$

Que puede ser expresada en función de la longitud de onda.

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \mathbf{1.9}$$

donde la constante de Planck es $h = 6.62606957 \times 10^{-34} ((\text{kg m}^2)/\text{s})$ y $\lambda f = c$. La longitud de onda de un fotón está singularizada por su cantidad de movimiento según la relación:

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \mathbf{1.10}$$

Broglie establece que la fórmula anterior es general porque aplica tanto a partículas como a fotones. La cantidad de movimiento de una partícula de masa m y de velocidad v es $p = mv$ en consecuencia, su *longitud de onda de Broglie* es:^[7]

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \mathbf{1.11}$$

Si tomamos la ecuación 1.6 y la sustituimos en la ecuación 1.11. se tiene λ en función de la energía del neutrón:

$$\lambda = \frac{6.62606957 \times 10^{-34} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}}{(1.674927351 \times 10^{-27} \text{ kg}) v}$$

$$\lambda = 3.956034013 \times 10^{-7} \frac{1}{v} \text{ m}^2$$

$$\lambda = 3.956034013 \times 10^{-7} \frac{1}{(1.3831593 \times 10^4 \sqrt{E} \frac{\text{m}}{\text{s}})} \text{ m}^2$$

$$\lambda = 2.860143451 \times 10^{-11} \frac{1}{\sqrt{E}} \text{ m} \quad \mathbf{1.12}$$

Para neutrones térmicos $E \cong 0.025$ eV cuya velocidad es aproximadamente 2.186966877 (km/s), la longitud de onda asociada es:^[7]

$$\lambda = 1.808913991 \times 10^{-10} \text{ m} \cong 1.8 \text{ \AA} \quad \mathbf{1.13}$$

1.2.5. Clasificación

Clasificación de los neutrones

Debido a que los neutrones tienen diferentes niveles de energía podemos clasificarlos de la siguiente forma

Tabla 1.1 Clasificación de los neutrones de acuerdo a su energía^[12, 13]

Clasificación	Subdivisión	Temperatura (K)	Rango de Energías (eV)	Velocidad (m/s)	Longitud de Onda (m)
LENTOS	Ultra fríos	0 - 2.3×10^{-3}	0 - 2×10^{-7}	0 - 6.2	0 - 6.4×10^{-8}
	Muy fríos	2.3×10^{-3} - 0.6	2×10^{-7} - 5×10^{-5}	6.2 - 100	6.4×10^{-8} - 4.0×10^{-9}
	Fríos	0.6 - 293.15	5×10^{-5} - 0.025	100 - 2200	4.0×10^{-9} - 1.8×10^{-10}
	Térmicos	293.15	~ 0.025	~ 2200	~ 1.8×10^{-10}
EPITÉRMICOS E INTERMEDIOS	Epitérmicos	293.15 - 4.6×10^3	0.025 - 0.4	2200 - 8700	1.8×10^{-10} - 4.5×10^{-11}
	Cádmicos	~ 4.6×10^3	0.4	~ 8700	~ 4.5×10^{-11}
	Epicádmicos	4.6×10^3 - 1.2×10^4	0.4 - 1	8700 - 1.4×10^4	4.5×10^{-11} - 2.9×10^{-11}
	De resonancia	1.2×10^4 - 1.2×10^6	1 - 100	1.4×10^4 - 1.4×10^5	2.9×10^{-11} - 2.9×10^{-12}
	Intermedios	1.2×10^4 - 1.2×10^{10}	1 - 10^6	1.4×10^4 - 1.4×10^7	2.9×10^{-11} - 2.9×10^{-14}
RÁPIDOS	Rápidos	1.2×10^{10} - 1.2×10^{11}	10^6 - 10^7	1.4×10^7 - 4.4×10^7	2.9×10^{-14} - 9.0×10^{-15}
	Muy rápidos	1.2×10^{11} - 5.8×10^{11}	10^7 - 5×10^7	4.4×10^7 - 9.8×10^7	9.0×10^{-15} - 4.0×10^{-15}
	Ultra rápidos	5.8×10^{11} - 1.2×10^{14}	5×10^7 - 10^{10}	9.8×10^7 - 2.9×10^8	4.0×10^{-15} - 1.3×10^{-15}
RELATIVISTAS	Relativistas	~ 1.2×10^{14}	10^{10}	~ 2.9×10^8	~ 1.3×10^{-15}

Lentos: *Energía cinética inferior a la del umbral del cadmio efectivo.*

Fríos: *Cuyas energías son inferiores a la energía térmica (0.025 eV).*

Térmicos: *Cuya velocidad ha sido reducida mediante colisiones con los átomos del moderador, de tal modo que su energía cinética es, aproximadamente, la misma que la de dichos átomos. A la temperatura ordinaria está energía es de unos 0.025 eV.*

Epitérmicos: *Con energía por encima de la correspondiente a los neutrones térmicos.*

Intermedios: *Con energías superiores a las de los neutrones térmicos e inferiores a las de los rápidos.*

Cádmicos: *Con energía suficiente para ser absorbidos por átomos de cadmio.*

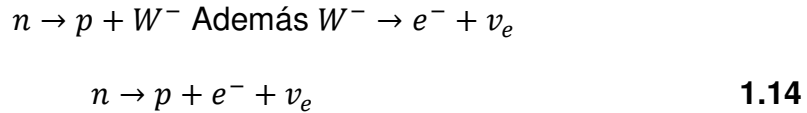
Epicádmicos: *Con energías por encima del límite superior del margen en que son absorbidos por el cadmio. Este límite está, para los neutrones térmicos, alrededor de 0.5 eV.*

Resonancia: *Cuya energía corresponde a la energía de resonancia de un nucleido o de un elemento determinado. Cuando el nucleido no se precisa se trata de neutrones de resonancia de ^{238}U .*

Rápidos: *Liberados de la fisión nuclear de alta energía cinética superior a 0.1 MeV.*

1.2.6. Vida Media

Cuando un neutrón se encuentra fuera del núcleo atómico es inestable. Es común usar haces de neutrones lentos para investigar el decaimiento β^- de los neutrones libres, y en particular para determinar la vida media τ del neutrón n . El decaimiento del neutrón, además de ocurrir entre los neutrones libres, también se da en núcleos con un exceso de neutrones, debido a un proceso de interacción débil, donde el neutrón es transformado en un protón p junto con un bosón W^- que es eyectado. El bosón W^- es inmediatamente transformado en un electrón e^- y un antineutrino $\bar{\nu}_e$, dando como resultado final del decaimiento un protón, un electrón, y un antineutrino.^[2]



Realizado diferentes experimentos se encontró que la vida media estimada del neutrón es de 880.1s (aproximadamente 14 min 40s),^[14] pero si se encuentra en el núcleo es estable.^[2]

1.2.7. Reacciones Nucleares

Cuando algunas partículas nucleares de suficiente energía llegan a incidir sobre la materia, existe la posibilidad de que se produzca una reacción nuclear. En general, puede ser escrita del siguiente modo:

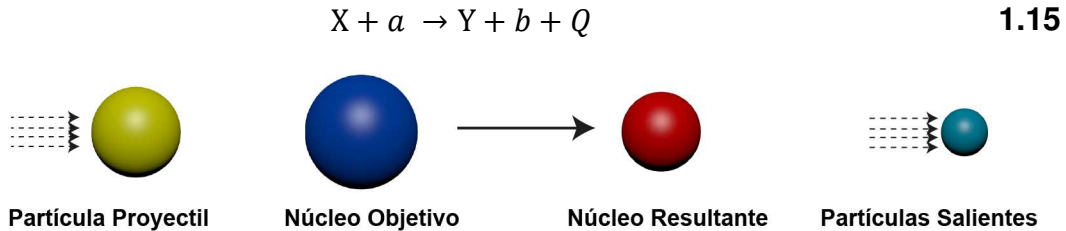


Figura 1.2 Esquema de reacciones nucleares

O bien



- X núcleo objetivo
- a partícula proyectil que impacta a X
- Y núcleo resultante
- b partícula o partículas salientes

Q que es una constante (energía) propia de cada reacción, cuyo valor puede ser positivo, negativo, o igual a cero si se trata de una dispersión elástica, denota la energía total liberada en la reacción y corresponde a la diferencia entre las masas de los elementos iniciales y finales de la reacción.^[9]

1.2.8. Sección Eficaz para Neutrones

La probabilidad de que se produzca una determinada reacción se mide por su *sección eficaz*. En forma clásica, se puede ver como un área circular propia de cada núcleo con el que interacciona la partícula con que se bombardea, de manera que la reacción nuclear tendrá lugar solo si el neutrón incidente atraviesa esta circunferencia. El valor de la sección eficaz dependerá del número y la energía de los neutrones incidentes, así como del núcleo bombardeado y su abundancia en el material.^[15]

Considérese una determinada laminilla de algún material con grosor de un átomo que contiene una cantidad N_a por centímetro cuadrado de este núcleo. Si se tiene un haz colimado de neutrones con intensidad I de neutrones por centímetro cuadrado que incide ortogonalmente sobre la superficie cada segundo, la sección eficaz microscópica σ para una reacción en particular estará definida como:

$$\sigma = \frac{C}{N_a I} \quad \text{cm}^2 \quad \mathbf{1.17}$$

Donde C corresponde a cuantas reacciones de algún tipo pueden ocurrir por centímetro cuadrado cada segundo. Dado que la sección eficaz tiene un orden de magnitud de 10^{-28} m^2 se toma este valor como la unidad de sección eficaz llamada barn.^[15]

La ecuación 1.17 puede ser reescrita como:

$$N_a \sigma = \frac{C}{I}$$

De manera que la cantidad C/I es la fracción de los neutrones incidentes que causan la reacción nuclear y la cantidad $N_a \sigma$ puede ser vista como la porción de área de 1 cm^2 en la cual se lleva a cabo la reacción nuclear cuando es impactada por el haz.^[15]

Varios tipos diferentes de reacciones nucleares pueden ocurrir con los neutrones, y para cada proceso habrá una cierta sección eficaz. Dado que las probabilidades para diferentes procesos son aditivas, uno puede definir una sección eficaz total σ_{Tot} como la suma de las secciones eficaces individuales de diferentes procesos, tales como dispersión, captura, etc. Si σ_i si se refiere a la sección eficaz para el i -ésimo proceso, entonces^[15]

$$\sigma_{Tot} = \sigma_{dispesión} + \sigma_{captura} + \dots = \sum_i \sigma_i \quad \mathbf{1.18}$$

La sección eficaz σ es conocida como la sección eficaz microscópica ya que se refiere a un solo núcleo. La sección eficaz macroscópica se define como^[15]

$$\Sigma \equiv N\sigma \text{ cm}^{-1} \quad \mathbf{1.19}$$

con N el número de núcleos objetivo por centímetro cúbico, por lo que Σ es vista como la sección eficaz para todos los núcleos en 1 cm^3 de material.

Considérese un haz colimado de neutrones con intensidad I_0 cada segundo que incide en un centímetro cuadrado sobre un material de espesor d , como se muestra en la Figura 1.3. Una laminilla diferencial de un centímetro cuadrado de superficie contendrá Ndx núcleos que producen un cambio fraccional $N\sigma dx$ en la intensidad del haz

$$-\frac{dI}{I} = N\sigma dx = \Sigma dx \quad \mathbf{1.20}$$

teniéndose que la intensidad del haz incidente disminuye exponencialmente en función del espesor del material

$$I = I_0 e^{-\Sigma dx}$$

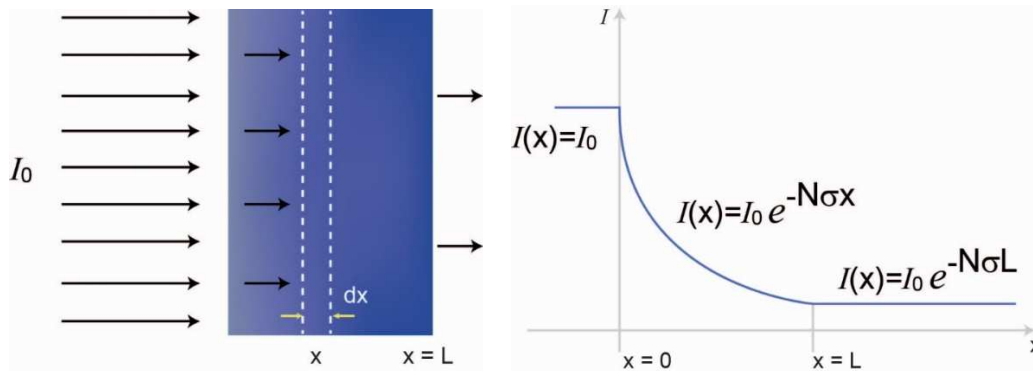


Figura 1.3 Atenuación exponencial de un haz de neutrones en un material de grosor L

A partir de esto se ve que Σ es la probabilidad de absorción por unidad de longitud.

También se define el camino libre medio (λ) como $1/\Sigma$, que es la distancia promedio a la que el neutrón viajará antes de que ocurra un proceso de interacción con algún núcleo.^[50]

En vista de que la sección eficaz para los neutrones es dependiente de su energía, se toma en cuenta el término $\phi(E)$ que se refiere al flujo de neutrones para una energía dada, por lo que el flujo de neutrones con energías dentro del intervalo E y $E + dE$ será $\phi(E)dE$. La magnitud $\phi(E)$ está relacionada con $n(E)$ el número de neutrones por unidad de volumen con una energía dada, mediante la expresión^[15]

$$\phi_{(E)} = n_{(E)} v \quad 1.21$$

Donde v es la velocidad promedio a la que viajan. El flujo total de todas las energías es:

$$\Phi = \int_0^{\infty} \phi_{(E)} dE = \int_0^{\infty} n_{(E)} v dE \quad 1.22$$

1.2.9. Generación de Neutrones

Los haces de neutrones pueden ser producidos a partir de varias reacciones nucleares. Existen principalmente cuatro tipos de fuentes de emisión:

- *Reactores Nucleares*
- *Aceleradores de Partículas*
- *Californio-252 (^{252}Cf transuránidos)*
- *Fuentes Fijas Compuestas por un Emisor α y ^9Be*

Para las dos últimas son posibles diversos tipos de arreglos, ya sea que se trate de una sola fuente, o un arreglo de varias. En el caso de fuentes de vida media larga lo mejor es un arreglo anular de manera que el flujo sea homogéneo^[16]

1.2.9.1. Reactores Nucleares

Los reactores nucleares no tienen rival como fuente de neutrones, ya que son capaces de producir un flujo intenso, así como un amplio pero continuo intervalo de energías que va desde los térmicos (0.025 eV) hasta los rápidos de más de 10 MeV. en la Figura 1.4 se muestra en espectro típico.^[17]

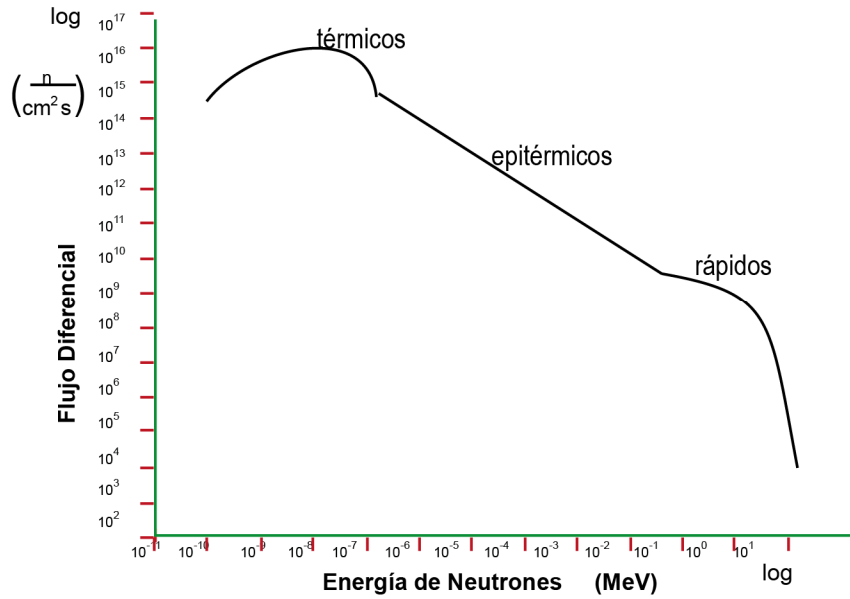


Figura 1.4 Espectro de energías de neutrones para un reactor típico, mostrando las componentes principales.^[11]

En un reactor, los neutrones son producidos como consecuencia de la *reacción en cadena debido al rompimiento de los núcleos (fisión)*. Utilizando como combustible: uranio o plutonio. En cada fisión, se producen dos fragmentos de masa aproximadamente igual a la mitad de la masa del núcleo original y entre dos o tres neutrones. Los fragmentos producto de la fisión pueden quedar en un estado excitado y decaer por emisión de neutrones, contribuyendo también a la reacción en cadena (Figura 1.5).^[18]

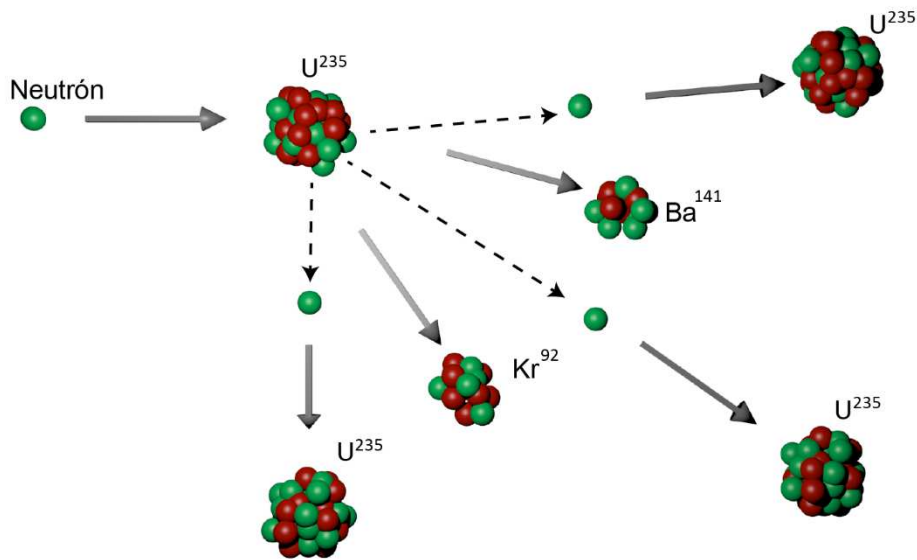


Figura 1.5 Proceso de fisión.

1.2.9.2. Aceleradores de Partículas

Por bombardeo de ciertos blancos en aceleradores de partículas, pueden obtenerse neutrones monoenergéticos de energías comprendidas entre algunos keV y 20 MeV. En este proceso, dos núcleos atómicos ligeros son fusionados formando un núcleo más pesado y produciendo un neutrón libre. He aquí algunas de las reacciones que tienen lugar: ^[9]



n neutrón

p protón

d deuterón

Cuando la energía del proyectil es bastante elevada, hay una cierta probabilidad de que el núcleo residual quede en estado excitado y no en su estado fundamental; por lo que en este caso, los neutrones dejarán de ser monoenergéticos^[9]

1.2.9.3. Californio-252 (²⁵²Cf)

Muchos de los *núclidos transuránidos pesados* tienen una considerable probabilidad de decaimiento por fisión espontánea en la cual, se emiten varios neutrones rápidos en cada evento de fisión, por lo que una muestra de alguno de estos radionúclidos puede ser también una fuente de neutrones. En estos procesos de fisión, es posible la producción de radiación gamma o emisión beta, ya sea por el proceso de fisión mismo o por parte de los productos de fisión. Cuando un transuránido se utiliza como fuente de neutrones, el isótopo es generalmente encapsulado en un recipiente de suficiente espesor como para que solo los neutrones rápidos y la radiación gamma emerjan de la fuente. ^[19]

El ²⁵²Cf (Tabla 1.2) es un isótopo radioactivo conocido por ser un intenso emisor de neutrones, manejado como una fuente compacta y de encapsulado comúnmente cilíndrico. Decae por emisión alfa y por fisión espontánea, con una vida media de 2.645 años como emisor de neutrones. Su espectro de energías es similar al de un reactor de fisión. ^[20]

La principal desventaja se debe a su corta vida media, así como su excesivo costo económico (27 millones de dólares por gramo). Otro aspecto para considerar es su espectro de energías dependiendo la aplicación para la que se requiera. ^[16]

Las fuentes portátiles de ²⁵²Cf son ideales para aplicaciones donde se requiere un bajo flujo de neutrones sin necesidad de recurrir a un reactor para su producción.

También se puede recurrir a cantidades mayores (>100 mg) donde la emisión de neutrones es similar a la de un reactor, pero con las ventajas de un diseño y costos

reducidos, así como menor requerimiento de personal en comparación con las de un reactor convencional.^[20]

Tipo de decaimiento	
Emisión alfa	96.91%
Fisión espontánea	3.09%
Vida media	
Emisión alfa	2.731 años
Fisión espontánea	85.5 años
Efectiva	2.645 años
Tasa de emisión de neutrones	2.314×10^{12} (n / (s g))
Actividad específica	536 (Ci / g)
Neutrones emitidos por fisión	3.75
Energía promedio de los neutrones	2.1 MeV
Energía más probable de los neutrones	0.7 MeV
Tasa de emisión gamma	1.3×10^{13} (fotones / (s g))
Tasa de dosis a un metro en aire	
Neutrones	2.2×10^3 (rem / (h g))
Gamas	1.6×10^2 (rad / (h g))
Volumen de la fuente	<1 (cm ³ / g)

Tabla 1.2 Propiedades nucleares del ²⁵²Cf. ^[16, 20]

Entre las aplicaciones experimentales del ²⁵²Cf se encuentran: sistemas de detección de minas terrestres, pruebas de daño de neutrones en detectores de estado sólido, irradiación de células cancerígenas, e irradiación en arroz para inducir mutaciones genéticas.^[20]

1.2.9.4. Fuentes Compuestas por un Emisor α y ⁹Be

Las fuentes se construyen utilizando una *fente de emisión alfa junto con berilio (⁹Be) como blanco*. Las alfas emitidas interaccionan con los núcleos de berilio mediante la reacción:^[17]



Se utiliza una aleación ²³⁹PuBe o ²⁴¹AmBe, a manera de poder maximizar la probabilidad de que las partículas alfa emitidas interaccionen con los núcleos de ⁹Be con la menor pérdida de energía posible, ya que a medida que la partícula α se mueve, esta va perdiendo energía ya sea por choques o por frenado, antes de interaccionar con el berilio, por lo que la energía de los neutrones producidos será inversamente proporcional a la distancia recorrida por la α en lugar de producir neutrones monoenergéticos.^[17] La ventaja de estas como fuente de neutrones, es que la producción dependerá principalmente de la emisión de partículas alfa, siendo

las de $^{239}\text{PuBe}$ y $^{241}\text{AmBe}$ las mejores combinaciones por tener una vida media larga. (Figura 1.6).

$^{239}\text{PuBe}$: Con una vida media de 24110 años, y emitiendo alfas con energía de 5.24 MeV, el ^{239}Pu es el mejor isótopo para este tipo de fuentes, produciendo alrededor de 1.2×10^5 (n/(s g)) con energía promedio de 4.59 MeV.^[16]

$^{241}\text{AmBe}$: El ^{241}Am es ideal ya que combina una vida media larga de 432.6 años, y da una producción de 6.5×10^8 (n/(s g)) para este tipo de fuente, siendo un valor bastante razonable en combinación con una baja dosis de radiación gamma.^[16]

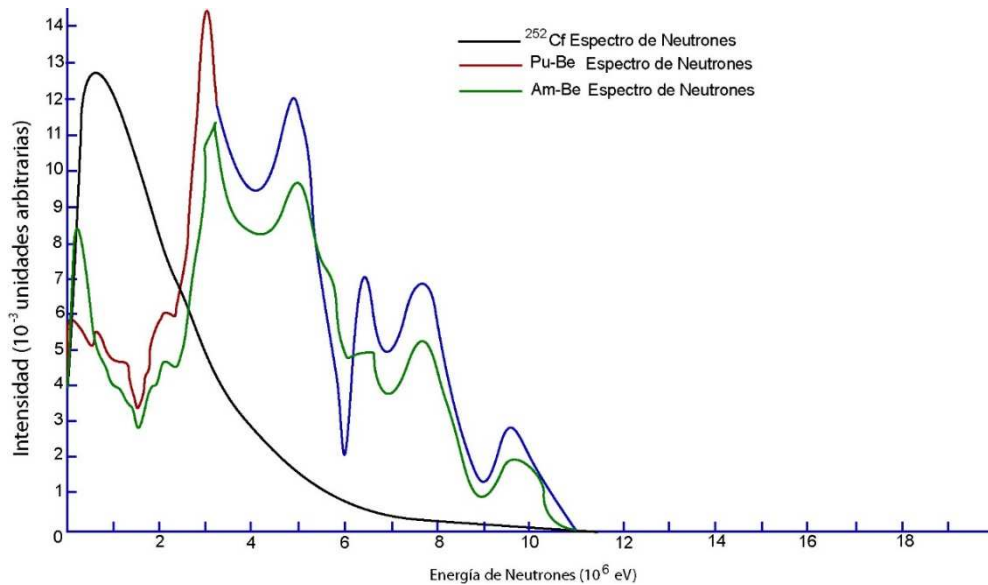


Figura 1.6 Espectro de neutrones de diversas fuentes^[21]

1.3. DETECCIÓN DE NEUTRONES

Los mecanismos para la detección de neutrones están basados en métodos indirectos, ya que los neutrones no interactúan directamente con los electrones de la materia. El proceso para la detección del neutrón implica una interacción con un núcleo y la posterior liberación de partículas cargadas. Estas partículas cargadas secundarias ionizarán el medio y podrán detectarse por diferentes métodos.

1.3.1. Interacción de Neutrones con Materia

En una dispersión elástica del neutrón con una partícula cargada, el núcleo liberado hace posible la detección. Los detectores basados en este fenómeno emplean núcleos ligeros, tales como el hidrógeno, que liberan protones conocidos como protones de retroceso.^[15]

También está la transmutación en donde el neutrón es capturado en el núcleo produciendo un isótopo radioactivo. El subsecuente decaimiento de este núcleo

puede dar información del flujo de neutrones con el que se indujo la radioactividad. La detección que emplea este método se conoce como activación inducida.^[15]

Otro tipo de transmutación es a través de una reacción nuclear, en la cual las partículas eyectadas como producto de la interacción hacen posible la detección. Ejemplo de esto, reacciones (n, α) , (n, p) , (n, γ) , y $(n, \text{fisión})$, en donde la partícula alfa, el protón, la radiación gamma o los productos de fisión, dan información instantánea del neutrón.^[15]

En general, la interacción de neutrones con materia produce un amplio espectro de núcleos de retroceso y partículas subatómicas; y aunque la radiación con neutrones también ocurre en conjunto con otros tipos de radiación, particularmente con radiación gamma. El éxito en algún método de detección en particular, dependerá también de su capacidad para discriminar entre otros tipos de radiación.^[15]

1.3.1.1. Colisiones Elásticas

La definimos como aquella en la que no hay pérdida de energía cinética en la colisión. Con los neutrones este evento se produce cuando choca con un núcleo atómico y el neutrón es desviado cediendo parte de su energía al núcleo en retroceso. La energía E_{tr} transferida a un núcleo de masa M_a por el neutrón de masa m y energía E_n está dada por:

$$E_{tr} = E_n \frac{4M_a m}{(M_a + m)^2} \cos^2 \theta \quad 1.25$$

Donde θ es el ángulo de dispersión del núcleo en retroceso respecto al eje de incidencia del neutrón, como se muestra en la Figura 1.7. La energía transferida es mayor cuando la masa del núcleo impactado es menor. Por lo que, este tipo de colisiones ocurren frecuentemente en materiales de bajo peso atómico. Es decir, con el protón cuya masa es similar a la del neutrón como el hidrógeno en agua o en polietileno, el deuterio en agua pesada.^[22]

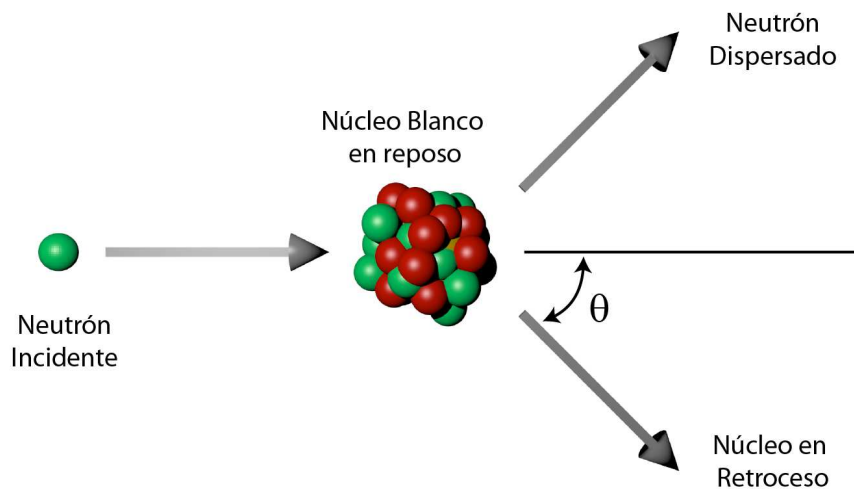


Figura 1.7 Diagrama de dispersión elástica

1.3.1.2. Colisiones inelásticas

La definimos como parte de la energía cinética que se cambia en alguna otra forma de energía en la colisión. Cualquier colisión macroscópica entre objetos, convertirá algo de la energía cinética en energía interna y otras formas de energía. En este tipo de colisiones, el neutrón (n) puede ser capturado momentáneamente por un núcleo y posteriormente reemitido (n') con una energía menor, dejando al núcleo en un estado excitado. El núcleo puede eventualmente regresar a su estado base por emisión de radiación gamma. Un ejemplo de esto, es la reacción $^{16}\text{O}(n, n')^{16}\text{O}^*$ con el $^{16}\text{O}^*$ emitiendo subsecuentemente una gamma de 6.1 MeV.^[22]

1.3.1.3. Transmutaciones

Es obtener nuevos núcleos estables o inestables a partir de núcleos específicos. Para ello, se utilizan como “proyectiles” otros núcleos o partículas simples (neutrones, protones, deuterones, rayos alfa, ...), un ejemplo es cuando la partícula resultante de la interacción no es un neutrón, la reacción $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$. En elementos tales como: C, N y O, las colisiones inelásticas y las transmutaciones usualmente se producen en el intervalo de 4 a 12 MeV.

1.3.1.4. Procesos de captura

Los neutrones térmicos son aquellos que están en equilibrio térmico con la materia y energía alrededor de 0.025 eV y son capturados permanentemente por un núcleo atómico. Un ejemplo importante de este tipo, es la reacción $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$, donde la gamma emitida tiene una energía de 2.2 MeV.^[22]

1.4. MÉTODOS DE DETECCIÓN Y MEDICIÓN

1.4.1. Esferas de Bonner

Con el fin de caracterizar campos de neutrones se ideó un set *Espectrómetro de esferas moderadoras* de polietileno con diferentes diámetros que en su interior contienen detectores de neutrones térmicos. Los neutrones rápidos se frenan dentro del moderador y llegan al detector en estado térmico, mientras que los neutrones inicialmente termalizados son parcialmente capturados dentro del moderador y no alcanzan el detector. Aumentando el diámetro de la esfera moderadora, se desplaza el pico de sensibilidad del sistema hacia las energías altas. De esta manera, es posible efectuar una espectrometría de neutrones.^[19]



Figura 1.8 Esferas de Bonner, Cartel Detección de neutrones mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, IFUNAM.

1.4.2. Activación Inducida

Hay ocasiones en las que una transmutación inducida por neutrones resulta en un núclido radioactivo. La actividad de este radioisótopo resultante, puede ser usada también para medir la cantidad y distribución de energía en el flujo de neutrones que indujeron la radioactividad. Un detector que emplea este principio, es referido como un detector por activación inducida.^[15]

Los detectores por activación (Figura 1.9) se usan comúnmente en forma de laminillas lo suficientemente delgadas para que la absorción de neutrones sea pequeña. Estas laminillas pueden ser de algún metal o de películas delgadas impregnadas con algún material detector.

Algunas de las ventajas de este tipo de detectores son: amplio rango de sensibilidad desde los muy bajos hasta los mas grandes en un reactor controlado, tamaño pequeño para lugares sumamente estrechos, permitir realizar mediciones de la actividad en un lugar distinto al campo de radiación.^[15]



Figura 1.9 Detector de Activación Inducida, Cartel Detección de neutrones mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos, IFUNAM.

1.4.3. Trazas Nucleares en Sólidos (TNS)

Con el paso de partículas nucleares y de iones pesados a través de un material sólido semiconductor se crean finos patrones de daño, creando lo que se conoce como *trazas nucleares en sólidos*. Las trazas producidas por las partículas, son huellas estables formadas a lo largo del camino trazado por la partícula debido a la ionización y por desplazamientos atómicos producidos por la radiación ionizante.^{[25][23]} Posterior a que la radiación ionizante deja una huella de su paso en el interior del sólido, el siguiente paso es la formación de la traza mediante el grabado químico. Este consiste, en la disolución química del material a lo largo de la huella de la partícula, así como una disolución a ataque general de la superficie removida del material (Figura 1.10).^[23] Finalmente, después del revelado mediante un ataque químico al material sólido, se obtiene una traza de entre 10 y 100 μm por efecto de la radiación recibida. La manera más directa para identificar y caracterizar las trazas, es mediante el uso de un microscopio óptico. Para la lectura de las trazas se utiliza una muy amplia gama de métodos, desde los analógicos a los computarizados para digitalización de la imagen.^[23]

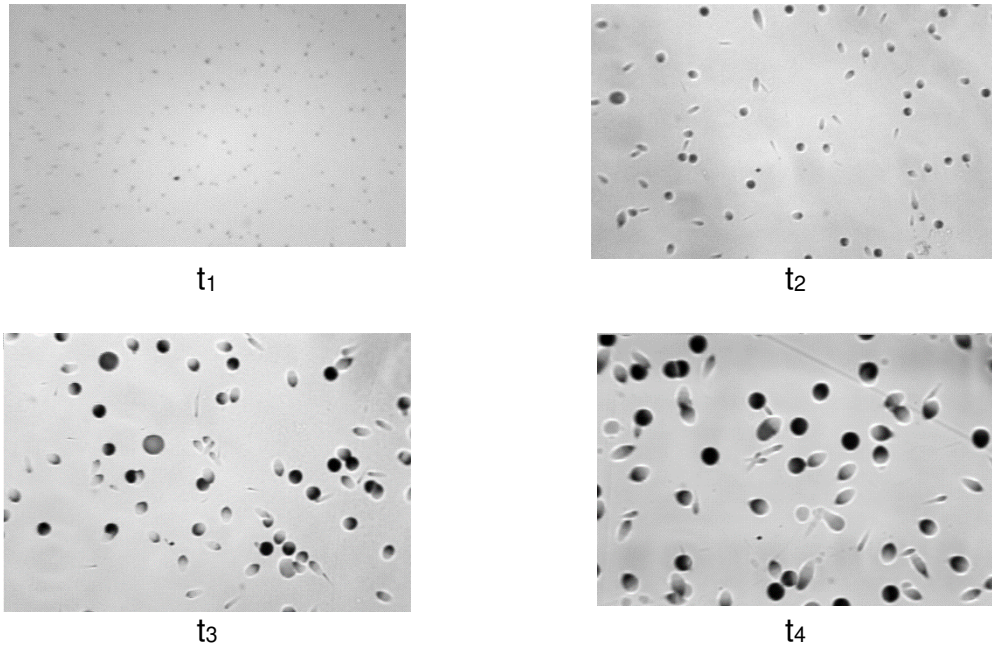


Figura 1.10 Imágenes de Trazas Nucleares, para diferentes tiempos de ataque químico $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$, (PAD) - IFUNAM

Estos métodos de detección y medición de neutrones son los más comunes empleados actualmente.

Capítulo 2

METODOLOGÍA

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL MÉTODO DE TRAZAS NUCLEARES EN SÓLIDOS (MTNS)

En 1958 Young fue de los primeros en reportar trazas latentes dejadas por partículas nucleares en un material sólido.^[24] Un año más tarde, en 1959, Silk y Barnes reportaron el daño en mica causado por partículas cargadas pesadas^[25]; al igual que Price y Walker, que en 1962 observaron cualitativamente el daño hecho por fragmentos de fisión;^[26] En ambos casos gracias al uso del microscopio electrónico de transmisión (TEM por sus siglas en inglés). Para 1965, Fleischer estudió extensamente este método y lo aplicaría en mica, así como otros materiales tales como minerales, plásticos y vidrios.^[27]

Después de varios estudios de diferentes materiales poliméricos,^[28, 29] se encontró que la mayoría de los materiales plásticos mostraban:

- a) baja sensibilidad
- b) sección eficaz pequeña para la producción de núcleos de retroceso
- c) inhomogeneidad propia del material, entre otros aspectos.

Muchas de estas características no deseadas para la detección de neutrones rápidos, se resolvieron con la aparición del CR-39 (policarbonato alil diglicol) como material detector.

2.2. MÉTODO DE TRAZAS NUCLEARES EN SÓLIDOS (MTNS)

El Método de Trazas Nucleares en Sólidos (MTNS), se caracteriza por ser un método de detección sencillo que no requiere de accesorios muy especializados o difíciles de conseguir. Además, para obtener resultados solo se requiere de un sistema óptico que se puede encontrar en casi cualquier laboratorio (incluso escolar). Basta con un conteo de la cantidad de trazas por unidad de superficie, para tener un valor de la cantidad de partículas incidentes sobre el detector, y si se requiere también es posible determinar la energía de la partícula incidente a partir del diámetro de la traza formada en la superficie.

La metodología puede resumirse en 3 etapas que son:



Figura 2.1 Diagrama del método para la detección por trazas nucleares en sólidos.

2.2.1. Exposición a la Radiación

La exposición del material detector a un flujo de radiación ionizante puede producir ionización a través del material, siendo esta lo bastante extensa dependiendo de la energía, la carga y la masa de la partícula incidente, así como de las propiedades del medio.

2.2.1.1. Detección de Neutrones Mediante MTNS (Reacción (n, p))

La detección de neutrones se da por una interacción nuclear con los átomos y moléculas del material detector, en particular la detección se basa en las reacciones (n, p) con los núcleos atómicos del material. Estas reacciones, en su mayoría colisiones elásticas, producen protones de retroceso que al ser expulsados generan la traza latente por ionización a su paso, dejando una huella del lugar en el cual se llevó a cabo la interacción del neutrón con el material.^[30]

2.2.1.2. Formación de la Traza Latente

Las partículas cargadas que pasan a través de materiales dieléctricos (cristales, vidrios inorgánicos), producen trazas submicroscópicas de daño continuo a lo largo de su paso, como se muestra en la Figura 2.2.a. Estas trazas consisten de material dañado por la radiación y son llamadas *trazas latentes*, ya que son demasiado pequeñas para ser vistas con la ayuda de un microscopio óptico, aunque bajo un TEM pueden ser vistas como un rasguño estrecho, con una dimensión de varios nm, en la superficie del detector.^[31,32] El paso de esta radiación ionizante produce un desplazamiento atómico dentro del material, indicando que gran parte de los átomos y moléculas atravesadas por la partícula son ionizados. Se crean entonces, radicales libres y una orientación electrostática inestable a lo largo del patrón de ionización, que dan lugar a una repulsión entre los iones formados dentro del material, desde sus sitios originales hacia nuevas posiciones intersticiales.^[23, 32]

En el cristal el daño consiste de un desorden continuo compuesto de sitios de la red cristalina con vacancias e iones o átomos intersticiales. En el polímero se rompen cadenas y también se forman nuevos sitios químicamente reactivos. Ver Figura 2.2.b.

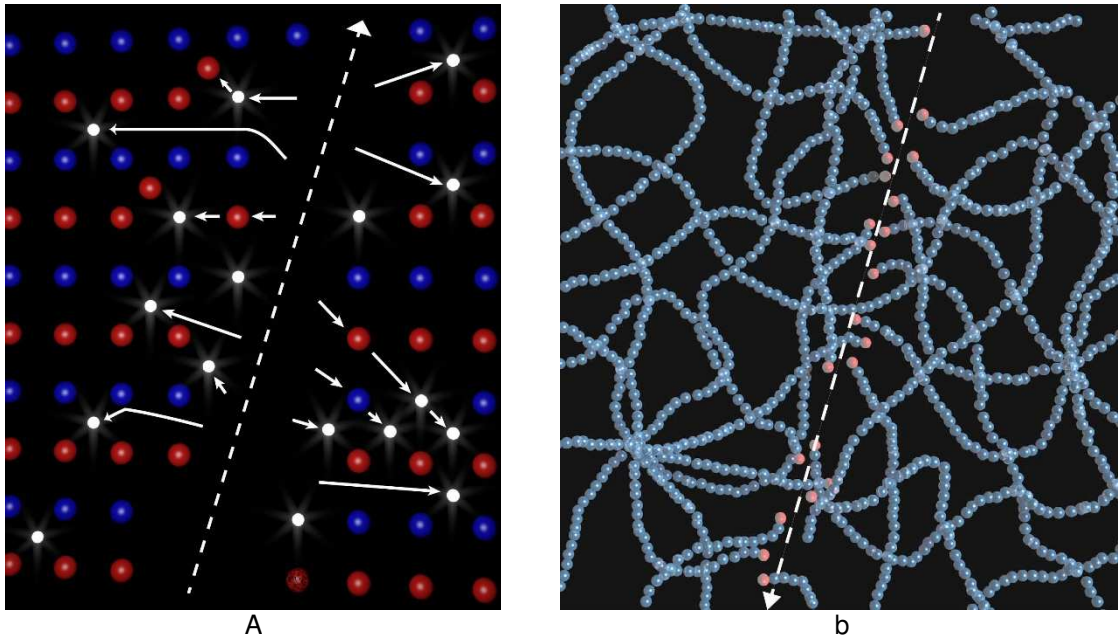


Figura 2.2 Esquema del paso de una partícula en (a) un cristal y (b) un polímero. [29]

2.2.1.3. Frenado de Partículas Cargadas en la Materia

Cuando una partícula se propaga a través de la materia, se desplaza perdiendo su energía por interacciones con el medio. El valor esperado de la tasa de energía perdida por unidad de longitud de camino x por una partícula de tipo Y y energía cinética E , en un medio de número atómico Z , es llamado *poder de frenado* $(dE/dx)_{YEZ}$, con unidades de (MeV/cm). Dividiendo el poder de frenado por la densidad ρ del medio absorbente resulta en *el poder másico de frenado* $(dE/\rho dx)_{YEZ}$, en $((\text{MeV} \times \text{cm}^2)/g)$.

Esta fórmula derivada por Bethe puede ser escrita como.^[5,12, 33]:

$$\left(\frac{dE}{\rho dx}\right) = \frac{2Cm_e c^2 z^2}{\varepsilon^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 z^2}{I^2 (1-\varepsilon^2)} \right) - \varepsilon^2 \right] \quad 2.1$$

- m_e = masa de electrón
- c = velocidad de la luz
- N_A = número de Avogadro
- A = peso atómico del blanco
- z = carga de proyectil

donde $C \equiv \pi(N_A Z/A)r_0^2 = 0.150Z/A$ (cm^2/g), en la cual $N_A Z/A$ es el número de electrones por gramo del medio frenante, $r_0 = (e^2/(m_e c^2)) = 2.818 \times 10^{-13}$ cm es el radio clásico del electrón, y $\varepsilon = \frac{v_0}{c}$ de la partícula incidente, El término de lo contenido en parte de la fórmula (2.1) puede ser definido simplemente como:

$$k \equiv \frac{2Cm_e c^2 Z^2}{\epsilon^2} = 0.1535 \frac{ZZ^2}{A\epsilon^2} \frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}} \quad 2.2$$

donde $m_e c^2 = 0.511$ MeV, la masa en reposo del electrón.

El término I conocido como potencial de ionización del medio es un valor que solo depende del medio y no de la partícula incidente, aunque en general I no puede ser calculado teóricamente para cada elemento, si puede ser determinado experimentalmente. Para lucita por ejemplo $I=74.0$ eV.^[33]

Para materiales compuestos el poder másico de frenado puede ser aproximado suponiendo que cada elemento en el material contribuye independientemente al poder de frenado pero que sus efectos pueden ser sumados individualmente.

En términos de las fracciones de peso f_{Z1} , f_{Z2} de elementos de número atómico Z_1 , Z_2 , etc., presentes en el compuesto, el poder másico de frenado $\left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{cmp}$ puede ser escrito como:

$$\left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{cmp} = f_{Z1} \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{Z1} + f_{Z2} \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)_{Z2} + \dots$$

donde todos los poderes de frenado se refieren a una energía cinética en común y a un solo tipo de partícula cargada.^[33]

2.2.1.4. Alcance en el Medio (R)

Definimos el *alcance* (R) de una partícula cargada que incide sobre un medio material como la máxima distancia de penetración en dicho medio, en el caso de partículas cargadas pesadas, la trayectoria puede considerarse como rectilínea, ya que las colisiones con electrones atómicos solo le producirán pequeñas desviaciones.^[9] Esta magnitud usualmente se maneja en unidades de masa por unidad de área (g/cm^2).

Una magnitud similar, pero no idéntica, es llamada *alcance CSDA* (R_{CSDA}) por sus siglas en inglés (Continuous Slowing Down Aproximation Range). El cual, representa una aproximación del alcance con un frenado continuo.^[33] En términos del poder másico de frenado, el alcance *CSDA* se define como:

$$R_{CSDA} \equiv \int_0^{E_0} \left(\frac{dE}{\rho dx}\right)^{-1} dE \quad 2.3$$

2.2.1.5. Selección del Material

La producción de trazas está basada en colisiones elásticas de neutrones rápidos con la materia, por lo que la forma más favorable para producir estas reacciones es

emplear núcleos ligeros como blanco por su alta sección eficaz para dispersiones elásticas, transfiriendo la mayor parte o el total de la energía cinética del neutrón al núcleo en retroceso y logrando así una mayor penetración de la partícula ionizante en el material, esto hace al protón en el hidrógeno el mejor de los núcleos para ser dispersado.

2.2.1.6. Materiales Sensibles

Diversos grupos de investigación han empleado materiales plásticos ricos en hidrogeno como el acetato de celulosa, el nitrato de celulosa (LR-115), y el policarbonato, para la detección de trazas,^[15, 34, 35, 36, 37, 38] por la sensibilidad que muestran frente a neutrones rápidos, al generar entre 3×10^{-6} (tr/n) y 2×10^{-5} (tr/n) dependiendo de la energía y del plástico empleado. Estos materiales son excelentes para ser expuestos ante grandes flujos de neutrones rápidos como los generados en un reactor nuclear. Además, son plásticos que también son sensibles a la formación de trazas de neutrones epitérmicos.^[39] por lo que, si bien su uso como posibles materiales sensibles amplía el espectro de detección para este trabajo, hay que considerar su eficiencia para diferentes intervalos de energías y restringir este intervalo de detección. Cabe destacar que esto también implica un incremento en la cantidad de trazas formadas y en consecuencia una posible saturación en el material detector.

Se han hecho estudios usando neutrones rápidos para comparar al LR-115 con el CR-39 encontrando que el segundo resulta ser bastante superior en la detección debido a la interacción y producción de protones de retroceso.^[30]

2.2.1.7. CR-39 Como Material Detector

En este trabajo se seleccionó el CR-39 como material detector para medir el flujo de neutrones producido en el reactor nuclear, a diferentes potencias de operación.

El CR-39 (Figura 2.3) es un plástico que tiene una composición química de carbono, hidrógeno y oxígeno ($C_{12}H_{18}O_7$), la ventaja al emplear este material en la detección de neutrones radica en las reacciones (n, p) gracias a la abundancia de núcleos 1H del material, dando lugar a colisiones elásticas que producen protones de retroceso, y aunque también son posibles las reacciones (n, α) con los núcleos C y O, estas son mucho menos probables.

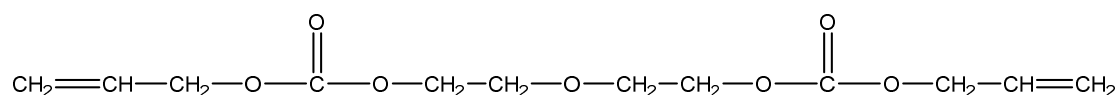
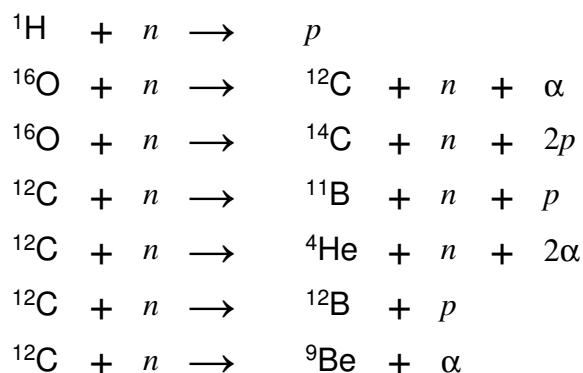


Figura 2.3 Fórmula desarrollada del CR-39

Entre las posibles reacciones nucleares que pueden ocurrir por la interacción de neutrones con los átomos del CR-39 se encuentran:^[40]



n = neutrón

p = protón

α = radiación alfa

Cada elemento químico que compone la molécula de CR-39 tiene una sección eficaz para cada elemento, que sirve de blanco para los neutrones. Ver Tabla 2.1.

Elemento	Abundancia	Sección eficaz (barn)
${}^1\text{H}$	48.648%	$10^{-4} - 10^4$
${}^{12}\text{C}$	32.432%	$10^{-4}-1$
${}^{16}\text{O}$	18.918%	$10^{-4}-10^2$

Tabla 2.1 Abundancia y sección eficaz de cada elemento presente en el CR-39. [20]

Las ventajas de emplear CR-39 como material detector de neutrones rápidos son: la insensibilidad ante exposición a radiación beta y gamma, no presenta cambios frente a variaciones considerables en las condiciones ambientales como temperatura, humedad, presión atmosférica, altitud,^[41] y responde a un amplio rango de energía de neutrones rápidos ya que es bien conocida la respuesta de este material para su detección con energías entre los 0.5 MeV y los 20 MeV. [42, 43, 44, 45]

2.2.1.8. Material Convertidor

El material convertidor seleccionado para este trabajo fue el polimetilmetacrilato ($\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8$), conocido también de manera comercial como acrílico o lucita. Este material, se eligió por contener una alta cantidad de átomos de hidrogeno (Tabla 2.2), por su capacidad de filtrar luz ultravioleta (entre un rango de 300 a 400 nm) sin sufrir grandes cambios por largos periodos, porque no contiene metales pesados y además, es 6 veces más duro que el vidrio y más ligero que éste. [46]

Elemento	Abundancia
¹ H	53.333%
¹² C	33.333%
¹⁶ O	13.333%

Tabla 2.2 Abundancia de cada elemento presente en el acrílico.

2.2.2. Grabado Químico

El medio más general y útil de observación de trazas de partículas en los sólidos, ha sido la técnica de ataque químico preferencial para agrandar y visualizar las trazas. La utilidad de esta técnica, se deriva de su simplicidad, puesto que solo se necesita usar productos químicos comunes y de la magnificación que resulta de agrandar la traza grabada a un tamaño que pueda ser visto con un microscopio óptico ordinario. ^[38]

Inicialmente, el material es expuesto a la radiación ionizante. Posteriormente, es sometido a un ataque químico resultando un desgaste superficial del material. Así, las zonas donde incidió la radiación ionizante presentan un desgaste preferencial formando un cono bien definido a lo largo de la trayectoria de la partícula incidente. La huella dejada por el desgaste se conoce como *traza grabada*.^[23]

Los parámetros básicos en este proceso de revelado son: características del material detector, tipo de solución química de grabado y sus características como concentración, temperatura y tiempo de permanencia del material detector en la solución. A este proceso se le llama "Grabado Químico". En general, un recipiente con la solución y un baño de agua de temperatura controlada (baño maría) serán suficientes para esta etapa del proceso.

2.2.2.1. Método de Grabado

Para el grabado de plásticos, los métodos más comunes emplean soluciones de NaOH o KOH en concentraciones de 1-12M y a temperaturas entre los 40-70 °C. Los materiales como vidrios y cristales minerales usados en la MTNS son grabados en soluciones HF a temperatura ambiente (Tabla 2.3). Para trabajos que requieran de una alta precisión son preferibles los tiempos de grabado extensos, al igual que un fino control en la estabilidad de la temperatura de la solución durante el grabado, esto con el objetivo de garantizar la reproducibilidad de cualquier experimento.

Material	Solución de Grabado	Temperatura °C
Polycarbonato	Solución acuosa de NaOH, 1-12M	40-70
Nitrato de celulosa	Solución acuosa de NaOH, 1-12M	40-70
CR-39	Solución acuosa de NaOH, o KOH, 1-12M	40-70
Mica	48% HF	20-25
Vidrio	1-48% HF	20-25
Circonio	11.5 g de KOH + 8 g de NaOH	200-220

Tabla 2.3 Algunos métodos de grabado utilizados en MTN^[29, 47]

2.2.2.2. Formación de la Trazas para v_T Constante

La formación de la traza mediante el grabado químico consiste en la disolución química del material, a lo largo de la trayectoria de la partícula a velocidad (v_T), y un desgaste general en la superficie del material a velocidad (v_G). [29]

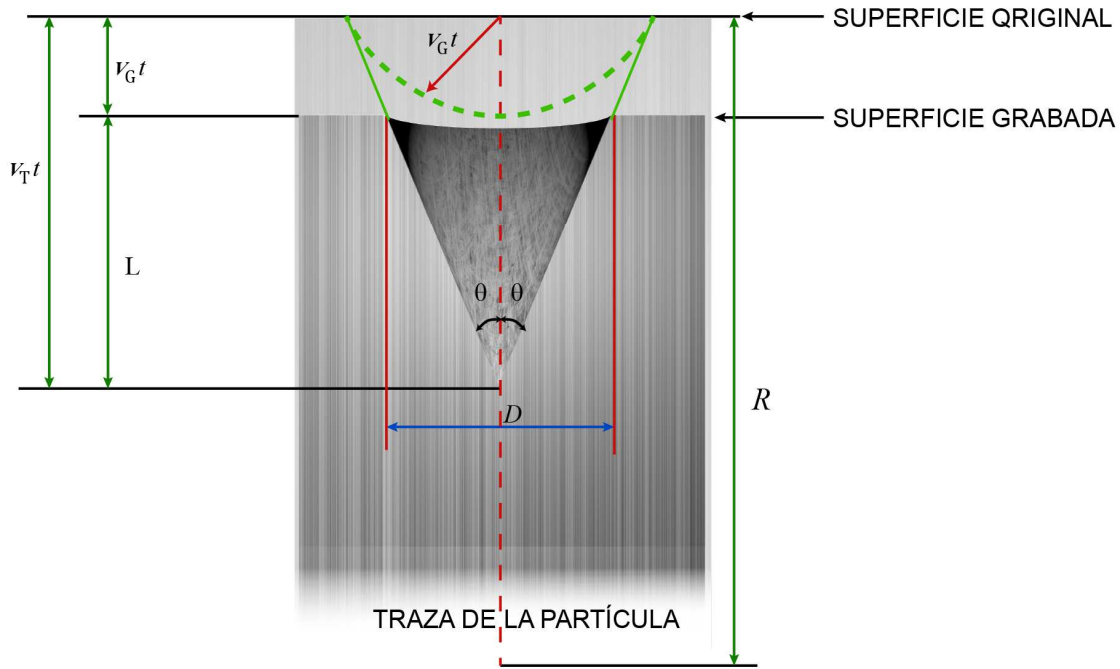


Figura 2.4 Geometría de la traza formada por una partícula que incidió verticalmente con v_T y v_G constante

Considerando el caso más simple, como se muestra en la Figura 2.4 donde la traza formada es ortogonal a la superficie del material, el desgaste en la superficie se da al mismo tiempo que se desarrolla la traza, por lo que la profundidad de la traza L y su diámetro D resultan ser parámetros medibles para este caso, y son el resultado de la competencia entre el desgaste general v_G y el desgaste por la traza v_T , a velocidades diferentes pero a un ritmo constante; además la pequeña ventaja en la velocidad de desgaste v_T sobre v_G da lugar al ángulo del cono formado $\theta = \arcsen(v_G / v_T)$.

El suponer una geometría simple permite establecer estas magnitudes medibles en términos de los parámetros de grabado para un tiempo de grabado t :

$$L = (v_T - v_G)t \quad 2.4$$

$$D = 2v_G t \sqrt{\frac{v_T - v_G}{v_T + v_G}} \quad 2.5$$

Es de esperar que cuando las velocidades de desgaste de la traza (v_T) y de desgaste general en la superficie (v_G) son iguales, la profundidad L y el diámetro D de la traza sean iguales a 0, es decir que no haya formación de traza.

La ecuación (2.4) solo aplica para cuando $v_T t$ es menor que el alcance R , es decir la distancia desde la superficie original hasta la punta del cono formado, es menor que la distancia recorrida por la partícula ionizante dentro del material, y sobre este intervalo se mantiene constante el ángulo θ durante el grabado en este intervalo de distancia; en tanto que la ecuación (2.5) aplica para tiempos de grabado dados por:

$$t < \frac{2R}{V_G}$$

Es decir, para tiempos en los cuales la distancia del desgaste superficial sea menor que la mitad del alcance R de la partícula.

Cabe mencionar que también es posible dar los parámetros de grabado en términos de los datos medibles L , D y θ :

$$v_G t = \frac{D}{2} (\tan \theta + \sec \theta) \quad \mathbf{2.5}$$

$$v_T t = \frac{D}{2} \csc \theta (\tan \theta + \sec \theta) \quad \mathbf{2.6}$$

2.2.2.3. Formación de la Traza para v_T Variable

Si bien el caso anterior es un caso ideal que solamente puede ser considerado para tiempos cortos de grabado, en la práctica sucede que la velocidad v_T a la que se forma la traza puede variar por factores como el poder de ionización de la partícula. Sin embargo, esta variación de v_T ofrece la ventaja de poder identificar la partícula incidente o su energía a partir de la traza formada. El problema entonces es que, dada v_T que disminuye a lo largo del eje de la traza latente, hay que encontrar la longitud de la traza L , su diámetro D , y un perfil detallado de la traza como función del tiempo de grabado. La manera en la que la traza toma una forma geoméricamente convexa puede ser explicada por un modelo conocido como "Lancha de Motor" (motorboat analogy) por su analogía con las ondas dejadas sobre el agua por una lancha en movimiento.

En la Figura 2.5, el perfil de la traza es similar a las ondas de una lancha (que se mueve a velocidad v_T y las ondas se propagan en la superficie del agua a velocidad v_G). Mientras la lancha se mueva a velocidad constante v_T , el ángulo entre las ondas será $\arcsen(v_G / v_T)$. Cuando la lancha desacelera las ondas toman una forma redondeada al frente y cuando acelera las ondas adquieren una forma cóncava.

La traza conserva su punta casi hasta el final donde la partícula alcanzó a desplazarse, y más allá se redondea. Su diámetro aumenta monótonamente al principio del grabado; y aunque las diferencias entre los diámetros se hacen evidentes para tiempos de grabado más prolongados, también conlleva a la

desaparición de la punta de la traza y puede dificultar diferenciarla de la superficie del material.^[29]

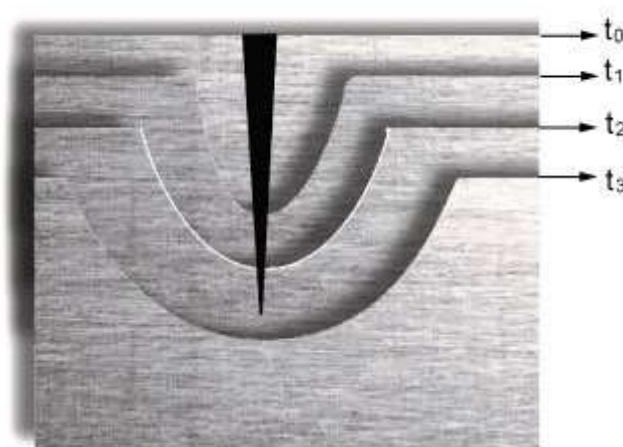


Figura 2.5 Trazas cuya intensidad de daño varía a lo largo de su trayectoria a tiempos $t_0 < t_1 < t_2 < t_3$

2.2.3. Análisis de la Trazas

La etapa final de la MTNS es la observación y registro de las trazas reveladas por el grabado químico. La información básica necesaria en muchos de los estudios con trazas nucleares consiste en la obtención de la densidad de trazas, aunque en algunos casos se requiere ser más selectivo para caracterizar los distintos tipos y formas que pueden presentarse.

Usualmente basta con observar la superficie del detector a través del microscopio y hacer un conteo de las trazas presentes en el campo de visión. También existen otros medios más complejos de observación basados en contadores de bacterias, lectores de microfichas, densitometría, microscopía de fuerza atómica, interferometría láser, dispersión de luz,^[48, 49, 50] y actualmente los más avanzados por medio de digitalización de imágenes.^[10, 51, 52] En general, se puede considerar como una evolución en los sistemas de análisis y conteo.^[23]

2.2.3.1. Conteo y Análisis de las Trazas Formadas

Si contamos el número de trazas grabadas por unidad de área, nos dará una relación de las partículas que llegaron al material, es decir el flujo; y como ya se mencionó en la formación de la traza para v_T variable, con datos como el diámetro de las trazas y su profundidad, es posible determinar también la energía de la partícula.^[53]

Desde hace más de 20 años,^[54, 55, 56] ya se tenían sistemas de conteo automáticos mediante la digitalización de imágenes capaces de procesar detectores con densidad de trazas del orden de 2×10^5 (tr/cm²),^[10, 52] lo que hace posible visualizar el potencial que tienen los sistemas más recientes.

Parte importante del registro de trazas es saber diferenciar entre una traza generada por una partícula ionizante, y aquellas imperfecciones en el material conocidas como artefactos,^[57, 58] con el objetivo de lograr un mejor registro de lo que se puede considerar como una traza genuina.

2.3. PREPARACIÓN DE LOS DETECTORES

Cada plástico detector es provisto por el fabricante con una película plástica en ambas caras de su superficie que lo protegen del polvo y rayones ligeros, por lo que para trabajar con cada detector es necesario remover esta protección.

Para realizar el trabajo con mayor limpieza, este se lleva a cabo con ayuda de guantes latex y nos apoyamos con ayuda de pinzas de plásticos para moverlos de las orillas del CR-39.

Se colocó una placa de 3 mm de acrílico en una de las caras del detector que sirve de material convertidor. El objetivo del acrílico es que al tener un alto contenido de ^1H , produzca más reacciones (n, p) con sus hidrógenos y sea mayor la cantidad de protones de retroceso que generen trazas latentes en el detector de CR-39.

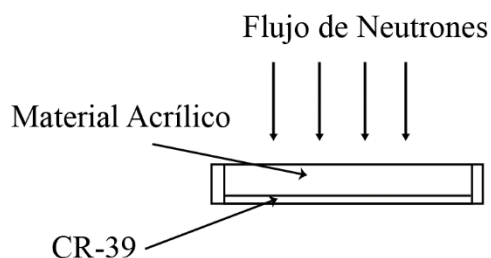


Figura 2.6 Esquema del arreglo de los detectores para la irradiación con neutrones.

Un set de 5 detectores con esta configuración fue ensamblado, en la Figura 2.6 se muestra el esquema del ensamble de los dispositivos.

Ya que los detectores cuentan con un número de serie propio en una de las caras, es posible identificar el tiempo y las condiciones de irradiación para cada uno, los dispositivos ya ensamblados fueron irradiados en diferentes etapas usando un reactor nuclear de investigación como fuente de neutrones.

2.4. FUENTE DE NEUTRONES

La fuente a la que fueron expuestos los detectores fue un reactor de investigación nuclear tipo TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics) modelo Mark III, con el fin de estimar la potencia a la que opera a partir del flujo de neutrones detectados en una salida en particular.

El TRIGA Mark III, como reactor de investigación, se utiliza básicamente como una fuente intensa de neutrones y de radiación gamma. por lo que, para aprovechar estas radiaciones, cuenta con varias instalaciones experimentales y canales de irradiación, como se muestra en la Figura 2.7. Este equipo, ofrece una gran variedad de posibilidades de irradiación de muestras o equipos a diferentes niveles de exposición o componentes del espectro de irradiación.^[59]



Figura 2.7 TRIGA Mark III tomado de la página del ININ

2.4.1. Condiciones de Exposición

El flujo de neutrones a la que se expusieron los detectores fue generado en el reactor TRIGA Mark III del ININ, la exposición de los detectores se llevó a cabo en un extremo de la piscina, donde se localizan ocho puertos o tubos de haces, que van desde el interior de la piscina, atraviesan el concreto, y llegan hasta el exterior del blindaje. Estos se colocaron en el puerto de irradiación tangencial TO-2 (Figura 2.8) que cuenta con un diámetro de salida de 20 cm, y se produce un flujo de neutrones de 2×10^{12} ($n/(cm^2s)$),^[60] haciendo posible colocar varios dispositivos de detección por cada sesión de irradiación.

Se colocó un grupo de 2 detectores en el puerto de irradiación, se irradiaron durante 10 minutos mientras el reactor operaba a una potencia constante de 0.1 kW. Pasado este tiempo, se detuvo el flujo de neutrones en este puerto y se dio tiempo para que decayeran los isótopos con vida media corta que se produjeron dentro del puerto tangencial TO-2. Se retiraron los dos detectores y se cubrieron con papel aluminio para protegerlos de la radiación ambiental hasta el momento del grabado químico. Se procedió a colocar un nuevo dispositivo, en el mismo puerto; esta vez fue irradiado con el reactor operando a una potencia de 100 W. Este procedimiento se repitió con cada dispositivo variando la potencia de operación a 3 kW, 5 kW y 7 kW.

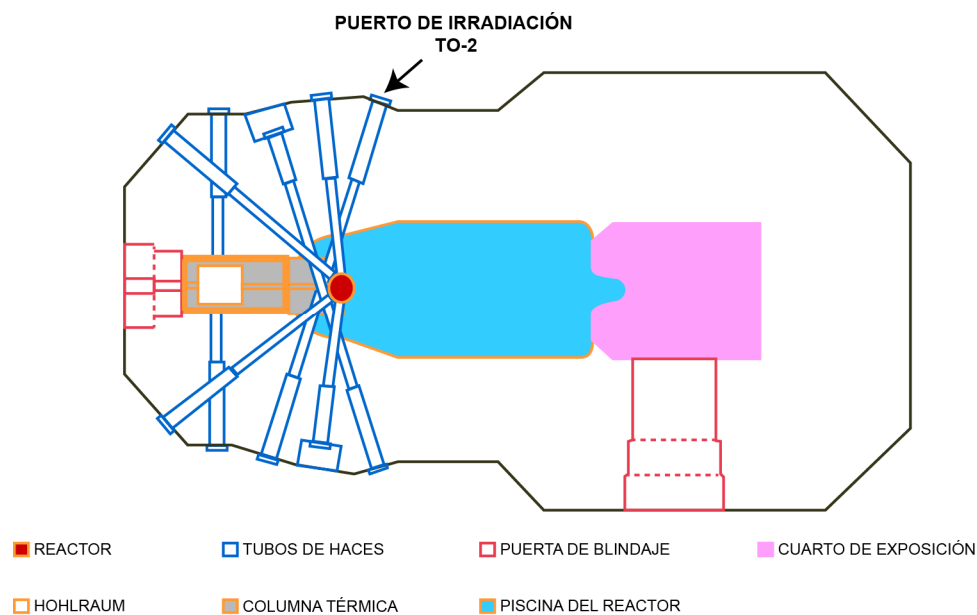


Figura 2.8 Esquema del reactor TRIGA Mark III. En la parte superior de la imagen se muestra la posición donde se colocaron los dispositivos para ser irradiados.

2.4.2. Condiciones de Grabado Químico

El grabado químico se llevó a cabo en un sitio distinto al de irradiación, específicamente en el Laboratorio de Trazas Nucleares, que forma parte del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría, en el Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (IFUNAM).

Los detectores plásticos fueron grabados en una solución de KOH (Hidroxido de potasio) siguiendo el protocolo establecido.^[61, 62]

El desgaste durante el procedimiento de grabado suele ser de $1.2 \mu\text{m}$ en la superficie del material por cada hora de ataque químico.^{[50]32} Para una solución 6.25N de KOH a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ el desgaste se determinó entre 1.2 y $1.3 \mu\text{m}$. Al realizar un procedimiento para determinar la tasa de desgaste de esta solución, la MTNS emplea protocolos de grabado para el revelado de trazas de neutrones que van de 3 hasta 18 horas de grabado a temperatura constante,^[23, 61, 63, 64] dependiendo de la densidad de trazas estimada.

2.4.3. Grabado Químico

Utilizando guantes de látex para no tocar los detectores plásticos directamente con los dedos, los 5 detectores se colocaron uno a uno en el dispositivo para grabado procurando que las caras de los detectores no se toquen entre sí, y permitiendo así un desgaste uniforme en toda la superficie de cada detector.

El dispositivo de grabado, ya con los detectores plásticos en él, fue sumergido dentro del recipiente con la solución de KOH que se encuentra en el baño térmico y se cubrió nuevamente para evitar pérdidas por evaporación o cambios en la

concentración, además es necesario que este paso se realice rápidamente para conservar estable la temperatura de la solución. El tiempo de grabado para el revelado de trazas de este trabajo se estableció en una sesión de 6 horas continuas.

Cumplidas las 6 horas de grabado,^[54] el dispositivo que contiene los detectores se retiró de la solución de KOH, e inmediatamente fue sumergido en agua destilada para enjuagarlos por completo de la solución residual que pudo quedar en la superficie de los detectores; se cambió el agua después de este primer lavado y se repitió el enjuague para garantizar que los detectores quedaron libres de KOH.

Una vez lavados, cada detector fue retirado del dispositivo de grabado cuidando minuciosamente de evitar cualquier daño mecánico a la superficie de estos al momento de ser retirados. Uno a uno los detectores se colocaron sobre papel higiénico absorbente y se les dejó secar a la sombra a temperatura ambiente. Después de este paso los detectores estuvieron listos para ser leídos.

2.5. CONDICIONES DE LECTURA

Una parte vital en la MTN es la lectura de los detectores de trazas nucleares posterior a la exposición, ya que es aquí donde se tendrán los resultados finales de la interacción de los neutrones con cada detector, de manera que una mala lectura de las trazas grabadas dará resultados erróneos, aun cuando los procesos de exposición y grabado se hayan llevado a cabo correctamente.

Debido a que el sistema de conteo manual puede demorar demasiado tiempo si se tienen varias muestras para analizar en un tiempo muy limitado, se ha buscado desarrollar diferentes métodos de lectura. Es desde la década de los 80 que también se han desarrollado sistemas de lectura propios en el IFUNAM, mediante la captura y digitalización de imágenes, ofreciendo ventajas en comparación con otros sistemas.^[65, 66, 64]

2.5.1. Registro Digital de los Detectores

Los detectores fueron analizados utilizando el más reciente sistema para conteo y análisis digital CADIS (Counting and Analysis Digital Imaging System) desarrollado en el IFUNAM.^[69]

Con una ganancia de 200X, se observaron a través de un microscopio óptico las trazas reveladas de cada detector en la cara que fue expuesta directamente al haz de neutrones, y con una cámara digital fijada al microscopio se registraron imágenes digitales de seis campos distintos escogidos al azar para cada detector; con ayuda de una escala micrométrica, también se registró el tamaño del campo observado para realizar posteriormente la conversión en escala de pixeles a micras.

2.5.2. Análisis de las Imágenes

Cada imagen registrada debió ser convertida a un formato digital de alta resolución BMP (Mapa de bits) para poder ser procesada por el software que forma parte del sistema CADIS, se identificaron y contaron para cada fotografía las trazas formadas y los diferentes diámetros que presentaron. Ya que, al digitalizar la imagen del campo seleccionado, solo se podía determinar el tamaño de los objetos por la cantidad de píxeles que abarcaban, se optó por analizar cada imagen, buscando trazas con diámetros entre 5 y 100 píxeles, cualquier objeto con dimensiones mayores o menores que estos parámetros no fue considerado como una traza.

Después de este conteo general, también se hizo un conteo en la cantidad de trazas de acuerdo con sus diámetros, por intervalos de 5 en 5 píxeles, para encontrar no solo la cantidad de trazas generadas, sino una distribución de su tamaño para cada potencia de operación.

Capítulo 3

INSTRUMENTACIÓN

Mediante la Metodología de Trazas Nucleares en Sólidos como se llevó a cabo la detección de los neutrones para este trabajo, Se divide en tres etapas principales: la exposición a la radiación, el revelado químico de la traza, la lectura y caracterización de la traza. En este capítulo, se presenta una descripción detallada de la instrumentación que se utilizó para llevar a cabo el MTNS.

3.1. DISPOSITIVOS DE DETECCIÓN

Se utilizaron laminillas de CR-39 marca Lantrackr (Figura 3.1) como material de detección de neutrones, cortadas por el fabricante en pequeñas piezas de 1.8 x 0.9 cm y 600 µm de grosor y numeradas individualmente.



Figura 3.1 CR-39 Lantrackr (PAD) – IFUNAM

A cada laminilla de CR-39 se le retiró la protección plástica; la cubierta de acrílico (Plexiglas®) de 3 mm de grosor actúa como material moderador, esta se retiró de la cara sin numerar de la laminilla. En total se ensamblaron 6 dispositivos con estas características.

3.2. FUENTE DE NEUTRONES REACTOR TRIGA MARK III

El Reactor de Investigación Nuclear “Salazar” (RINS) proporcionó las facilidades para la irradiación con neutrones a los detectores pasivos, se encuentra localizado en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) en el municipio de Salazar en el Estado de México, este reactor se encuentra en operación desde 1968. ^[67]

3.2.1. Descripción del Reactor

El reactor de investigación TRIGA Mark III (producción de radioisótopos, estudios de materiales y entrenamiento de personal) de Salazar es un reactor de tipo piscina enfriado y moderado con agua ligera (agua). La piscina mide 7.60 m de largo por 3.10 m de ancho y 7.6 m de profundidad con un recubrimiento de aluminio que va de los 6.3 mm en la parte superior a los 19 mm en el fondo. Esta tina de aluminio

está contenida por una estructura de concreto reforzado de 17 m de largo por 10 m de ancho, y un blindaje en la base del reactor de 1.5 m.

El reactor opera a diferentes potencias dependiendo del requerimiento experimental, cuyo espectro de neutrones típico está a 1MW, ver la Figura 3.2. Aunque este espectro, puede cambiar dependiendo de la geometría del canal de irradiación y el material filtrante.

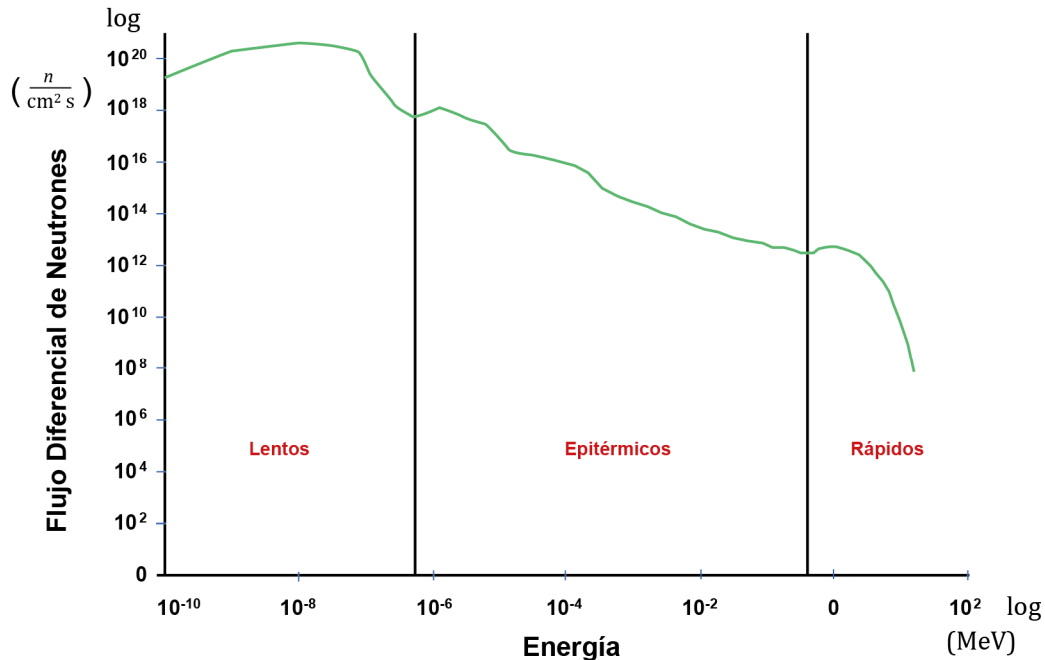


Figura 3.2 Espectro típico de neutrones del Reactor de Investigación Triga MARK III de Salazar. Las regiones correspondientes a los grupos de energías (térmicos, epitérmicos, y rápidos) para neutrones son claramente visibles.

3.2.2. Núcleo del Reactor

El núcleo del reactor se encuentra conformado por un arreglo circular de 6 anillos concéntricos alrededor de un posicionador central conocido como dedal central, como se muestra en la Figura 3.3. Cada anillo es identificado con una letra y la posición en este con un número, el más interno es el B y cuenta con 6 posiciones, el siguiente es C con 12, D con 18, y el último anillo es el G con 36 posiciones. Los cinco anillos internos contienen 85 elementos de ^{235}U como combustible moderador y 4 barras de control (Figura 3.3).

El núcleo del reactor tiene un total de 6036.00 g de ^{235}U . Los 26 elementos de combustible (elementos TRIGA-FLIP) en los anillos internos C y D son de uranio altamente enriquecido al 70% (HEU por sus siglas en inglés), mientras que los 59 elementos restantes que conforman los anillos B, E y F son de uranio con bajo enriquecimiento al 20% (LEU por sus siglas en inglés). El sexto anillo G que rodea

el núcleo de uranio está conformado por 34 barras de grafito que actúan como material reflector de neutrones para mejorar la producción de estos.^[59]

En conjunto, el núcleo del reactor se encuentra sumergido en una alberca llena de agua desmineralizada (agua común tratada), y proporciona un flujo de 2×10^{12} ($n/(cm^2 s)$) en el canal de irradiación TO-2.^[60]

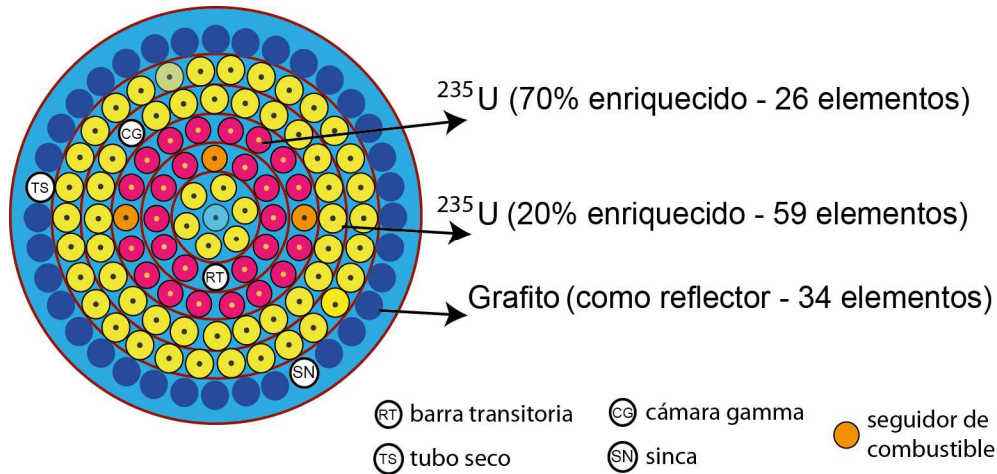


Figura 3.3 Configuración del núcleo del reactor TRIGA Mark III al momento de la irradiación.

3.3. GRABADO QUÍMICO

El material y equipo empleados en el grabado químico suele ser básico y de sencillo manejo, es por esto que el MTNS forma parte del Proyecto de Aplicaciones de la Dosimetría (PAD) del IFUNAM.

3.3.1. Solución de Grabado

La solución de KOH 6.25N se preparó utilizando gránulos de hidróxido de potasio (KOH), de la marca J.T. Baker[®]. Se pesaron exactamente 355 g e inmediatamente se depositaron en un matraz aforado de 1 L. El pesaje de los gránulos se realizó rápidamente para que estos no absorbieran la humedad del ambiente, ya que el KOH es altamente higroscópico. Para la preparación de la disolución, el matraz aforado con los gránulos se colocó en una corriente de agua fría, teniendo cuidado de que el agua corriente no contaminara el contenido del matraz. Con mucho cuidado, se le adicionaron lentamente 500 ml de agua destilada al matraz. Esta maniobra se realizó para evitar un sobrecalentamiento, ya que se produce una reacción exotérmica y además se disminuye el tiempo de aclimatación de la disolución. Con el matraz al chorro de agua, se continuó agitando moderadamente hasta que disolvieron todos los gránulos (aproximadamente por 10 minutos). Cuando la disolución adquirió un color ligeramente blanco, que es indicio de que la disolución se ha completado, se dejó reposar unos minutos y se agregó agua

destilada hasta llegar al aforo de 1 L del matraz. La boquilla del matraz se cubrió con papel aluminio con el fin de evitar la contaminación de la solución.

Se deja reposar para que las pequeñas burbujas salgan de la disolución y si es necesario, se agrega agua destilada con mucho cuidado hasta llegar a la línea del aforo.

Una vez terminado lo anterior, se procedió a dejar reposar la disolución durante 2 horas para que termine de liberar las pocas burbujas que queden y se termine de estabilizar la temperatura, posteriormente se procede a etiquetar con la fecha en que fue realizada.

Precaución:

Al realizar la disolución esta aumenta rápidamente de temperatura, debe tenerse en extremo sumo cuidado en el manejo de esta para no sufrir algún accidente o quemaduras mientras se disuelve los gránulos.

3.3.2. Equipo para el Grabado

Para el proceso de grabado químico se utilizó una tina de baño térmico de GCA Corporation Equipar-Precisión modelo 184, de temperatura autorregulada, que utiliza agua destilada y un vaso de precipitados Nalgene,[®] donde se colocan la disolución y las laminillas (Figura 3.4). Se utilizó un portadetectores con suficiente capacidad para contener todos los detectores y que se puede colocar dentro del vaso de precipitados.



Figura 3.4 Instrumentación básica para el grabado químico empleada en el PAD del IFUNAM.

3.4. SISTEMA DE LECTURA

Se utilizó el sistema de digitalización de imagen recientemente desarrollado en el IFUNAM conocido como Counting and Analysis Digital Imaging System.

CADIS

Microscopio Óptico
Cámara Fotográfica
Sistema de Computo

3.4.1. Microscopio

El sistema tiene un microscopio óptico compuesto Zeiss Primo Star, cuyo revolver inclinado cuenta con 4 objetivos de 4X, 10X, 20X, y 40X aumentos, además de un par de oculares de 10X aumentos en el cabezal, fototubo e iluminación (led, halógeno) directa o transmitida según se requiera, juego de filtros cromáticos, superficie de platina 140 mm x 135 mm con un margen de desplazamiento 75 mm x 30 mm, enfoque fino y grueso, especial para la enseñanza, estudios y análisis de gérmenes, bacterias, células, cortes de tejido, entre otros ámbitos de la microscopia. [68]



Figura 3.5 Microscopio Zeiss Primo Star

3.4.2. Cámara Fotográfica Digital

La cámara digital utilizada es una Canon EOS 60D SLR de alto rendimiento que incorpora un sensor CMOS de 18 megapíxeles, visión en directo y grabación de video full HD de alta definición, cuenta con una tarjeta de memoria, terminales IN para micrófono, HDMI mini OUT, audio/video OUT/digital, pantalla LCD, limpieza

automática del sensor, con diferentes modos de disparo incluidos los manuales y automáticos, ajuste de claridad de visor, disparo, funciones y calidad de imagen (L, M, S), con esta cámara se registraron imágenes con una resolución de 2592X1728 pixeles (S1 RAW).en muy amplio formato.



Figura 3.6 Canon EOS 60D

3.4.3. Sistema de Cómputo

Se utiliza una laptop Dell Latitude D620 (Figura 3.7), Intel Core Duo, Sistema Operativo Windows XP, pantalla de 14 pulgadas, Wi-Fi, Bluetooth, PC Card, puertos USB, serial, VGA, auricular, infrarrojo, Red, lector CD/DVD,



Figura 3.7 Laptop Latitude D620

El software “Conteo Digital” es un programa especialmente diseñado para contar trazas en una imagen, este fue diseñado para ser de fácil comprensión y manejo, además de funcionar en sistemas operativos Windows XP, Ubuntu y formato de imágenes BMP, con una resolución no mayor que 6400 x 6400 pixeles, equivalentes a 20M pixeles.

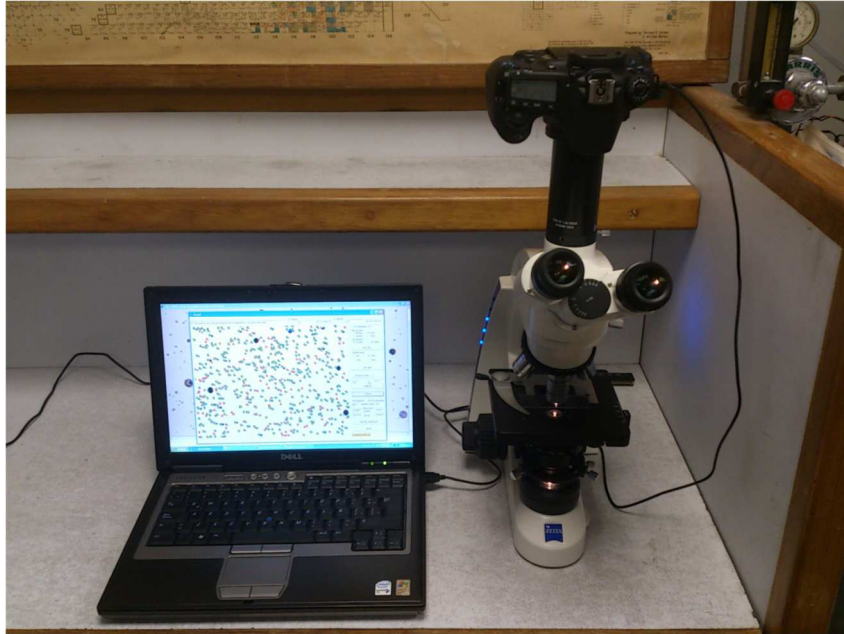


Figura 3.8 Equipo para registro y conteo de trazas CADIS desarrollado en el IFUNAM.

Es cada una de las imágenes obtenidas son digitalizada para ser procesada y analizadas, por el software de conteo CADIS digital (Figura 3.8) que fue desarrollado en el Instituto de Física.

Capítulo. 4

RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo, es la interpretación de los resultados obtenidos al medir la densidad de trazas ρ (tr/cm²) generadas en CR-39, al irradiarlo con neutrones en el reactor; encontrar una relación entre la cantidad de trazas formadas en los detectores, como función de la potencia a la que operaba el reactor TRIGA Mark III al momento de la exposición.

4.1. CONTEO

En la Figura 4.1 se muestra una secuencia de fotografías digitales, correspondientes a la superficie de distintos detectores, con una ganancia de 200X, y donde claramente se aprecia un incremento en la cantidad de trazas, atribuido a un incremento en la producción de neutrones, debido al aumento de potencia de operación del reactor.

Cada laminilla cuenta con un número de serie único para identificarlo y relacionarlo con las condiciones a las que fue expuesta; el conteo automático a las imágenes digitales da como resultado la cantidad de trazas existentes por unidad de área analizada, siendo esta última de 0.3174 mm² (0.69 mm x 0.46 mm) para regiones fotografiadas con una ganancia de 200X.

En la Tabla 4.1 se listan los resultados y el valor promedio, de los conteos hechos con el sistema CADIS a los 5 detectores expuestos en el reactor, para potencias de operación de 100 W, 1000 W, 3000 W, 5000 W y 7000 W, durante sesiones de 10 minutos.

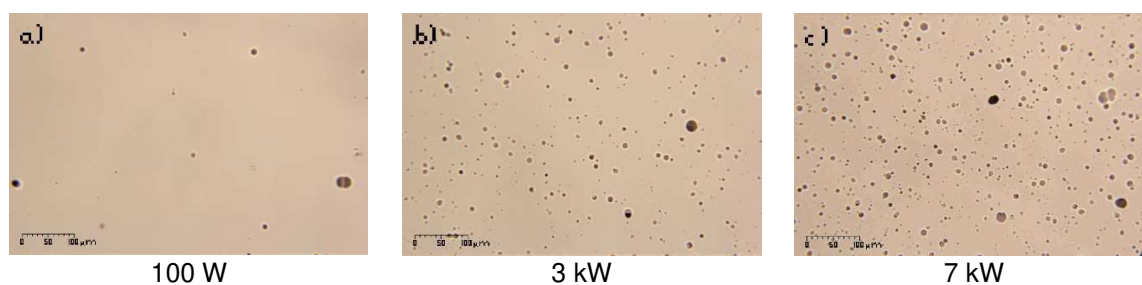


Figura 4.1 Diferentes grados en densidad de trazas en los detectores irradiados a diferentes potencias

Potencia (watt)	Conteo (tr/campo)						Promedio (tr/campo)
100	26	18	29	20	30	21	24 ± 5
1000	131	136	127	138	134	119	131 ± 7
3000	352	386	371	372	369	364	369 ± 11
5000	566	611	571	570	546	593	576 ± 23
7000	725	779	737	693	757	779	745 ± 34

Tabla 4.1 Conteo (trazas/campo) como función de la potencia del reactor

4.2. DENSIDAD DE TRAZAS ρ

De los datos obtenidos del conteo digital, concretamente del valor promedio de estos, es posible estimar la densidad de trazas ρ generadas en la superficie de cada detector como resultado de las reacciones (n, p) y (n, α) . Ya que el conteo de trazas se realizó en campos de 0.3174 mm^2 , la densidad de trazas estará dada por:

$$\rho = (\# \text{ de trazas}) \left(\frac{100(\text{mm}^2/\text{cm}^2)}{0.3174\text{mm}^2} \right) = (\# \text{ de trazas})(315.06 (1/\text{cm}^2)) \quad 4.1$$

Considerando el valor promedio en la Tabla 4.1, para cada potencia aplicada, se tienen los siguientes promedios de la densidad de trazas.

Potencia (watt)	Densidad de trazas(tr/cm ²)
100	7561 \pm 1.6×10^3
1000	41220 \pm 2.2×10^3
3000	116257 \pm 3.5×10^3
5000	181527 \pm 7.2×10^3
7000	234720 \pm 10.6×10^3

Tabla 4.2 Densidad de trazas como función de la potencia del reactor

Estos detectores presentan una respuesta directamente proporcional a la potencia del reactor.

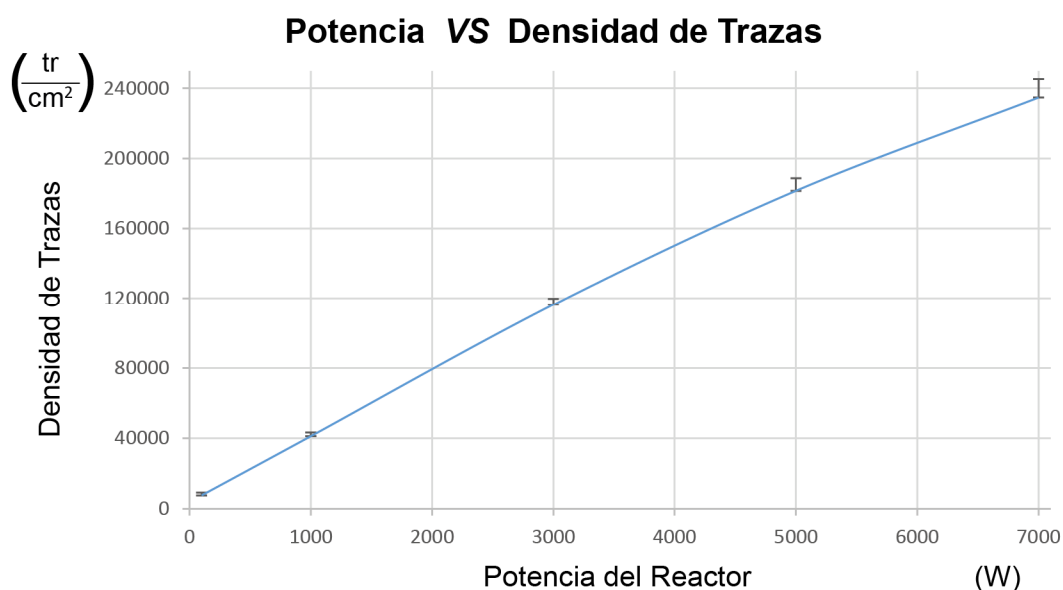


Figura 4.2 Densidad de trazas como función de la potencia de operación.

En particular, se observa un comportamiento lineal (Figura 4.2) en el intervalo de 100 a 5000 W, con una ligera disminución en la pendiente en el intervalo de 5000 a los 7000 W. Esta densidad de trazas fue producida durante los 10 minutos que estuvo operando el reactor, Por lo que, una estimación de la cantidad de trazas generadas por segundo, se muestra en la Tabla 4.3.

Potencia (W)	Tasa de trazas generadas δ (tr/cm ² s)
100	12.602 \pm 2.636
1000	68.824 \pm 3.627
3000	193.762 \pm 5.828
5000	302.545 \pm 11.916
7000	391.199 \pm 17.611

Tabla 4.3 Densidad de trazas generadas cada segundo como función de la potencia del reactor

4.3. DISTRIBUCIÓN DE DIÁMETROS

Además de contar la cantidad de trazas en cada imagen, el software del sistema CADIS también es capaz de determinar la distribución de los diámetros de las trazas en cada muestra. Debido a que los neutrones pueden pasar por el material libremente hasta colisionar con un átomo, e incluso atravesarlo completamente sin interactuar, las reacciones (n, p) pueden ocurrir a distintos niveles de profundidad, lo que conlleva que las trazas latentes se formen a diferentes profundidades en el detector. Al ser grabados los detectores, las trazas se harán visibles en forma de cavidades cónicas en la superficie del material, que al ser observadas desde una vista ortogonal a la superficie del detector se verán como circunferencias de diferentes tamaños.

Ya que el grabado químico produce un desgaste tanto en la superficie del material como en la trayectoria de la traza latente, es de esperar que las trazas más cercanas a la superficie sean las primeras en desgastarse, por lo que tienen más tiempo de grabado a diferencia de las trazas que inician a mayor profundidad y se muestran como trazas más pequeñas que recién se revelan; por lo anterior, se tiene que las trazas son conos de diferentes diámetros dependiendo de la profundidad a la que interactúan con el neutrón.

Las 6 fotografías tomadas para cada conteo en los detectores irradiados con una potencia de 7000, 5000 y 3000 W, fueron analizadas también para determinar los distintos diámetros formados, cada fotografía con un área de 0.69 mm x 0.46 mm.

4.3.1. Diámetros a 7 kW

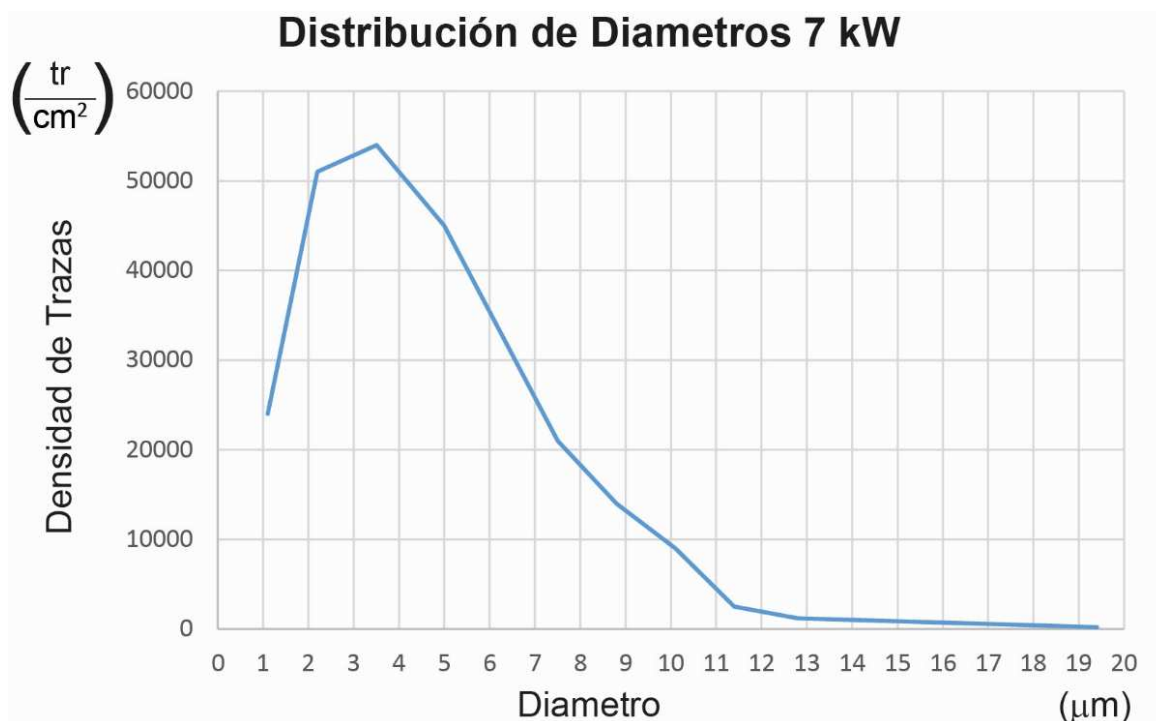


Figura 4.3 Distribución de los diámetros de las trazas de protones producidas en CR-39 irradiados a una potencia de operación de 7 kW

La primera distribución de diámetros corresponde a una irradiación a 7 kW (Figura 4.3) de potencia de operación del reactor, iniciando desde la parte más alta del espectro para disminuir después de manera uniforme, hasta casi desaparecer con una pequeña prolongación al final de la curva.

De las más de 200 mil trazas por cada cm^2 estimadas en estos detectores se aprecia que la mayoría de estas tienen un diámetro entre 2 y 3.5 μm , y a partir de este punto disminuye la cantidad de trazas conforme aumentan en diámetro, hasta llegar a los 14 μm indicando que prácticamente ya no hay trazas más grandes, aunque de hecho las reacciones (n, α) generan las trazas más grandes (entre 16.637 μm y 25.954 μm de diámetro) pero en cantidad casi despreciable con respecto a las generadas en reacciones (n, p) .

4.3.2. Diámetros a 5 kW

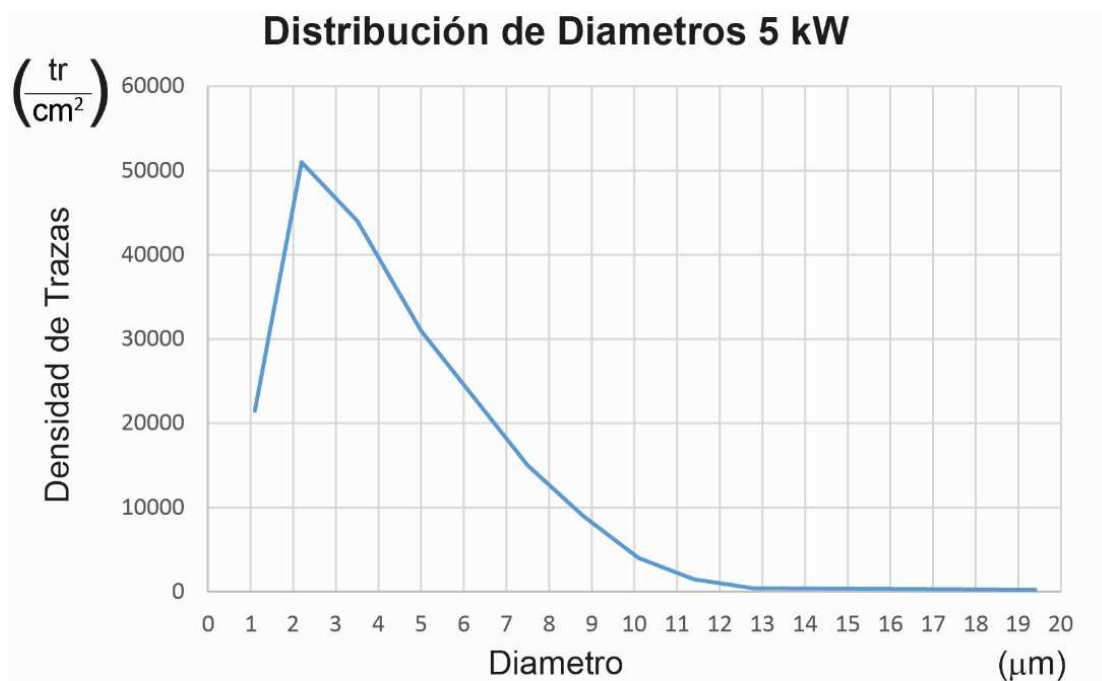


Figura 4.4 Distribución de los diámetros de las trazas de protones producidas en CR-39 irradiados a una potencia de operación de 5 kW

Esta segunda gráfica (Figura 4.4), es similar al anterior, con ambas curvas indicando que la mayoría de las trazas están entre 2 y 4 μm de diámetro, para disminuir suavemente hasta los 14 μm donde parece ya no haber trazas más grandes.

4.3.3. Diámetros a 3 kW

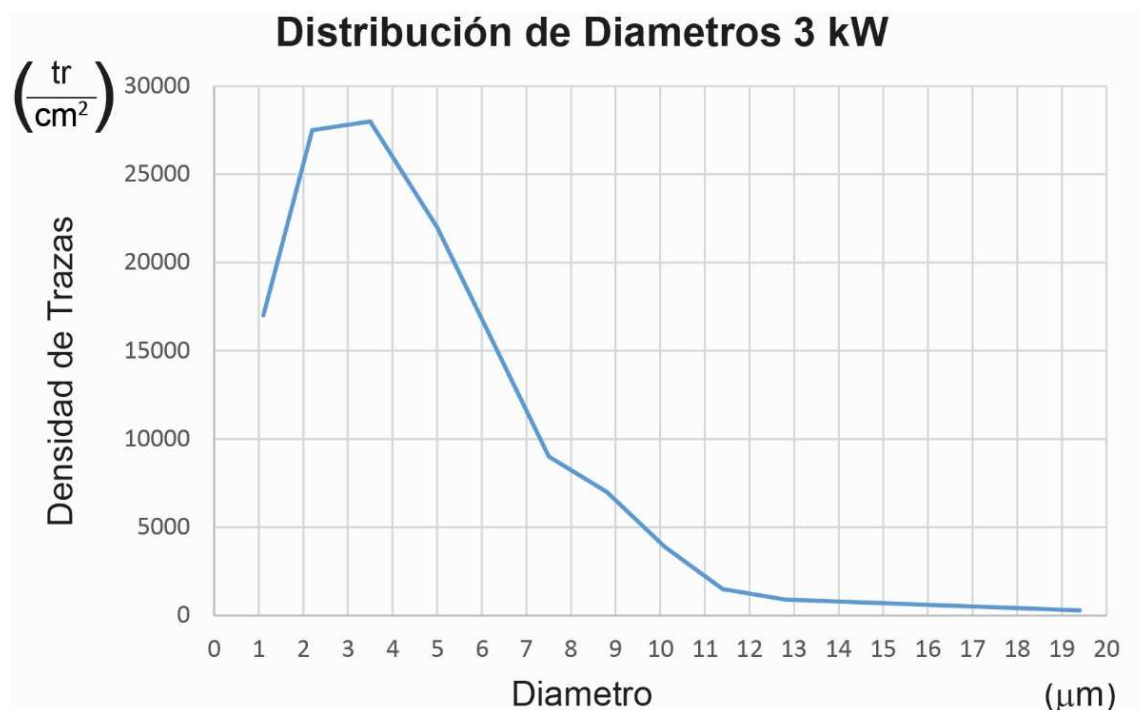


Figura 4.5 Distribución de los diámetros de las trazas de protones producidas en CR-39 irradiados a una potencia de operación de 3 kW

Para esta última gráfica de distribución de los diámetros de las trazas (Figura 4.5), la forma es similar a las anteriores, con un valor máximo en 2 μm , desde el cual se mantiene constante hasta los 3.5 μm de diámetro, desde el cual empieza a disminuir; la curva tiende a ser cero a los 14 μm de diámetro.

4.4. APLICACIONES

El MTNS es un excelente método alternativo para los usuarios del reactor, para la evaluación de la potencia de un reactor de investigación. y de campos mixtos por ser transparente para radiación beta y gamma ya que es de fácil aplicación respuesta inmediata y de bajo costo. Además el tamaño de cada detector, hacen de la MTNS una opción única para la detección de radiación donde otros métodos no tendrían cabida.

CONCLUSIONES

Una importante aplicación de la metodología de trazas nucleares en sólidos es el uso de detectores para evaluar la potencia de un reactor de investigación.

La respuesta de los Detectores de Trazas Nucleares se muestra como una función lineal en el intervalo de 100 watt a 5 watt y la capacidad de reproducibilidad en cualquier momento.

Este método se puede aplicar en cualquier otro reactor de investigación tipo Triga Mark III.

RECOMENDACIONES

Tomando en cuenta el cada vez mayor uso en la industria de fuentes de neutrones o núclidos creados por estos, este método se recomienda como una excelente herramienta de detección en dosímetros, seguimiento de reactores nucleares de investigación (similares al modelo TRIGA Mark III), campos de neutrones y fuentes de emisión de neutrones.

Los resultados obtenidos en este trabajo se recomiendan como una herramienta de divulgación y enseñanza de radiaciones en especial de neutrones.

Bibliografía

- 1.- K. Miguel. *Temas de Historia de la Física, Tomo I*. 1a ed. - Buenos Aires: Asociación Química Argentina, pag. 36-42, 2018. ISBN 978-987-46579-8-5
URL: <http://www.aqa.org.ar/images/EducacionQuimica/HistoriaFisica1.pdf>
- 2.- K. S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. JohnWiley & Sons, Singapore, 3rd edition, pag. 3, 275, 444, 1987. ISBN 0-471-85914-1.
- 3.- R. J. Blin-Stoyle. *Nuclear and Particle Physics*, vol. 4 of *PHYSICS AND ITS APPLICATIONS*. Chapman & Hall, Great Britain, pag. 1-5, 1st edition, 1991. ISBN 978-0-412-38320-5
- 4.- B. L. Cohen. *Concepts of Nuclear Physics*. Mc Graw-Hill, United States of America, pag. 1, ISBN 13: 9780070115569, 1971.
- 5.- A. Das and T. Ferbel. *Introduction to Nuclear and Particle Physics*. World Scientific, Singapore, 2nd edition, pag. 33, 135-140, 2005. ISBN 981-238-744-7.
- 6.- D. J. Hughes. *Pile Neutron Research*. Addison-wesley, Cambridge, pag. 386, 1953.
- 7.- A. Beiser. *Concepts of Modern Physics*. Mc Graw-Hill, United States of America, 6th edition, pag. 93, 389, 2003. ISBN 0-07-244848-2
- 8.- D. J. Griffiths. *Introduction to Elementary Particles*. John Wiley -VCH, 2nd edition, pag. 37, 2008. ISBN 978-0-471-60386-3.
- 9.- D. Halliday. *Introducción a la Física Nuclear*. REVERTÉ S. A., Barcelona, pag. 130, 183, 185, 264-266., 1956.
- 10.- S. Glasstone and A. Sesonske. *Ingeniería de Reactores Nucleares*. Reverté S.A., Barcelona. España, pag. 68-69, 2005. ISBN 84-291-4035-2.
- 11.- M. A. Parra Meneces, *Determinación del Espectro de Energía de los Neutrones en el Dedal Central del Núcleo del Reactor TRIGA MARK III*, Tesis Profesional, CBI. UAM-Azcapotzalco, México, 2014.
URL: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/46/130/46130337.pdf>
- 12.- C. Leroy and P.G. Rancoita. *Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection*. World Scientific, Singapore, 2nd edit., pag.32-49, 345, 2009. ISBN 981-281-827-8.
- 13.- M. Mataix Lorda and M. Mataix Hidalgo. *Diccionario de Electrónica Informática y Energía Nuclear*, volumen 1. Díaz de Santos, España, 1st edit., 2005. ISBN 8479784113.
- 14.- K. A. Olive et al. Particle Data Group.
URL: <http://pdg.lbl.gov/2014/listings/rpp2014-list-n.pdf>
- 15.- W. J. Price. *Nuclear Radiation Detection*. Mc Graw-Hill, United States of America, 2nd edition, pag. 30-33, 311-312, 331-336., 1964. ISBN 0070508607
- 16.- J. Hoste. *Isotopic Neutron Sources for Neutron Activation Analysis*, University of Ghent, International Atomic Energy Agency, Vienna, pag. 14, 19, 29-31, 1988.
URL: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/19/088/19088950.pdf>
- 17.- E. F. Aguilera, E. Hernández, and J. G. Hirsch. *IV Escuela Mexicana de Física Nuclear: Notas: México D.F. 27 de junio a 8 de julio de 2005*. Sociedad Mexicana de Física, pag. 470, 2005.

URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/066/37066524.pdf

18.- Blatt, Frank J., *Fundamentos de Física*, Prentice-Hall, 3a. ed., 1994, ISBN: 968-880-193-3

19.- G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, 3rd edition, pag. 20, 539., 1999. ISBN 0470131489.

20.- R. C. Martin, J. B. Knauer, and Balo. P. A. *Production, distribution and applications of californium-252 neutron sources*. Applied Radiation and Isotopes, 53(4-5):785–792, November 2000.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804300002141>

21.- IAEA. *Handbook on Nuclear Data for Borehole Logging and Mineral Analysis*. Technical Reports Series No. 357. International Atomic Energy Agency, Vienna, pag. 45, 1993. ISBN 92-0-102393-6.

22.- J. R. Greening. *Fundamentals of Radiation Dosimetry*. Series in Medical Physics and Biomedical Engineering. Taylor & Francis Group, United States of America, 2nd. edition, pag. 24-26, January 1985. ISBN 0-85274-789-6.

23.- G. C. Espinosa García. *Trazas Nucleares en Sólidos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1st edición, pag. 15-35, 1994. ISBN 968-36-4219-5.

24.- D. A. Young. *Etching of radiation damage in lithium fluoride*. *Nature*, 182:375–377, August 1958.

URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v182/n4632/abs/182375a0.html>

25.- E. C. H. Silka and R. S. Barnes. *Examination of fission fragment tracks with an electron microscope*. *Philosophical Magazine*, 4(44):970–972, 2006.

URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786435908238273>

26.- P. B. Price and R. M. Walker. *Electron Microscope Observation of Etched Tracks from Spallation Recoils in Mica*. *Physical Review Letters*, 8(5):217–219, March 1962.

URL <http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.8>

27.- R. L. Fleischer, P. B. Price, and R. M. Walker. *Solid-State Track Detectors: Applications to Nuclear Science and Geophysics*. *Annual Review of Nuclear Science*, 15:1–28, 1965.

URL: <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.ns.15.120165.000245>

28.- L. W. Brackenbush, D. E. Hadlock, M. A. Parkhurst, and L. G. Faust. *A method to improve the evaluation of a combination track etch dosimeter/spectrometer*. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 8(1–4):313–315, 1984.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0735245X8490111X>

29.- R. L. Fleischer, P. B. Price, and R. M. Walker. *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*. University of California Press, United States of America, 1975. ISBN 0-520-02665-9.

30.- D. A. Bradley, C. S. Chong, Ahmat Saat, and A. M. Ghose. *Fast-neutron-induced track formation in LR-115 and CR-39*. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 11(4-5):205–209, 1986.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1359018986900361>

31.- A. M. Bhagwat. *Solid State Nuclear Track Detection: Theory and Applications*. *Indian Society for Radiation Physics*, India, 1993.

32.- M. Sidorov and O. Ivanov. *Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications*. Electrical Engineering Developments. Nova Science Publishers, Inc., 1st edition, 2010. ISBN 1608768260.

- 33.- F. H. Attix. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. WILEY-VCH, Germany, pag. 66-67, 165, 178., 2004. ISBN 0-471-011-46-0
- 34.- A. L. Frank and E. V. Benton. *High energy neutron flux detection with dielectric plastics*. *Radiation Effects*, 3(1):33–37, 1970.
URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00337577008235613>
- 35.- J. W. N. Tuyn and J. J. Broerse. *On the use of makrofol polycarbonate foils for the measurement of the fast neutron dose distribution inside a human phantom*. In *Proc. 7th Internat. Colloq. Corpusc. Photog. & Visual Solid Detectors*, pag. 527–531, 1970.
- 36.- K. Becker. *Direct fast neutron interactions with polymers*. Oak Ridge National Lab. Report ORNL-4446, pag. 266, 1966
- 37.- L. Medveckzy and G. Somogyi. *Fast neutron flux measurement by means of plastic*. *ATOMKI (At. Kut. Intez.) Kozlem*, 8:226–231, September 1966.
- 38.- R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker, and E. L. Hubbard. *Track registration in various solid-state nuclear track detectors*. *Physical Review Letters*, 133 (5A), March 1964.
URL: <http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.133.A1443>
- 39.- M. Várnagy, J. Csikai, S. Szegedi, and S. Nagy. *Observation of proton tracks by a plastic detector*. *Nuclear Instruments and Methods*, 89(1):27–28, 1970.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029554X70907986>
- 40.- NNDC-BNLD. *National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory Database, ENDF/B-VII.0 officially release, USA, 2006*.
URL: <https://www.nndc.bnl.gov>
- 41.- J. L. Bruneni. *More Than Meet The Eye: The Stories Behind the Development of Plastic Lenses*. PPG Industries, Inc. Pittsburgh, Pennsylvania.
URL: http://www.ppg.com/optical/opticalproducts/opticalmaterials/Documents/CR39_50years_bUltimo
- 42.- A. R. El-Sersy, N. E. Khaled, and S. A. Eman. *Determination of CR-39 detection efficiency for fast neutron registration and the absolute neutron dosimetry*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 215:443–448, February 2004.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X03019517>
- 43.- G. Espinosa, J.I. Golzarri, R. Raya-Arredondo, S. Cruz-Galindo, and L. Sajo-Bohus. *Neutron detection of the triga mark III reactor using nuclear track methodology*. *AIP Conference Proceedings*, 1671(020005), 2015.
URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.4927182>
- 44.- K. Turek and G. Dajkó. *Comparison of experimental and calculated responses of CR-39 to neutron spectra of Am–Be and ²⁵²Cf sources*. *Radiation Measurements*, 34:625–628, June 2001.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448701002426>
- 45.- M. I. Al-Jarallah, F. Abu-Jarad, A. B. Hallak, A. Coban, and M. Islam. *Investigation of proton response of CR-39*. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 22: 191–194, 1993.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0969807893900445>
- 46.- [Arkena Inc. Product finder Plexiglas® acrylic sheet](https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Plexiglas-acrylic-sheet-Americas/)
URL: <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Plexiglas-acrylic-sheet-Americas/>

- 47.- S. F. Boulyga, E. G. Boulyga, E. M. Lomonosova, and I. V. Zhuk. *Automation system for optical counting of nuclear tracks*. *Radiation Measurements*, 31(1-6): 237–340, 1999.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448799001092>
- 48.- A. B. Akopova, N. V. Viktorova, V. M. Krishchian, N. V. Magradze, K. M. Ovnanian, K. I. Tumanian, and T. S. Chalabian. *Development of an autoradiographic method of investigation of hot particles from the chernobyl nuclear power plant*. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21(3):323–328, 1993.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096980789390222P>
- 49.- S. A. Durrani and R. K. Bull. *Solid State Nuclear Track Detection: Principles, Methods and Applications*, volume 111 of International Series in Natural Philosophy. Pergamon Press, 1st edition, 1987. ISBN 0-08-020605-0
- 50.- Yasushi Nishiwaki, Takao Tsuruta, and Katsuhiko Yamazaki. *Detection of fast neutrons by etch-pit method of nuclear track registration in plastics*. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 8(3):162–166, 1971.
URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18811248.1971.9735308>
- 51.- G. Campos-Venuti, R. Casaccia, G. Grisanti, S. Risica, I. Laakso, and L. Votano. *An automatic device for counting a large number of tracks in CR39*. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 8(1-4):203–206, 1982.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0735245X84900875>
- 52.- P. Kokkas, P. Kokkinidis, P. Pavlopoulos, and S. Vlachos. *An image processing system for track-etch detectors*. *Radiation Measurements*, 26(2):187–191, 1996.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1350448795003061>
- 53.- D. Nikezic, B. Milenkovic, and K. N. Yu. *Databank of proton tracks in polyallyldiglycol carbonate (PADC) solid-state nuclear track detector for neutron energy spectrometry*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 802(1):97–101, 2015.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215010189>
- 54.- F. D’Errico, M. Weiss, M. Luszik-Bhadra, M. Matzke, L. Bernardi, and A. Cecchi. *A CR-39 track image analyser for neutron spectrometry*. *Radiation Measurements*, 28(1-6):823–830, 1997.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448797001911>
- 55.- R. V. Griffith, T. A. McMahon, and G. Espinosa. *A commercial bacterial colony counter for semiautomatic track counting*. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 8(1-4):215–218, 1984.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0735245X84900905>
- 56.- S. Viques, G. Espinosa, and V. M. Castaño. *Image processing analysis of chemical tracks*. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 19(1-4):271–272, 1991.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1359018991901905>
- 57.- G. Espinosa, I. Jacobson, J. I. Golzarri, C. Vázquez, R. Fragoso, and E. Santos. *Analysis of the formed track in solid state materials using atomic force microscopy*. *Radiation Protection Dosimetry*, 101(1-4):89–92, 2002.
URL: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/101/1-4/89>
- 58.- C. Vázquez-López, R. Fragoso, J. I. Golzarri, and G. Espinosa. *Applications of the atomic force microscopy to nuclear track methodology*. *Revista Mexicana de Física*, 53 (3):52, 2007.
URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmf/v53s3/v53s3a13.pdf>
- 59.- H. S. Cruz Galindo and R. Raya Arredondo. *Study of neutron fluxes before and after the change HEU to LEU fuel for TRIGA Mark III reactor of Mexico*. *AIP Conference Proceedings*, 1544:53–62, 2013.

URL: <http://scitation.aip.org/content/aip/proceeding/aipcp/10.1063/1.4813460>

60.- F. J. Rodríguez Vera. *Determinación del flujo subcádmico en el reactor TRIGA MARK III del Centro Nuclear de México*. Tesis Profesional. IPN, México, 1975.

61.- E. Garduño Romo. *Detección de neutrones mediante la metodología de trazas nucleares en sólidos*. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias UNAM, México, 2008.

62.- F. Castillo, G. Espinosa, J. I. Golzarri, D. Osorio, J. Rangel, P. G. Reyes, and J. J. E. Herrera. *Fast neutron dosimetry using CR-39 track detectors with polyethylene as radiator*. *Radiation Measurements*, 50:71–73, March 2013.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448712002776>

63.- J. R. Harvey, R. J. Tanner, W. G. Alberts, D. T. Bartlett, E. K. A. Piesch, and H. Schraube. *The Contribution of EURADOS and CENDOS to Track Etch Neutron Dosimetry: The Current Status in Europe*. *Radiation Protection Dosimetry*, 77(4):267–304, 1998.

URL <http://rpd.oxfordjournals.org/content/77/4/267>

64.- R. B. Gammage and G. Espinosa. *Digital imaging system for track measurements*. *Radiation Measurements*, 28(1-6):835–838, 1997.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448797001935>

65.- G. Espinosa, J. I. Golzarri, I. Gamboa, L. Tommasino, and R. V. Griffith. *Digital Image Counting System for Nuclear Track Detectors*. *Nuclear Tracks*, 12 (1-6):235–239, 1986.

URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1359018986905789>

66.- G. Espinosa, R. B. Gammage, K. E. Meyer, and C. S. Dudney. *Nuclear Track Analysis by Digital Imaging*. *Radiation Protection Dosimetry*, 66(1-4):363–366, 1996.

URL: <http://rpd.oxfordjournals.org/content/66/1-4/363.short>

67.- H. S. Cruz Galindo, F. Aguilar Hernández, R. Raya Arredondo, and J. Flores Callejas. *Reactores nucleares de investigación en operación en el mundo*, El ININ HOY,

URL: <http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/Reactores.pdf>

68.- Carl Zeiss Microscopy GmbH. *ZEISS Primo Star Robust*, User-Friendly, and Affordable.

URL: http://www.zeiss.com/microscopy/en_de/products/light-microscopes/primo-star.html#downloads

69.- J. A. Soriano Arteaga, *Estudio y caracterización de un sistema digital para el conteo y análisis de trazas nucleares en sólidos y sus aplicaciones en física*, Tesis Profesional, UNAM, 2016.

Anexo

SOFTWARE CONTEO DIGITAL

Se inserta el disco o USB donde ese encuentre el programa conteo digital, en la unidad que lo contenga, se busca la carpeta "ConteoDigital, dentro de esta se busca la carpeta "Ejecutable" en este se busca el archivo ejecutable "PConteoDigital.exe" y se da un click o doble click según sea el caso para iniciar el programa.

Al iniciar programa este presenta la ventana de inicio que contiene dos botones de opciones "Inicio" y "Salida", al dar la opción de inicio nos aparece una ventana emergente de búsqueda de archivos, para localizar nuestro archivo de formato "*.BMP", en esta ventana se realiza la localización de nuestro archivo en el CPU, una vez localizado y seleccionado se da la opción "Aceptar" para cargar el archivo a trabajar.

Inmediatamente regresa a la ventana menú principal donde aparece una nueva opción "LEER BMP".

Opción LEER BMP: realiza varias funciones de lectura al archivo seleccionado y la almacena en una matriz bidimensional para realizar los cálculos. Realiza el cálculo de factor de reducción de la imagen para que se pueda desplegar en una pantalla de 800x800 pixeles (del CPU), así mismo se calcula el valor de dos parámetros el "área mínima" y otro el "área máxima". Estos valores son solo indicativos de las dimensiones que se espera tengan las trazas y pueden ser modificadas en este momento para ajustarse a las necesidades del problema en particular. Al terminar la carga de la imagen se activan dos opciones en la ventana menú "RESTA FONDO" y "UMBRAL".

Opción RESTA FONDO: Para poder hacer uso de esta función se deberá haber preparado de antemano un archivo con una imagen que permita ver la distribución de luces cuando no se tiene la imagen de las trazas. El programa entonces hace una resta de las intensidades normalizadas para poder tener un equilibrio de intensidades en toda la imagen, al término de la función se muestra la imagen ya procesada.

Opción UMBRAL: Esta permite establecer un valor de tono de gris, calculado por un histograma de la imagen original. Al aplicarse esta función, se tendrá una imagen solamente en blanco y negro. Esta función es la que resalta las partes de interés (las trazas) del resto. Al término de esta se activa un recuadro donde aparece la máxima excentricidad permitida, ya que se buscan trazas con una geometría casi circular. Por default este valor se toma de 0.8.

A su término se activa una nueva opción, el de "CONTEO".

Opción CONTEO: Es la función medular del programa es la encargada de contar el número de trazas en la imagen, evalúa el número de píxeles que la conforman y así tener el área que abarcan valorar la excentricidad de la traza y ver si está dentro de los límites preestablecidos (por defecto es de $0.8 < \text{diámetro menor} / \text{diámetro mayor}$). Para lograr este fin se hace uso de la función "PILA", la función "VECINOS", la función "PUSH" y la función "POP", así como de dos funciones más "VACIA" y "VACIAR", la primera borra la pila para la traza recién encontrada y la segunda vacía totalmente la pila.

Opción VECINOS: se encarga de analizar el entorno de un píxel negro formado por los ocho píxeles vecinos, en caso de encontrar un píxel negro, las coordenadas de éste se agregan, mediante la función "PUSH" a la pila, y el píxel en cuestión se torna blanco para que no sea contado nuevamente. Cuando no se encuentre ningún otro píxel negro en la vecindad, la pila final contiene el número de píxeles que forman la traza, así como sus coordenadas y por ende puede evaluarse una elipse que circunscriba a todos estos puntos y así tener su diámetro mayor y su diámetro menor y calcular la excentricidad de esta elipse. Al mismo tiempo se analiza si el área de la traza está dentro de los límites mayor y menor que se hayan establecido previamente. Si se encuentra dentro de los límites aceptados, se anexa en un archivo de tipo "*.csv" donde se almacenarán las áreas en píxeles de todas las trazas encontradas y los parámetros de la elipse. En la imagen en pantalla se van marcando con un círculo rojo aquellas trazas que cumplen con el requisito de la excentricidad y con un círculo verde las que además cumplen con las limitantes del área.

Glosario

Am	Americio, número atómico 95, actínido elemento artificial
Antineutrino	Antipartícula correspondiente al neutrino que tiene una masa diez mil veces más pequeña que el electrón, un espín de un medio, y sin carga eléctrica.
Átomo	Estructura en la cual se organiza la materia en el mundo físico o en la naturaleza compuesta por electrones neutrones y protones.
Be	Berilio, número atómico 4 y peso atómico de 9.0122, es un metal con propiedades químicas y físicas únicas que lo hacen útil para varias aplicaciones localizado en los metales alcalinotérreos
BMP	Formato gráfico, propio del sistema Microsoft Windows
Bosón	Partícula básica con spin entero o cero
<i>c</i>	Velocidad de la luz en el vacío 299 792 458 kilómetros por segundo
C	Carbono, número atómico 6 y un peso atómico 12.01, Su estructura atómica le brinda un sinfín de posibilidades para unirse a otros elementos formando compuestos orgánicos o inorgánicos.
Cf	Californio, número atómico 98, localizado en los actínidos
Constante de Planck	Cuanto elemental de acción
CR-39	policarbonato alil diglicol, plástico de polímero utilizado en la fabricación productos oftálmicos. Más ligero y duro que le cristal, bajo costo, baja dispersión cromática, resistencia a altas temperaturas y a la mayoría de los solventes, opaco en un amplio rango del ultravioleta
csv	formato de texto libre, contiene información de datos en formato tabla y comas
Decaer	Proceso por el cual un núcleo atómico inestable pierde energía por emisión de radiación
Decaimiento	Proceso espontáneo en el cual la cantidad inicial de átomos disminuye con el tiempo
Deuterón	Se compone de un neutrón y un protón
Electrón	Partícula subatómica que presenta carga eléctrica negativa, y constituyente de la corteza del átomo
Exotérmica	Reacción donde se libera calor
eV	Es la energía cinética adquirida por un solo electrón cuando se mueve a través de un potencial eléctrico de 1 V. $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
Fisión	Reacción en cadena debido al rompimiento de los núcleos

g	gramo, Unidad de masa del sistema métrico decimal
Gránulo	Pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido de diferentes materiales
H	Hidrogeno, número atómico 1 y peso atómico 1.008, gas inflamable
<i>h</i>	Contante de Planck se define como la proporcionalidad entre la energía de un fotón y la frecuencia de su onda electromagnética asociada. Igual a $6.62606957 \times 10^{-34} \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}$
Inhomogeneidad	Aquella en el cual los valores de las propiedades intensivas son distintas en distintas partes del sistema, pero estas partes nos separadas, unas de otras, por superficies de discontinuidad bien definidas pueden variar en ciertas ubicaciones del espacio.
Ion	Átomo o grupo de átomos que, por haber ganado o perdido uno o varios electrones, se halla cargado eléctricamente
Ionización	Proceso en el que un átomo o una molécula gana o pierde electrones para formar iones cargados
Isótopos	Átomos cuyos núcleos atómicos tienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones.
<i>k</i>	Constante de Boltzmann relaciona proporcionalidad de temperatura absoluta y la energía, igual a: $1.380\ 6488 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ o $8.617333 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$,
Látex	Suspensión acuosa coloidal compuesta de grasas, ceras y diversas resinas gomosas obtenidas a partir de las células presentes en algunas plantas.
Li	Litio, número atómico 3 y peso atómico de 6.941, de la familia de los metales alcalinos, Es el metal sólido más ligero, es blando, de bajo punto de fusión y reactivo, es un elemento moderadamente abundante
LR-115	Película de Nitrato de Celulosa, que no es afectado por electrones u otro tipo de radiación electromagnética, se utiliza como base para pólvoras, dinamitas, gelatinas explosivas o pinturas.
m_e	Masa de electrón, $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, aproximadamente 1.800 veces menor que la masa del protón o a la del neutrón
MeV	Unidad atómica de energía. Representa la energía cinética un electrón cuando se mueve en una diferencia de potencial de un campo eléctrico de 1 voltio. múltiplo Mega-electronvoltio "MeV"
Moderador	Constituye un medio para disminuir la velocidad de los neutrones rápidos generados en la fisión.
mol	Unidad de medida que mide la cantidad de materia en el sistema internacional

M	Concentración molar, cantidad de soluto como número de moles y la cantidad de disolución como volumen medido en litros.
N	Nitrógeno, número atómico 7 y peso atómico de 14.006, A temperatura ambiente, gas inerte, incoloro, insípido e inodoro.
N_A	Número de Avogadro, número de partículas en general, átomos o moléculas, contenidas en un mol de una sustancia.
Neutro	<i>n</i> partícula subatómica existente en el núcleo de todos los átomos, sin carga eléctrica neta alguna
nm	Unidad de longitud que corresponde a la milmillonésima parte de un metro y es el noveno submúltiplo de él.
Núclido	Nombre genérico que se aplica a todos los isótopos conocidos, estables e inestables, de los elementos químicos que poseen mismo número atómico y el mismo número másico.
O	Oxígeno, número atómico 8 y peso atómico de 15.999, anfígenos y es un elemento no metálico altamente reactivo, capaz de formar compuestos
Pixel	La más pequeña de las unidades de una superficie homogénea que forma parte de una imagen.
Pu	Plutonio, número atómico 94 elemento transuránico radiactivo metal actínido
Polietileno	Material termoplástico blanquecino, transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes.
Protón	Partícula subatómica con carga eléctrica positiva, que se encuentra dentro del núcleo atómico de los átomos
Quarks	Fermiones elementales masivos que interaccionan fuertemente formando la materia nuclear y ciertos tipos de partículas llamadas hadrones, tienen carga eléctrica fraccionaria de -1/3 o +2/3 de la carga del electrón
rad	Radiation Absorbed Dose, unidad tradicional de la dosis absorbida, equivalente a la absorción de 100 ergios por gramo de sustancia irradiada con cualquier clase de radiación ionizante. $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / \text{kg} = 104 \text{ erg} / \text{g} = 100 \text{ rad}$
Radiación	Es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas.
Radiación alfa	Dos protones y dos neutrones unidos por una fuerza fuerte
Radiación beta	Un electrón que se emite en un decaimiento radiactivo
Radiación gamma	Radiaciones electromagnéticas producidas por la desintegración radiactiva de los núcleos atómicos.

rem	Roentgen Equivalent Man. Se define como la dosis de cualquier radiación ionizante que produce el mismo efecto biológico que una unidad de dosis absorbida de rayos X. $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
Rayos X	Forma de radiación electromagnética, similares a la luz visible de una muy alta energía
Reactor	Instalación capaz de iniciar, controlar y mantener las reacciones nucleares en cadena que se produzcan en el núcleo de esta instalación.
s	Segundo, Unidad de tiempo de del sistema internacional
Semiconductor	Elemento que funciona como un conductor o como un aislante dependiendo de algunos factores, como el campo eléctrico o magnético, la radiación, la presión o la temperatura del ambiente en el que se encuentre
Temperatura Celsius	Es la unidad creada por Anders Celsius para su escala de temperatura, considerando las temperaturas de congelación y ebullición del agua pertenece al Sistema Internacional de Unidades,
Temperatura Kelvin	(Escala absoluta) Unidad de Temperatura de la escala científica creada por William Thomson, su cero se sitúa en el punto de temperatura mínima posible, donde los átomos y las moléculas estarían en reposo.
Termalizado	Proceso por el cual los neutrones reducen su velocidad en forma gradual.
Transuranico	Elemento químicos con número atómico mayor que 92, el número atómico del elemento uranio.
Traza	Trayectoria descrita por una partícula.
U	Uranio número atómico 92 y un peso atómico de 232.08, elemento básico para la era nuclear