



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Medición de Concentración Isotópica de ^{14}C de una
Barra de Control del Reactor Nuclear TRIGA Mark III.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C O

P R E S E N T A:

DAVID BELMONT MONROY



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. EFRAÍN RAFAEL CHÁVEZ LOMELÍ
CIUDAD DE MÉXICO, 2019**



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.

A Fabi.

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo económico del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM con número IG101016 y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) con números: 271802, 280760 y 294537.

Al equipo con el que trabajé en LEMA, en especial al Dr. Efraín Rafael Chávez Lomelí, al Fís. Arcadio Huerta Hernández y al Sr. Sergio Martínez González.

A mi Padre por los valores que me enseñó, a mi Madre por darme un hogar, a mis hermanos Mario, Laura y Areli por mostrarme el camino a seguir.

A mis amigos, Pablo, Sebas, Vic, Zamora, Pedrito y Raúl por los buenos momentos, a Bony, Piña, y Guillén por los malos. Pero en especial a Boyzo que me enseñó a valorar mi esfuerzo y a Diego por tantos años de amistad.

A Fabiola, por su apoyo incondicional, paciencia y los mejores momentos de mi vida. Además de su constante insistencia en terminar este proyecto.

A mí, porque aun cuando la carrera no cedía, y las materias se mostraban implacables logré con determinación, coraje y perseverancia revelar los secretos de la Física.

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis del contenido de isótopos radioactivos de una muestra tomada de una barra de control, usada unos 20 años y actualmente descartada, del Reactor Nuclear TRIGA (Training, Research, Isotopes, General Atomics) Mark III del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

Se muestran resultados de la medida de la concentración absoluta presente de ^{14}C realizada en el Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA). Cabe resaltar que es la primera vez que se utiliza esta técnica para medir esa concentración debido a la alta concentración esperada y el riesgo de contaminación del sistema. La medida arrojó, efectivamente, una concentración siete órdenes de magnitud superior a la encontrada en grafito de mina. Se muestran los mecanismos de reacción que explican el resultado experimental.

Por otra parte, se caracterizó un fragmento de la barra de control por el método de espectroscopía gama encontrándose diversos contaminantes provenientes del núcleo del reactor. Ambos resultados se comparan con la literatura.

Índice

RESUMEN.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 MOTIVACIÓN.....	8
1.2 DEL MODELO CLÁSICO AL MODELO CUÁNTICO.....	8
1.3 ESTRUCTURA ELECTRÓNICA DEL ÁTOMO.....	14
1.4 NÚCLEO.....	16
1.5 RADIOACTIVIDAD.....	19
1.6 REACCIONES NUCLEARES.....	21
1.7 SECCIÓN EFICAZ.....	21
1.8 APLICACIÓN DE ¹⁴ C.....	23
1.9 INTERACCIÓN DE RADIACIÓN CON MATERIA.....	23
1.10 ANTECEDENTES DIRECTOS.....	26
1.11 EL PRESENTE TRABAJO.....	27
2. METODOLOGÍA.....	28
2.1 REACTOR NUCLEAR TRIGA MARK III.....	28
2.2 LABORATORIO NACIONAL DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACCELERADORES.....	29
2.3 LABORATORIO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	31
2.4 LABORATORIO DE RADIACIONES.....	33
3. EXPERIMENTO.....	35
4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.....	37
4.1 DATOS OBTENIDOS EN EL LEMA.....	37
4.2 DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE RADIACIONES.....	43
5. CONCLUSIONES.....	46
6. BIBLIOGRAFÍA.....	47
7. ANEXO.....	50

Índice de Tablas.

TABLA 1. PUNTO DE EVAPORACIÓN PARA CADA GAS CONTAMINANTE.	32
TABLA 2. PROMEDIOS OBTENIDOS DE LOS CÁTODOS DE INTERÉS EN LEMA.	37
TABLA 3. ERROR ASOCIADO A CADA MEDICIÓN DE $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	38
TABLA 4. VALORES DE REFERENCIA ESTÁNDAR $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ DESPUÉS DE USAR LOS CÁTODOS RADIOACTIVOS Y CON REJILLA CERRADA..	40
TABLA 5. DATOS OBTENIDOS PARA LA REFERENCIA ESTÁNDAR DE $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ CON REJILLAS ABIERTAS.	41
TABLA 6. COMPARACIÓN DE VALOR TEÓRICO CALCULADO CON PROMEDIO DE LOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE PARA CADA CÁTODO.....	42
TABLA 7. RESULTADO DEL COCIENTE DE MUESTRAS DE BARRA DE CONTROL DEL REACTOR ENTRE UN GRAFITO SIN IRRADIAR.	42
TABLA 8. DATOS USADOS EN CALIBRACIÓN PARA EL ESPECTRO DE GAMAS.	43
TABLA 9. ISÓTOPOS ASOCIADOS A CADA GAMA EN LOS PICOS IDENTIFICADOS EN LAS FIGURAS 13 Y 14.	45
TABLA 10. PRIMERA CORRIDA DE DATOS, SE MUESTRAN LOS VALORES DE CONCENTRACIÓN $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	50
TABLA 11. SEGUNDA CORRIDA DE DATOS, SE MUESTRAN LOS VALORES DE CONCENTRACIÓN $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	50
TABLA 12. TERCERA CORRIDA DE DATOS, SE MUESTRAN LOS VALORES DE CONCENTRACIÓN $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	51
TABLA 13. CUARTA CORRIDA DE DATOS, SE MUESTRAN LOS VALORES DE CONCENTRACIÓN $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	51
TABLA 14. QUINTA CORRIDA DE DATOS, SE MUESTRAN LOS VALORES DE CONCENTRACIÓN $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	51

Índice de Figuras.

FIGURA 1. TABLA PERIÓDICA EN TÉRMINOS DEL ACOMODO DE ELECTRONES. SE MUESTRAN NIVELES Y ORBITALES.	15
FIGURA 2. NÚCLEO DEL REACTOR TRIGA MARK III. IMAGEN TOMADA DE [31].	28
FIGURA 3. CARRUSEL DE MUESTRAS EN LEMA. FOTO: D. BELMONT.	29
FIGURA 4. LABORATORIO DE ESPECTROMETRÍA DE MASAS CON ACCELERADORES. FOTO: D. BELMONT.	31
FIGURA 5. PRENSA, CÁTODO DE ALUMINIO Y UTENSILIOS NECESARIOS PARA PRENSAR LA MUESTRA. FOTO: D. BELMONT.	33
FIGURA 6. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROSCOPIA GAMMA. FOTO: D. BELMONT.	34
FIGURA 7. PRENSA MANUAL USADA PARA COMPRIMIR LOS CÁTODOS CON MUESTRAS RADIOACTIVAS. FOTO: D. BELMONT.	35
FIGURA 8. GRÁFICA DE CONCENTRACIÓN MEDIDA EN LEMA PARA EL CÁTODO TRIGA I.	38
FIGURA 9. GRÁFICA DE CONCENTRACIÓN MEDIDA EN LEMA PARA EL CÁTODO TRIGA III.	39
FIGURA 10. GRÁFICA DE CONCENTRACIÓN MEDIDA EN LEMA PARA EL CÁTODO OXA STD IIB.	39
FIGURA 11. GRÁFICA DE PROMEDIOS DE CONCENTRACIÓN MEDIDA EN LEMA PARA EL CÁTODO OXA STD II.	40
FIGURA 12. GRÁFICA DE PROMEDIOS DE CONCENTRACIÓN MEDIDA EN LEMA PARA EL CÁTODO OXA STD II.	41
FIGURA 13. ESPECTROSCOPIA GAMA DE FONDO.	43
FIGURA 14. ESPECTRO GAMA CON 15 PICOS IDENTIFICADOS.	44
FIGURA 15. ESPECTRO GAMA CON 8 PICOS IDENTIFICADOS.	44

1. Introducción.

1.1 Motivación.

Desde el descubrimiento del núcleo atómico se ha investigado los beneficios que puede traer su conocimiento a la humanidad, contribuyendo a grandes avances en química, biología y física. Uno de estos beneficios es el uso de los reactores nucleares que han sido proveedores de energía en las grandes ciudades durante las últimas décadas, no obstante, su uso ha sido duramente criticado por los desechos que producen. Uno de estos desechos son las barras de control de grafito que se usan para regular el reactor nuclear quedando estas inutilizables después de su periodo de funcionamiento, confinadas a bóvedas para evitar contaminar el medio ambiente. Sin embargo, a pesar de que fueron irradiadas de manera continua, se espera que más que un desecho sean un aporte para aplicaciones en Física Nuclear debido a las altas concentraciones de isótopos radioactivos en particular los de vida media larga como el ^{14}C , el cual es de gran importancia en la datación de objetos provenientes de civilizaciones antiguas por lo que su contribución a la humanidad es única. Si bien es conocido este contaminante, no se sabe con precisión el número exacto del mismo pues no se ha realizado con anterioridad el conteo de átomos de ^{14}C [1].

Por eso este trabajo tiene por objeto realizar el conteo de átomos a través de la técnica de espectrometría de masas con aceleradores.

1.2 Del Modelo Clásico al Modelo Cuántico.

El Universo está constituido por energía, tal y como lo expresa Einstein en su bien conocida ecuación $E=mc^2$ en donde energía y materia son equivalentes con la constante de proporcionalidad de la velocidad de la luz al cuadrado. También se ha logrado identificar las partículas fundamentales que dan origen al modelo estándar agrupándolas en fermiones y bosones. No obstante, este conocimiento no estuvo siempre al alcance de los científicos. Ha sido a través de los siglos que se han descartado, planteado y refinado diversas teorías hasta llegar al conocimiento que se tiene hoy en día.

Los primeros antecedentes de la ciencia como una disciplina con un método específico fueron a través de la observación de los astros en los cielos, los cuales eran clasificados en constelaciones a excepción de los denominados “errantes”. Estos primeros estudios llegaron a su apogeo en el libro de Ptolomeo (100-170) *Almagesto* donde haciendo uso de la geometría plantea un sistema en cuyo centro se encuentra la Tierra.

Posteriormente fue Nicolás Copérnico (1473-1543) que en su libro *De revolutionibus orbium coelestium* indica la posibilidad de que el centro del sistema no es otro sino el Sol, siendo una de las primeras revoluciones científicas registradas. Si bien esta última hipótesis no era bien aceptada, esto no impidió a Tycho Brahe (1546-1601), astrónomo danés, compilar los mejores datos disponibles en la época. Dichos datos serían los que estudiaría Johannes Kepler (1571-1630) para posteriormente deducir sus tres leyes.

Galileo Galilei otro filósofo y astrónomo (1564-1642) realizó diversos estudios de cinemática los cuales fueron fundamentales para entender el cómo funcionan los proyectiles y otros objetos en movimiento a velocidad constante y en caída libre.

Isaac Newton (1643-1727), matemático, físico, astrónomo y teólogo, estudia todos los avances disponibles en su época y plasma en sus libros *Philosophiæ naturalis principia mathematica* sus tres leyes que fundamentan la física clásica, además genera una teoría de dinámica de fluidos, demostrando que las trayectorias planetarias no son vórtices y con base en los estudios de cónicas por Apolonio (262 a.C. -160 a.C.) registrados en su libro *Sobre las secciones cónicas* que los planetas se mueven en elipses [2].

Hasta entonces, ya se tenía bien estudiado por qué se movían los objetos macroscópicos y bajo cuales trayectorias, sin embargo, aún no se estudiaba el comportamiento de los objetos en escalas imperceptibles para el ojo humano.

Las primeras ideas acerca del cómo estaban compuestas las cosas fueron hechas por Leucipo y su alumno Demócrito (V- IV a. C.) que a través de un experimento pensado en el que se dividía una pieza de oro a la mitad y nuevamente a la mitad de manera sucesiva se llegaría a un fragmento indivisible “a-tomic” que en griego significa no divisible.

Estas ideas se retomaron por John Dalton (1766-1844) quien al combinar distintas sustancias químicas se percató de que cumplían ciertas razones entre dichas sustancias, pero no era razón suficiente para aceptar la teoría atómica. No fue hasta el s. XIX que al estudiar el movimiento Browniano se sugería que había partículas microscópicas que se movían causando dicho movimiento. Albert Einstein (1879-1955) en 1905 realizó los cálculos con base en la hipótesis que al coincidir con los resultados experimentales se tomó por correcta la teoría atómica. [3]

El primer antecedente de la estructura atómica como la conocemos hoy en día es el propuesto por Dimitri Mendeleev y Lothar Meyer. El concepto que introducen en 1869 es el de una *relación periódica* de las propiedades de los elementos a manera que aumenta su masa atómica el cual se basó en únicamente 60 elementos por lo que los huecos en su tabla periódica se han ido agregando hasta como se le conoce hoy en día [4].

En 1897, J.J. Thompson realizó un experimento en el cual a dos placas se les suministra una alta diferencia de potencial -es decir, funcionan como ánodo y cátodo- las cuales se encuentran dentro de un tubo a baja presión con algún gas. Sin embargo, cuando el gas se encuentra a una presión máxima de 1.3×10^{-5} bar, un amperímetro marca una corriente indicando que existe un flujo que viaja entre ambas placas. Además, es apreciable una mancha luminosa que es susceptible a los campos eléctricos y magnéticos pues ésta cambia su posición respecto a los mismos, esto es, las partículas emitidas por el cátodo están cargadas eléctricamente. El sentido en que la mancha se desvía indica que son portadoras de carga negativa. A estas partículas de carga negativa se les llamó *rayos catódicos* [5].

En el mismo año, continuó con sus experimentos en donde buscaba caracterizar los rayos catódicos, uno de ellos era encontrar su relación carga/masa. Concluyó que la relación es 1.78×10^8 Coulomb/g, además observó que el resultado era independiente del gas, así como del cátodo. El valor máximo para e/m corresponde al átomo de Hidrógeno, con base en este resultado Thompson supuso que la masa de la partícula de rayos catódicos era inferior a una masa atómica, además infirió que la carga de la partícula de rayos catódicos es igual a la magnitud del átomo ionizado una vez. Hoy en día nos referimos a los rayos catódicos como *electrones*.

Continuando con el estudio de la carga de los electrones, Millikan en 1909 determina la unidad electrostática de dichas partículas a través de un experimento, el cual consistía en una gota de aceite que caía en un medio de viscosidad conocida y al aplicársele una diferencia de potencial alrededor de 5.3 kV, esta cambiaba su dirección y se tomaban datos de su velocidad y del radio de la gota esto con la finalidad de usar las ecuaciones de Navier Stokes y con ello poder inferir la unidad mínima de carga electrostática. Cada experimento duraba alrededor de una hora, y después de analizar las primeras 23 gotas de aceite llegó a dos resultados, el primero es la carga del electrón y el segundo el número de Avogadro [6].

$$e = 4.774 \pm .009 \times 10^{-10} \text{ unidad electrostática} \quad (1.1)$$

$$N = 6.062 \pm .012 \times 10^{23} \quad (1.2)$$

Lo anterior no quiere decir que el valor de la unidad de carga sea erróneo, ya que 4.80×10^{-10} ues equivale a 1.60×10^{-19} C que es semejante al valor actual. Ya con estos resultados, era posible determinar la masa del electrón, el cual Thompson y sus colaboradores trabajaron y llegaron a:

$$m = 9.11 \times 10^{-29} \text{ g} \quad (1.3)$$

Con este valor de la masa, se concluye que, para el hidrógeno, la masa del átomo es 1836 mayor que la masa del electrón [7 y 8].

A finales del siglo XIX los científicos consideraban que la mayor parte de la física había sido descubierta y que lo que quedaba por descubrirse era mínimo o bien era cuestión de mejorar los instrumentos para tener mayor precisión en las mediciones. Esto se justificaba a través de los últimos hallazgos realizados como el de la tabla periódica, aunque su naturaleza aún no era comprendida.

En la física la mecánica de Newton había sido extendida por Joseph Louis Lagrange y Sir William Hamilton la cual había sido aplicada en el movimiento planetario, elasticidad e hidrodinámica. Mientras que Count Rumford y James Joule habían encontrado el equivalente mecánico del calor. Por otra parte, Sadi Carnot encontraba la formulación de lo que se conoce como entropía y la segunda ley de la termodinámica, cuyo trabajo fue continuado por Josiah Gibbs.

En el campo de la óptica y el electromagnetismo, James Clerk Maxwell había unificado las principales observaciones de la materia mientras que Heinrich Hertz en 1887 había demostrado finalmente el comportamiento *ondulatorio* de la luz. En pocas palabras se habían desarrollado las materias que en conjunto conocemos como *Física Clásica* [9].

A inicios del siglo XX se da el desarrollo de la *mecánica cuántica*, con la cual el conocimiento se amplía a los átomos y partículas subatómicas. Este avance se logró gracias al estudio de la radiación emitida por los materiales al incrementar su temperatura de rojo a blanco y finalmente a azul, que en términos de frecuencia indica que pasa de baja a alta frecuencia conforme la temperatura aumenta.

Dicha frecuencia que emite depende del objeto y sus propiedades intrínsecas, sin embargo, idealizando un objeto que emite y absorbe en todas las frecuencias y cuya radiación no dependa de sus propiedades intrínsecas, se encontró un fenómeno que no podía ser explicado con la teoría fundamentada en aquella época. El nombre del objeto se denominó *cuerpo negro*, y su radiación asociada *radiación de cuerpo negro*.

La radiación de cuerpo negro no diverge a ninguna frecuencia. Sin embargo, estos datos experimentales no podían consolidarse en una expresión analítica con base en el desarrollo de la física del siglo XIX, algunos físicos como Lord Rayleigh y J. H. Jeans hallaron una expresión para la gráfica, no obstante, ésta diverge en lo que llamaron *catástrofe ultravioleta*. La física de aquel entonces no resolvía el problema.

El primer científico en dar una explicación al fenómeno fue el físico Max Planck en 1900, que al igual que sus antecesores planteó la hipótesis de que la radiación emitida por el cuerpo negro era a consecuencia de las oscilaciones en los electrones que constituyen cada material. En contraste con lo planteado por Rayleigh y Jeans, Planck no asumió que tomaran valores continuos o cualesquiera, sino que les atribuyó valores discretos que tenían que ser proporcionales a una integral múltiple de la frecuencia, o bien que la energía del oscilador debía ser proporcional a un entero por la frecuencia, esto es:

$$E = h\nu. \quad (1.4)$$

Con esta hipótesis llegó a la constante de proporcionalidad que ajustaba los datos experimentales reportados $h=6.626 \times 10^{-34}$, es decir, *la energía está cuantizada* [10].

Ya con el extraordinario descubrimiento del cuanto de energía, se corrigió uno de los experimentos del momento: el efecto fotoeléctrico. El efecto fotoeléctrico consiste en un experimento en el cual, en un tubo a baja presión, se colocan dos placas metálicas paralelas con una diferencia de potencial que se puede ajustar para ser negativa o positiva, a estas placas se les conecta un amperímetro. Por otra parte, a una de las placas (emisor) se le hace incidir luz de intensidad y frecuencia (longitud de onda) variables.

Se observó una corriente eléctrica para una frecuencia que es independiente de la intensidad de la luz y al cambiar la diferencia de potencial a una negativa la corriente no se presenta [11].

Ahora bien, la luz es una onda electromagnética dependiente del tiempo en física clásica, no obstante Einstein propone que la radiación es en sí misma un paquete de energía usando la hipótesis de Planck. Por lo que, usando la conservación de la energía, es posible calcular la energía cinética T de un electrón expulsado de una de las placas metálicas, igual a un paquete de energía menos la necesaria para remover al electrón de la superficie del metal “ ϕ ” [12].

$$T = h\nu - \phi = h\nu - h\nu_0, \quad (1.5)$$

En aquél entonces era sabido que si un elemento era llevado a altas temperaturas emitía luz característica (*espectro de emisión*), a estas líneas se les identificó con el espectro electromagnético de la luz por Balmer que basándose en el hidrógeno planteó una fórmula que relaciona el recíproco de la longitud de onda $\tilde{\nu}$ con la diferencia de los recíprocos de un entero positivo (n) al cuadrado.

No obstante, para n muy grande la fórmula de Balmer tiene un límite en $\lambda = 364.7$ nm, por lo cual es necesario una mejor aproximación para el hidrógeno. Estas líneas de emisión trataron de ser explicadas por Lyman, Pachen y Brackett en diferentes regiones del espectro sin lograr predecir todas las líneas en conjunto. Sin embargo, quien finalmente logra predecirlas es Johannes Rydberg, que generalizó la fórmula de Balmer considerando nuevamente la diferencia recíproca de números enteros al cuadrado y añadió una constante llamada *constante de Rydberg*. Nuevamente se tiene que los parámetros no son continuos, sino discretos [13].

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (1.6)$$

donde R_H es la constante de Rydberg con valor actual de $109\,677.57 \text{ cm}^{-1}$ y n_2 siempre es mayor a n_1 ambos enteros positivos. Con esto se tenía suficiente evidencia experimental para realizar un bosquejo del espectro atómico del hidrógeno, pero aún no se tenía una explicación teórica del fenómeno, no fue sino hasta 1911 que Niels Bohr realizó dos hipótesis no clásicas acerca de los electrones en el átomo, la primera era asumir la existencia de órbitas estacionarias y la segunda especificar estas órbitas bajo una condición de cuantización.

Con la primera cuantizó el momento angular del electrón (ec. 1.7) y con la segunda se obtuvo el radio permitido para las orbitas (ec. 1.8) que posteriormente se llamaron *orbitas de Bohr*.

$$l = m_e v r = n \hbar, \quad (1.7)$$

$$r = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2 n^2}{m_e e^2}, \quad (1.8)$$

dónde n es un número entero positivo, \hbar es la constante de Planck dividida entre 2π , ϵ_0 es la constante de permitividad eléctrica en el vacío, e es la carga del electrón, m_e la masa del electrón, v la velocidad, r el radio y finalmente l el momento angular.

Con $n=1$ se puede calcular la órbita con el menor radio, el cual es nombrado radio de Bohr y su valor es 5.29×10^{-11} m. Ahora bien, con el radio se puede tener un potencial de Coulomb suponiendo que el electrón y el protón se encuentran separados la distancia r mencionada, y

la energía cinética se calcula de la manera usual por lo que es posible calcular la energía total del electrón que al estar condicionada por la cuantización nos dará los valores permitidos de energía.

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}, \quad (1.9)$$

El signo negativo en la ecuación anterior indica que son estados ligados y la energía es menor conforme el electrón y el protón están infinitamente alejados. Nótese que al hacer $n=1$ se obtiene el valor mínimo de energía denominado *estado base*, a temperatura ambiente tanto el hidrógeno como otros elementos se encuentran en su estado base electrónico. A estados más altos de energía se les llaman *estados excitados* y son generalmente inestables, logrando estabilizarse a través de la emisión de energía en forma de radiación electromagnética llegando así al estado base. Bohr asumió que el espectro de emisión observado en el hidrógeno era debido a la transición entre estados permitidos de energía, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Delta E = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = h\nu. \quad (1.10)$$

Al término $\Delta E=h\nu$ se le llama condición de frecuencia de Bohr que nos indica que los electrones caen de un nivel superior a un nivel inferior pues $n_2 > n_1$, la energía liberada es la de un fotón. Con el desarrollo anterior es posible encontrar el número de Rydberg quedando expresado de la siguiente manera:

$$R_H = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 c h^3}. \quad (1.11)$$

Con c velocidad de la luz, y de esta manera para diferentes enteros n es posible explicar las líneas de emisión para el átomo de hidrógeno [14].

Regresando a la naturaleza de la luz y la incógnita de si es una partícula o una onda pues existe evidencia experimental que sustentan ambos comportamientos, tal como la dispersión de la luz blanca en su espectro o bien el efecto foto eléctrico, se refiere a la esta propiedad como la *dualidad onda-partícula*. Posteriormente en 1924, Louis de Broglie plantea que, si la luz puede tener esta propiedad, la materia también la tiene y llega a relacionar la longitud de onda con el momento de las partículas a través de la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (1.12)$$

Debido a esta dualidad, las mediciones no pueden realizarse de manera clásica, este fenómeno fue estudiado por Werner Heisenberg, que determinó que es imposible saber el momento que se transfiere al electrón por un fotón con la finalidad de determinar la posición del primero, llegando a la siguiente ecuación:

$$\Delta x \Delta p \geq h. \quad (1.13)$$

La ecuación anterior es conocida como el *principio de incertidumbre* y enuncia que si uno desea saber la posición Δx de manera automática se introduce una incertidumbre en el momento y viceversa. Cabe destacar que es una propiedad de la medida en sí, y no depende de la precisión de la medición [15].

1.3 Estructura Electrónica del Átomo.

Con respecto a la estructura electrónica del átomo, en un punto de vista simple, se le puede comparar con el sistema Solar en donde los planetas recorren lugares específicos del espacio entorno al Sol llamados órbitas. El átomo tiene una estructura similar, los electrones que son portadores de carga negativa giran alrededor del núcleo en regiones del espacio llamados orbitales, sin embargo, los lugares geométricos no son elipses como en el primer caso sino más complicados.

En mecánica cuántica, un orbital atómico es una función matemática que describe el comportamiento onda-partícula de un electrón en el átomo, dicha función puede ser usada para encontrar la probabilidad de encontrar al electrón en una región específica alrededor del núcleo. Además, el orbital atómico se refiere a la región del espacio en donde se puede calcular que el electrón esté presente.

Cada orbital en el átomo está caracterizado por un conjunto de valores denominados números cuánticos n que corresponde a la energía del electrón, l que se asocia al momento angular y m el número cuántico magnético. Cada orbital puede ser ocupado por dos electrones como máximo, cada uno con su respectivo espín s que es otro número cuántico.

Los nombres de los orbitales son s , p , d y f . Esta nomenclatura viene de la descripción de las líneas de algunos metales alcalinos hechos por los primeros espectroscopistas *sharp*, *principal*, *diffuse*, y *fundamental*, los cuales corresponden a los valores 0, 1, 2 y 3 para el número cuántico l mientras que para valores mayores a 3 las letras continúan como g, h, i, k saltándose la j debido a que no en todos los lenguajes se le diferencia de la letra i.

De igual manera al sistema planetario donde los planetas giran respecto a su propio eje, los electrones tienen una característica intrínseca llamada espín que se ha observado experimentalmente. En cada nivel electrónico del átomo sólo pueden estar un máximo de dos electrones, lo que corresponde al espín semientero positivo o negativo.

La manera con la que se distribuyen estos electrones en el átomo obedece el principio de exclusión de Pauli, al ser fermiones y al estado de mínima energía. La tabla periódica exhibe este acomodo electrónico de la siguiente manera:

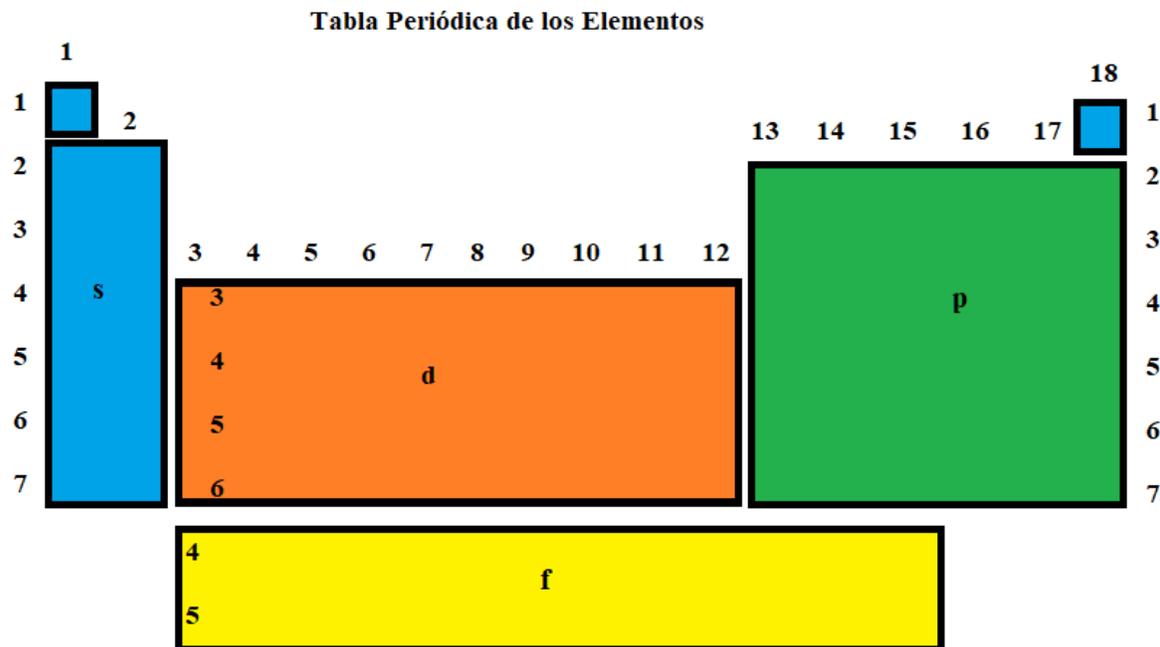


Figura 1. Tabla periódica en términos del acomodo de electrones. Se muestran niveles y orbitales.

En 1916 G. N. Lewis propuso una interacción electrónica entre un enlace de dos electrones acoplados que posteriormente se le llamó *valencia* en donde se comenzaba a estudiar este tipo de interacción entre electrones de diversos átomos y nombrando así el tipo de enlace que formaban. Hoy en día la teoría de enlace de valencia complementa la teoría orbital molecular y supone que los electrones están distribuidos en conjuntos de orbitales moleculares y que se extienden por toda la molécula. Esta teoría puede predecir propiedades magnéticas y de ionización de manera directa mientras que la teoría de valencia lo hace de manera más complicada. La principal aplicación de la teoría de enlace de valencia es conocer la formación de los enlaces más fuertes posibles.

En química se define la *resonancia* como la manera de describir electrones deslocalizados de ciertas moléculas que no pueden ser descritas por una sola estructura de Lewis. La deslocalización de electrones disminuye la energía potencial de la sustancia lo cual la hace más estable.

La diferencia entre la energía potencial de la estructura actual y aquella estructura que contribuye al mínimo potencial energético se llama energía de resonancia o energía de deslocalización. Existen estructuras que contribuyen en mayor y menor medida, estas últimas son las menos probables. Los *contribuyentes mayores* obedecen la regla del octeto, es decir, 8 electrones de valencia alrededor de cada átomo lo cual asegura la estabilidad molecular [16 y 17].

1.4 Núcleo.

En 1911 Rutherford realiza un experimento de dispersión de partículas alfa sobre una película de oro de un grosor de $0.4 \mu\text{m}$ en donde un evento en 20,000 se dispersa con un ángulo promedio de 90° , en contraste con el ángulo más probable calculado por Geiger de 0.87° para un haz de partículas alfa. Con base en estos resultados Rutherford propone que el átomo debe tener concentrado un campo eléctrico intenso para lograr dicha deflexión [18].

Con esto nace un modelo atómico en el cual la masa se encuentra concentrada en una región pequeña denominada núcleo. El núcleo debería contener toda la carga positiva del átomo. Mientras que el resto del átomo debería contener la carga negativa de los electrones.

Sin embargo, hasta 1919 comprobó este hecho a través de una reacción nuclear donde en el detector de sulfuro de zinc se apreciaban centelleos similares a los producidos por el hidrógeno. Sin embargo, esto solo era posible si se tuviera alguna fracción elemental de los componentes de la reacción nuclear [19].



De esta manera se detectó la partícula con carga positiva contenida en el núcleo, denominada protón. El protón con símbolo p es el núcleo del hidrógeno y tiene una carga igual al electrón en valor absoluto y su masa es $938.27 \text{ MeV}/c^2$ [20].

Posteriormente Chadwick en 1932, a través de un experimento que consistía en bombardear berilio con partículas alfa provenientes del polonio, descubrió que la radiación proveniente del berilio tenía un comportamiento semejante al del protón y efectuaba un efecto similar al Compton. Sin embargo, los cálculos se simplificaban al asumir que su masa era igual a 1 y su carga era cero o bien un neutrón [21].



Con el descubrimiento del neutrón se tiene bien caracterizado el núcleo de cada átomo pues son combinaciones de protones y neutrones, por lo que comenzaron a hacerse diferentes reacciones nucleares.

Algunas propiedades del núcleo son las siguientes:

Radio Nuclear. El radio de los núcleos es decir el conjunto de protones y neutrones es del orden de 1 fm, si los componentes del núcleo se distribuyen en una esfera de radio R , considerando que tanto los protones como neutrones son esferas rígidas de radio r en contacto con cada una el radio nuclear R se puede aproximar de la siguiente manera:

$$R \cong r_0 A^{1/3} \quad (1.16)$$

En donde se ha reemplazado r por r_0 debido a que no puede considerarse que el volumen total es sólo la suma de los volúmenes individuales, esto es hay espacio entre los nucleones por lo que se espera que r_0 sea mayor a 1 fm.

Energía de Amarre. La energía de amarre del núcleo se refiere a la energía necesaria para separar cada uno de los nucleones del núcleo, considerando que la masa nuclear es menor a la masa de sus componentes sumados de manera individual (aunque puede no ser así), la energía de amarre puede calcularse de la siguiente manera para un núcleo de masa A y número atómico Z que es igual al número de protones además la diferencia entre éstos es igual al número de neutrones N .

$$B(Z, N) = \{Zm_p + Nm_n - m(Z, N)\}c^2 \quad (1.17)$$

Donde los subíndices p y n son para protones y neutrones, m indica la masa y $m(Z, N)$ se usa para denotar la masa del núcleo, la energía de amarre es siempre positiva, el valor máximo es de 8.5 MeV para $A \approx 60$ posteriormente empieza a decaer hasta 7.5 MeV. Para núcleos ligeros $A < 30$ la fusión de dos núcleos produce un núcleo con energía de amarre mayor por nucleón liberando energía que es el principio de producción energética en las estrellas. Para núcleos pesados la división de este mejor conocido como **fisión** libera energía, este el principio de operación de un reactor nuclear, donde los neutrones colisionan con elementos pesados como uranio o plutonio fisionándolos y produciendo más neutrones formando reacciones en cadena. Este también es el principio de funcionamiento de armas de destrucción masiva.

La razón por la cual no se encuentran en la naturaleza elementos con núcleos más pesados se debe a que la fuerza nuclear, es decir la fuerza que mantiene unidos a los nucleones por encima de la repulsión de Coulomb, tiene un corto alcance por lo que llega a saturarse impidiendo que puedan generarse núcleos más pesados.

Momento Angular Total. El núcleo al ser un sistema cuántico de neutrones y protones que son a su vez fermiones cuenta con un momento angular total o “espín” del núcleo que es $n\hbar$ si A es par o $(n + 1/2)\hbar$ si es impar con n un entero, esto debido a que tanto el protón como el neutrón tienen espín $\hbar/2$.

Momento Dipolar Magnético. Debido a la presencia de partículas cargadas en el núcleo, se genera un momento multipolar eléctrico y por el movimiento de las cargas un momento dipolar magnético, sin embargo, debe añadirse el momento magnético intrínseco de cada nucleón sin embargo solo se mencionan estas propiedades por completas.

Estados Excitados. Al igual que los átomos y en general los sistemas cuánticos ligados tienen la propiedad de tener una secuencia de estados excitados por encima del estado base, los valores de estas energías dependen de la cantidad de nucleones, por ejemplo, si los núcleos son ligeros o pesados o bien si la cantidad es par o impar además debe considerarse el momento angular total del mismo por lo que la cantidad de estados excitados varía de núcleo a núcleo.

Ahora bien, los estados excitados no son estables por lo que en condiciones normales decaen a estados con menor energía del mismo núcleo emitiendo un *rayo gama*. Sin embargo, el estado base del núcleo puede no ser estable para todos los núcleos de los elementos es decir éstos pueden decaer a un núcleo más estable a través de la emisión espontánea de una o muchas partículas. Las opciones de decaimiento se muestran a continuación.

Decaimiento β^- y β^+ . En núcleos ligeros la cantidad de protones es igual a la cantidad de neutrones mientras que en los núcleos más pesados hay un mayor número de neutrones que de protones debido a que se compensa la fuerza de Coulomb entre los protones, no obstante, si el número de neutrones es mayor al requerido para el equilibrio éste puede decaer por la emisión de un electrón y un antineutrino (decaimiento β^-) para de esta manera estar en un estado más cercano al equilibrio.



Por otra parte, si el número de neutrones es menor al necesario ocurre un decaimiento β^+ donde las partículas emitidas son un positrón y un neutrino.



En ambos casos el núcleo resultante puede no ser estable por lo que puede decaer en alguna otra desintegración.

Captura Electrónica. Tal y como su nombre lo indica, el proceso consiste en la captura de un electrón del átomo por el núcleo dando lugar a un decremento del número de protones (-1) mientras que aumenta el número de neutrones (+1). El efecto es semejante al decaimiento β^+ .

Decaimiento α . En esta desintegración se emite un núcleo de helio (${}^4\text{He}$) al cual se le denomina partícula α , siendo el proceso permitido para núcleos pesados y es responsable de la inexistencia de elementos estables para $Z > 83$.



Emisión de Fragmentos Ligeros. Además de un núcleo de helio pueden emitirse para el caso de elementos pesados, núcleos ligeros como ${}^{14}\text{C}$, ${}^{24}\text{Ne}$, ${}^{28}\text{Mg}$ y ${}^{32}\text{Si}$ sin embargo estos casos son raros y difíciles de medir [22].

Fisión. Además de la fisión inducida por neutrones, ésta puede ocurrir de manera espontánea para núcleos con $Z > 100$ por lo cual este proceso junto con la emisión de partículas alfa hace que las vidas medias de los núcleos pesados sean muy cortas.

Todos los procesos anteriores ocurren cuando el estado base del núcleo es inestable, pero pueden proceder también de estados excitados en situaciones especiales. Estos estados excitados decaen a un estado de menor energía a través de la emisión de radiación *gama* o emitiendo un electrón de las capas atómicas. A este proceso se le denomina *conversión interna*.

Los núcleos se clasifican mediante la semejanza en sus nucleones o su masa total, dando lugar a las siguientes definiciones:

Isótopos. Núcleos con el mismo Z , es decir el mismo número de protones.

Isótonos. Se emplea para núcleos con el mismo número de neutrones.

Isóbaros. Para núcleos con el mismo número de masa $A=Z+N$.

Además, el estudio de los núcleos ha hecho posible encontrar las siguientes características:

- Los núcleos ligeros tienen aproximadamente el mismo número de protones y neutrones ($Z=N$). Los núcleos pesados tienen $N>Z$.
- Núcleos Z -par son más numerosos que núcleos Z -impar. Núcleos N -par son más numerosos que núcleos N -impar.
- Núcleos A -par son más numerosos entre los cuales los par-par son más numerosos. Debido a esto solo hay algunos núcleos estables impar-impar: ^2H , ^6Li , ^{10}Be y ^{14}N .
- De los 20 elementos que sólo tienen un isótopo, sólo el ^9Be tiene Z -par.
- El elemento con mayor número de isótopos estables es $_{50}\text{Sn}$ con 10.

Estas características son explicadas por el modelo nuclear de capas.

1.5 Radioactividad.

Una *sustancia radioactiva* es aquella que contiene un isótopo inestable por lo que se encuentra en transformación de manera continua por acción de alguno de los decaimientos. Estos decaimientos son de manera espontánea por lo que no hay manera de predecir en qué momento ocurrirá alguno de ellos. Sin embargo, si se tiene un gran número de átomos, es posible obtener información acerca de la evolución temporal del conjunto, es decir, la actividad del grupo de átomos.

Sea N el número de átomos de isótopos inestables, si asumimos que la probabilidad de que ocurra algún proceso es fija e igual a λdt donde dt es el intervalo de tiempo entonces se tiene:

$$dN(t) = -\lambda N dt. \quad (1.21)$$

El número λ es la constante de desintegración o decaimiento, la tasa en la que la muestra se desintegra se mide por la actividad $A(t)$.

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (1.22)$$

El número de átomos N en un instante t se obtiene mediante integración por lo que se tiene la siguiente ecuación:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.23)$$

Donde N_0 es el número de átomos al instante inicial, usando la ecuación anterior podemos obtener la *vida media* de la muestra que se define como el tiempo necesario de decaimiento de la mitad de los átomos de la muestra, esto es $N_0/2$, por lo que se tiene:

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (1.24)$$

Además, puede darse para una misma substancia el caso en el que decae a otra que al ser inestable pueda decaer hasta un número i -ésimo de veces donde la sustancia k es estable, cada una de las anteriores tiene su propia constante de desintegración, por lo que se tiene la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1}N_{i-1} - \lambda_i N_i. \quad (1.25)$$

Si al momento inicial se encuentra únicamente una substancia Bateman [23] demostró la solución del sistema de ecuaciones diferenciales para el número de átomos del i -ésimo elemento dado por:

$$N_i(t) = N_1(0)(h_1 e^{-\lambda_1 t} + h_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + h_i e^{-\lambda_i t}). \quad (1.26)$$

Donde el coeficiente h expresado en su forma general se obtiene de la siguiente manera:

$$h_i = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)}. \quad (1.27)$$

Debido a que una misma sustancia puede decaer en diversos isótopos, y estos volver a hacerlo de manera consecutiva, se dice que la muestra se encuentra en *equilibrio secular* si el número de átomos de cada especie es aproximadamente constante.

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = \dots \cong 0. \quad (1.28)$$

Por lo que se tiene que para $i > 1$:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots \quad (1.29)$$

Por lo que para el isótopo N_1 se tiene una λ muy pequeña. Por lo que el equilibrio secular se caracteriza por tener isótopos de vida media muy larga con decaimientos a isótopos de vida media muy corta. Estos procesos se pueden encontrar en la naturaleza si la vida media del isótopo radioactivo es mayor a la edad de la tierra, aún pueden encontrarse muestras de este isótopo en equilibrio secular con los isótopos hijo. Tal es el caso del ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th .

Por otra parte, si desea preparar una muestra radioactiva, la tasa con la que se crean los nuevos átomos debe ser mayor al tiempo de decaimiento, de lo contrario la sustancia decae más rápido de lo que se produce. Para una tasa de producción P , la ecuación es la siguiente:

$$A = \lambda N = P(1 - e^{-\lambda t}). \quad (1.30)$$

De donde se observa que el proceso después de una vida media comienza a ser ineficiente [20, 23].

1.6 Reacciones Nucleares.

Las reacciones nucleares en semejanza a las reacciones químicas inician con elementos cuyos productos pueden no ser los mismos a los iniciales. En este caso los núcleos deben ser acelerados para poder vencer la fuerza de Coulomb debido a la interacción de la carga nuclear y vencer el potencial nuclear para lograr la reacción nuclear deseada. La primera reacción nuclear realizada en un laboratorio fue en 1919 por Rutherford [19].

No obstante, se pueden llevar a cabo reacciones nucleares donde los núcleos no traspasan la barrera de Coulomb, estas reacciones son denominadas elásticas y tienen por objetivo la caracterización de isótopos al obtenerse información del radio nuclear, así como los elementos que componen una muestra a través de la medición del retroceso de las partículas incidentes, así como del ángulo de dicho retroceso. En algunos casos al transferirse energía cinética se da lugar a un estado excitado de los átomos iniciales.

Además de los núcleos que participan en una reacción nuclear pueden generarse otras partículas incluso radiación, por lo que los productos que resultan de una reacción nuclear no están determinados de manera inequívoca debido a que para dos reactantes existen diversas posibilidades de productos además de tener numerosos estados cuánticos disponibles. Cada rama en la que se puede desarrollar una reacción nuclear se le llama *canal* por lo que se puede tener un canal, *elástico*, *inelástico* y de *reacción*.

Una reacción nuclear ocurre cuando una propiedad llamado sección eficaz es suficientemente grande de manera que la probabilidad de un evento es mayor de manera proporcional a esta propiedad [20].

1.7 Sección Eficaz.

La sección eficaz es una propiedad que depende de los núcleos en interacción. Esta sección eficaz tiene una interpretación probabilística y se mide en barns donde 1 barn equivale a 100 fm^2 . Lo que a continuación se presenta, ha sido tomado en su mayoría de [20] por considerar particularmente apropiado para este trabajo.

La sección eficaz está relacionada con el flujo de partículas incidentes en un material, por lo que para cada reacción se tiene una sección eficaz diferente. La sección eficaz puede ser calculada considerando que un haz de partículas incidentes en mecánica cuántica es una onda plana $\psi_i(\mathbf{r})$ y la interacción con el blanco es a través del potencial generado por los nucleones $V(\mathbf{r})$ que se supone con simetría esférica por simplicidad.

$$\psi_i(\mathbf{r}) = e^{ikz}. \quad (1.31)$$

Ahora bien, al interactuar la onda plana con el núcleo atómico se producen ondas esféricas, por lo que si se tiene un detector lo suficientemente lejos del blanco para que el potencial $V(\mathbf{r})$ sea nulo éste podrá detectar tanto las ondas planas como las esféricas, por lo que la onda deberá expresarse de la siguiente manera para el valor asintótico.

$$\psi \sim e^{ikz} + f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r}. \quad (1.32)$$

La función de theta indica que las direcciones de dispersión no tienen las mismas probabilidades, a esta función se le llama *amplitud de dispersión*. La probabilidad de corriente \mathbf{j} será diferente para cada onda quedando expresadas de la siguiente manera:

$$j_i = \frac{\hbar}{m} \text{Im} \left(e^{-ikz} \frac{d}{dz} e^{ikz} \right) = \frac{\hbar k}{m} = v, \quad (1.33)$$

$$j_r \sim \frac{\hbar}{m} \text{Im} \left(f^*(\theta) \frac{e^{-ikr}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[f(\theta) \frac{e^{ikr}}{r} \right] \right) = \frac{v}{r^2} |f(\theta)|^2. \quad (1.34)$$

Se define la sección diferencial transversal:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dN/d\Omega}{n\phi}, \quad (1.35)$$

dN es el número de eventos observados en $d\Omega$ por unidad de tiempo, n el número de centros de dispersión del blanco que abarca el haz, y ϕ el flujo incidente que es igual al número de partículas incidentes por unidad de área por unidad de tiempo. $d\Omega$ es el ángulo sólido por lo que si se define una dirección θ y $\theta+d\theta$ y se tiene que $d\Omega=2\pi\sin\theta d\theta$. Los eventos observados son partículas dispersadas por el potencial $V(r)$. $d\sigma/d\Omega$ tiene dimensiones de área y se obtiene de:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{j_r r^2}{j_i}. \quad (1.36)$$

Ahora bien, debido a que el número de partículas que atraviesan una determinada área por unidad de tiempo está determinado por la probabilidad del flujo en esa área, esto es:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = |f(\theta)|^2, \quad (1.37)$$

teniendo de esta manera la distribución angular al evaluar la amplitud de dispersión. La *sección transversal total*, se obtiene de integrar la ecuación anterior.

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = 2\pi \int_{-1}^{+1} |f(\theta)|^2 d(\cos\theta). \quad (1.38)$$

La sección transversal total mide el número de eventos por unidad de tiempo por núcleo blanco por unidad de tiempo dividido por el flujo incidente, por lo que incluye eventos que no se pueden definir a través de una sección transversal tal como la absorción de partículas incidentes por el núcleo.

La sección transversal total es entonces la suma de los posibles eventos, esto es de cada canal como se mencionó anteriormente, considerando que dependiendo de la energía del haz incidente estos canales podrán estar abiertos o cerrados.

$$\sigma = \sigma_{el} + \sigma_{inel} + \sigma_{reacción} + \dots \quad (1.39)$$

Donde $\sigma_{reacción}$ es la sección eficaz que depende de la energía del haz de partículas [20, 24, 25].

1.8 Aplicación de ^{14}C .

El ^{14}C es un isótopo radioactivo del carbono, con vida media de 5730 años. Se produce de manera continua por la interacción del aire con la radiación cósmica que consiste en fotones, neutrones y partículas cargadas. Se encuentra de manera natural en los seres vivos debido a diferentes procesos metabólicos; principalmente la fotosíntesis en las plantas que al ser ingerida por otros seres vivos lo incorporan.

El carbono natural consiste en una mezcla de los dos isótopos estables ^{12}C y ^{13}C con abundancia de 98.9% y 1.1% respectivamente. El ^{14}C inestable tiene una concentración moderna de $\sim 1.3 \cdot 10^{-10}$ %. Una vez que el organismo muere los procesos metabólicos se detienen, los átomos que lo integran ya no se renuevan y la cantidad de ^{14}C comienza a desaparecer de manera gradual, por lo que es posible determinar la fecha de muerte del organismo a través del número de átomos de ^{14}C , la vida media del isótopo y la actividad de la muestra.

Para otros fines las medidas en años son poco usuales, por lo que se utiliza el Becquerel (Bq) que es la unidad del Sistema Internacional [25].

1.9 Interacción de Radiación con Materia.

La interacción de **neutrones** con materia es a través del núcleo de los átomos debido a que carece de carga por lo que no hay interacciones con los electrones, debido a ello sólo pueden interactuar con los núcleos mediante dispersión elástica, inelástica o captura.

En la interacción de **fotones** en materia hay tres principales efectos: El efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.

El efecto fotoeléctrico ocurre cuando un fotón es totalmente absorbido y transfiere toda su energía a un electrón atómico, posteriormente el átomo regresa al estado base por la emisión de uno o más rayos x.

En el efecto Compton el fotón dispersado por un átomo es deflelado en un ángulo theta y pierde sólo parte de su energía, la energía transferida al átomo es emitida en forma de un electrón que tiene un espectro de energía que va desde cero a un máximo, que ocurre a 180° dado por:

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{2E_{\gamma}^2}{mc^2 + 2E_{\gamma}}. \quad (1.40)$$

La producción de pares se da cuando un fotón tiene energía suficiente de manera que se aniquila para crear un par electrón-positrón. Este proceso debe tomar lugar en el campo de una tercera partícula en este caso el núcleo atómico así el momento es conservado. La energía del fotón debe exceder 1.022 MeV que es la masa en reposo del electrón y el positrón. Por encima de la energía mencionada el exceso aparece como energía cinética del par electrón-positrón y una pequeña parte de la energía para el núcleo en retroceso [26].

Las **partículas cargadas** tales como electrones, protones, muones, piones, alfas, así como iones pesados interactúan con la materia distinguiendo tres características, energía depositada en el material, alcance dentro del material y la máxima pérdida de energía en una distancia mínima conocida también como pico de Bragg. Se hará la distinción del electrón como una partícula cargada ligera y se le llamará partícula cargada pesada a toda aquella con una masa mayor a la masa del electrón.

Cada una de las propiedades mencionadas depende de la energía de la partícula y las propiedades del medio por lo cual son únicas de cada partícula, estas propiedades se pueden determinar a través de la ecuación de potencia de frenado de Bethe para partículas cargadas pesadas, propuesta por el nobel Hans Bethe (1906-2005). La ecuación de Bethe es la siguiente:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right) = \left(\frac{4\pi N_A \alpha (\hbar c)^2}{m_e}\right) \left(\frac{\rho Z}{A} z^2\right) \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2(\beta\gamma)^2 m_e}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - U \right]. \quad (1.41)$$

Donde el primer término del lado izquierdo corresponde a la pérdida de energía por centímetro de distancia recorrido en el medio, el primer término del lado derecho es producto de constantes fundamentales: el número de Avogadro N_A , la constante de estructura fina α , la constante de Planck h , y la masa del electrón m_e , en el segundo término ρ es la densidad del medio, A es la masa, Z el número atómico, después I es el potencial de ionización que es proporcional al número atómico Z , z es el estado de carga del ion, β y γ están relacionadas con la velocidad, esto es para una partícula de velocidad $v=0.99c$, $\beta=0.99$ y $\gamma=7$. Los últimos dos términos δ y U son los parámetros del medio. El primer término del lado derecho es un número constante para todas las combinaciones de medios y partículas con un valor de 0.3073 MeV cm²/Mol.

La distancia que viaja en un medio una partícula cargada pesadas y para electrones de baja energía se puede estimar para una energía cinética dada, que depende de β y que al final de su recorrido su energía cinética será cero o bien $\beta=0$. La expresión analítica es la siguiente:

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{(dE/dx)}. \quad (1.42)$$

Donde dx es una distancia infinitesimal en la que la partícula de energía E viaja perdiendo energía dE . Ahora bien, para una energía cinética dada, las partículas pesadas tendrán una menor velocidad, por otra parte, dE/dx es proporcional al estado de carga al cuadrado, por lo que combinando estas observaciones se puede reescribir la ec. 1.42 de la siguiente manera:

$$R \approx \frac{1}{m_{ion} z_{ion}^2}. \quad (1.43)$$

A partir de la ec. 1.43 se pueden estimar los rangos de todas las partículas cargadas con energías no relativistas tomando como referencia el alcance de los protones, a través del cociente R_{ion}/R_p y al ser la masa y estado de carga del protón iguales a uno se obtiene:

$$\frac{R_{ion}}{R_p} = \frac{1}{Az_{ion}^2}. \quad (1.44)$$

Con base en los conceptos anteriores del alcance y la pérdida de energía por una partícula pesada en un medio se define el pico de Bragg, el cual es la máxima pérdida de energía en una corta distancia, nuevamente depende de la energía cinética de la partícula, y el medio que atraviesa, sin embargo, para una energía cinética fija pueden tenerse diversos alcances para cada partícula. La mayor aplicación de este concepto es empleado en radio terapia en donde se busca que la mayor cantidad de energía sea depositada en un tumor.

Las interacciones para las partículas ligeras, es similar a las partículas pesadas no obstante debido a su masa, las trayectorias que siguen en el medio son en zigzag al contrario de las partículas pesadas que tienden a ser líneas prácticamente rectas. Las trayectorias pueden extenderse por largas distancias en el medio, en particular al final de su recorrido.

En el fenómeno de pérdida de energía por radiación en los electrones denominado Bremsstrahlung, la radiación es producida cuando la partícula atraviesa el medio por lo que experimenta una aceleración/desaceleración cuyo resultado es la radiación.

La sección transversal de emisión de estos fotones está dada por:

$$\frac{d\sigma}{dE_{fotón}} \approx \frac{10\alpha Z^2}{E_{fotón}} r_e^2 \frac{\gamma}{(\gamma - 1)}. \quad (1.45)$$

Donde α es la constante de estructura fina, r_e es el radio clásico del electrón 2.813 fm y γ es el factor de Lorentz:

$$\gamma = \frac{E_e}{m_e c^2}. \quad (1.46)$$

Debido a estas características los electrones que interactúan con un medio son deflectados continuamente generando a su vez radiación que aumenta conforme aumenta Z .

Además de lo anterior, otra característica particular de la interacción de radiación con materia es la radiación de Cherenkov la cual surge cuando una partícula cargada viaja en un medio con una velocidad mayor a la velocidad de la luz en ese medio, esto es:

$$v > v_{luz}; v_{luz} = \frac{c}{n} \quad (1.47)$$

Donde n es el índice de refracción en el medio [13, 20 y 25].

1.10 Antecedentes Directos.

Desde que se comenzó a obtener energía eléctrica en las plantas nucleares a través de la fisión de elementos radioactivos se ha estudiado la contaminación que los desechos pueden presentar, esto con el fin de caracterizarlos y usar tratamientos con una descontaminación más eficiente.

Uno de los desechos que tienen los reactores nucleares son las barras de control de grafito, quedando éstas irradiadas. Los principales contaminantes de las barras de control se pueden clasificar en 3:

1. *Provenientes de Corrosión e Impurezas.* Tales como ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{60}Co , ^{41}Ca , ^{55}Fe , ^{59}Ni , $^{100\text{m}}\text{Ag}$ y ^{109}Cd .
2. *Productos de Fisión:* ^{90}Sr , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{107}Pd , $^{113\text{m}}\text{Cd}$, $^{121\text{m}}\text{Sn}$, ^{129}I , ^{133}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{147}Pm , ^{151}Sm , $^{152,154,155}\text{Eu}$ entre otros.
3. *Provenientes del Uranio y sus Transiciones:* $^{238,239,240,241}\text{Pu}$; $^{241,243}\text{Am}$; $^{242,243,244}\text{Cm}$. La presencia de alguno de estos indica fallas en la operación del combustible del reactor.

Las principales especies presentes en el grafito irradiado con vida media larga son el ^{14}C y ^{36}Cl y con vida media corta ^3H y ^{60}Co y pequeñas cantidades de productos de fisión y actínidos [27].

Los principales contaminantes a tratar son el ^{60}Co , ^{36}Cl y el ^{14}C , mientras que la descontaminación de otros isótopos se puede realizar por incremento de temperatura como en el caso del ^{129}I y ^3H [28].

Métodos de caracterización de ^{14}C proveniente de grafito irradiado por neutrones indican que el grafito tiene impurezas de ^3H , ^{60}Co , además el ^{14}C se encuentra concentrado principalmente en su superficie [29].

1.11 El Presente Trabajo.

El presente trabajo tiene por objeto de estudio una barra de control del reactor nuclear TRIGA Mark III por el método de espectrometría de masas debido a que las barras del reactor fueron cambiadas después de encontrarse dentro del reactor por aproximadamente 20 años, por lo que al ser irradiadas por neutrones se espera apreciar un aumento del isótopo radioactivo ^{14}C . Este material, una vez bien caracterizado, puede ser útil en investigación en astrofísica nuclear, así como en datación.

Por otra parte, haremos la caracterización de la barra de control de grafito irradiado por medio de espectroscopía gama, con el objetivo de conocer todos los radioisótopos presentes en esa barra.

2. Metodología.

2.1 Reactor Nuclear TRIGA Mark III.

El 27 de noviembre de 1970 inició de manera formal el Centro Nuclear Dr. Nabor Carrillo Flores con domicilio en la Carretera México Toluca S/N, La Marquesa, Municipio de Ocoyoacac, Estado de México, C.P. 52750, lugar donde se ubica el reactor TRIGA Mark III [30]. Se llama TRIGA Mark III debido al objetivo que tiene el centro nuclear: la T es de *training* debido al adiestramiento del personal, R viene de *research* por la investigación científica, I por los isótopos que se pueden fabricar en el reactor y por último GA de *General Atomic*s institución que construye este tipo de reactores, dicho esto el número III es por el tercer modelo que han desarrollado. Su potencia máxima nominal es de 1 MW en operación continua y se alcanzan flujos de 3×10^{11} n/cm² s en su núcleo.

El reactor tiene como combustible una mezcla de hidruro de zirconio con uranio, para control de la radiación se usan 4 barras de grafito, a manera de moderador y blindaje se usa agua, y todo esto se encuentra en un contenedor de concreto. A este tipo de reactores se les conoce como “de piscina”.

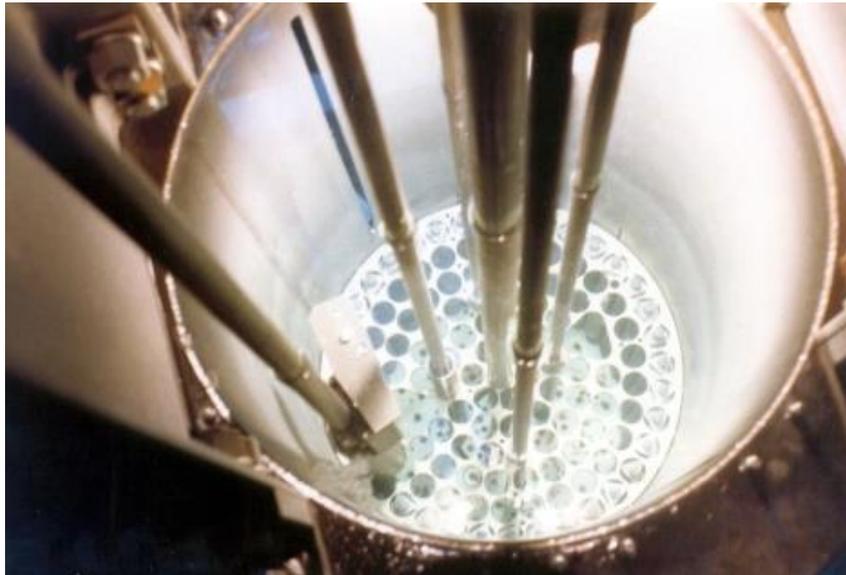


Figura 2. Núcleo del Reactor TRIGA MARK III. Imagen tomada de [31].

A causa de que las barras de control de grafito se encuentran dentro del núcleo del reactor, reciben de manera continua la radiación producida, en este caso principalmente el flujo de neutrones [31].

2.2 Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores.

El Laboratorio Nacional de Espectrometría de Masas con Aceleradores (LEMA) del Instituto de Física de la UNAM, tiene por objetivo medir concentraciones isotópicas de: ^{14}C , ^{10}Be , ^{26}Al , ^{129}I y Pu separando, identificando y contando, con dispositivos eléctricos y magnéticos isótopos individuales [32, 33]. El análisis en LEMA cuenta con tres etapas un espectrómetro de masas de baja energía, otro de alta energía acoplados a través de un acelerador.

En la primera etapa se cuenta con un carrusel que es donde se colocan hasta 50 muestras a analizar. A continuación, se cuenta con una fuente de iones tipo “Sputtering Negative Ion Cesium Source” (SNICS) que mediante un haz de Cesio de 7 keV y la ablación atómica produce átomos libres que al interactuar con el vapor neutro de Cesio genera iones negativos debido al bajo potencial de ionización del Cesio [34].



Figura 3. Carrusel de muestras en LEMA. Foto: D. Belmont.

Posteriormente se extraen los iones negativos usando un electrodo a 28 keV generando así un flujo de iones negativos de 35 keV de energía [35].

A manera de filtro de energías se utiliza un deflector electrostático, el cual cuenta con dos placas con voltaje constante entre ellas, las placas son casquetes esféricos concéntricos de radio r_1 y r_2 respectivamente. El filtro únicamente deja pasar las partículas con energía de 35 keV y estado de carga (-1).

El haz continúa hasta llegar al imán inyector, el cual se encarga de inyectar las partículas al acelerador con una trayectoria de 90° respecto a la inicial. No obstante, para la medida de concentración relativa de los isótopos es necesario adicionar un voltaje a la entrada del imán inyector, el cual cambia la rigidez magnética que selecciona cada masa en intervalos distintos de tiempo.

Cada medida isotópica se efectúa en 10 ms, para el ^{12}C y ^{13}C se ocupan 100 μs mientras que el ^{14}C ocupa 9.5 ms debido a su escasa abundancia, en cada intercambio se tiene un lapso de espera de 100 μs para el establecimiento de los voltajes.

Finalizada la primera etapa los iones pasan al acelerador tipo tándem que es un acelerador electrostático, donde el proceso de aceleración utiliza un campo eléctrico estático.

El campo eléctrico es generado por una terminal de alto voltaje positivo (máximo 1 MV), la terminal se encuentra conectada a tierra a través de una serie de resistencias que unen platos equipotenciales en serie formando un gradiente constante. Todo esto se encuentra en vacío de 10^{-10} bar dentro del cual se propagan las partículas (iones negativos) acelerándose hacia la terminal de alto voltaje.

En esta sección el haz atraviesa el gas Argón, que se encuentra a una presión de entre 2 y 8 milibares, que al interactuar con las partículas incidentes se lleva a cabo un intercambio de carga, donde el haz con carga inicial (-1) pierde electrones quedando en estado de carga positiva (+1, +2, etcétera) [36]. El proceso de intercambio de carga genera la ruptura de las moléculas por lo que se suprime el fondo molecular [37].

Debido a que ahora su carga es positiva las partículas se aceleran hacia el exterior del tándem entrando a la tercera etapa. Cabe mencionar que el acelerador se encuentra dentro de un tanque lleno de un gas aislante especial: SF_6 a presión de 5 o 6 bar lo que impide las descargas mediante ruptura dieléctrica [38].

Por último, en la etapa de alta energía se selecciona el isótopo de interés a través de la rigidez magnética del imán de alta energía, a la salida de este se encuentra un deflector electrostático esférico (ESA) que cambia la dirección del haz en 120° dirigiéndolo al detector. De manera simultánea se colocan cajas de Faraday para contar los isótopos con radio de curvatura distinto, este conteo se realiza a través de una corriente eléctrica [39].

El detector es una cámara de ionización de gas isobutano con doble ánodo a 5-10 mbar de presión, ésta se encuentra separada de la línea de haz (10^{-7} mbar) por una ventana de Si_3N_4 de 40-150 nm de espesor.



Figura 4. Laboratorio de Espectrometría de Masas con Aceleradores. Foto: D. Belmont.

2.3 Laboratorio de Preparación de Muestras.

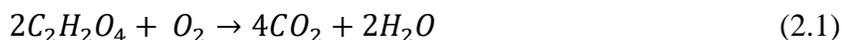
En el laboratorio de preparación de muestras es donde las muestras a analizar se someten a un proceso de grafitización, para de esta manera tener un cátodo que posteriormente se ingresará al LEMA para su análisis isotópico.

La preparación del ácido oxálico se divide en el proceso de combustión y grafitización. Mientras que las muestras de la barra de control del reactor se sometieron a un proceso diferente con el objetivo de no contaminar el material de laboratorio de uso cotidiano.

El ácido oxálico es una azúcar proveniente del betabel, se usa como referencia estándar del cociente $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ para la datación de objetos por espectrometría de masas. Debido a que es un estándar se comercializa a nivel mundial, con fecha de cosecha de 1977 y concentración relativa $1.6 \times 10^{-12} \text{ }^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$. Su preparación se explica a continuación.

Combustión. Primero se pesa el ácido oxálico a usar con una micro-balanza de precisión en el proceso se debe usar guantes, cubre bocas, cofia y pinzas esterilizadas con el fin de evitar contaminación en este proceso. Posteriormente el ácido oxálico se coloca en la parte superior del instrumento llamado Vario Micro CUBE donde yace un carrusel con espacio para 120 muestras, donde porta las muestras a grafitizar.

El proceso de combustión se lleva a cabo en una columna donde se induce la reacción:



Una vez que el ácido oxálico se ha colocado en el carrusel, éste deja caer la muestra en una primera columna interior que se encuentra a 950 C y con presencia de oxígeno. La columna cuenta con filtros como cuarzo, cobre, plata y aluminio cuya función es purificar el CO₂. Una vez separado el dióxido de carbono gaseoso del vapor de agua, pasa a la siguiente columna.

Reducción. La finalidad de esta columna denominada de adsorción es retener los gases de dióxido de azufre, de nitrógeno y otros contaminantes que pudiese tener la muestra. Para lograr esto la mezcla de gases se separa por sublimación, en donde cada gas se libera a diferentes temperaturas tal y como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 1. Punto de evaporación para cada gas contaminante.

Gas	Temperatura [C]
CO ₂	60
H ₂ O	100
SO ₂	600

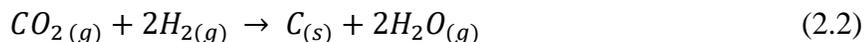
Para pasar el gas al siguiente proceso se inyecta helio, el cual es un gas inerte con pureza del 99.99999%.

Hasta ahora se ha manejado el azúcar de betabel de tal manera que el ácido oxálico se ha transformado a vapor de CO₂, por lo que continúa la segunda parte del proceso, la grafitización.

Grafitización. Para llevar a cabo este proceso se tiene un grafitizador suizo, el cual cuenta con 7 hornos en donde se pueden usar de manera simultánea para la obtención de 7 pastillas de grafito.

En cada uno de los hornos se cuenta con un tubo de ensayo con 5 mg de hierro que fue previamente acondicionado a 500 C para eliminar cualquier tipo de impurezas. El hierro se utiliza como catalizador en la reacción, mientras que el dióxido de carbono se encuentra en una trampa de zeolita que captura el CO₂ donde nuevamente se calienta a 450 C para purificar la muestra.

La reacción química es de óxido reducción y es denominada reacción de Bosch en honor al químico alemán Carl Bosch que llevó a cabo la siguiente reacción:



La reacción anterior produce carbono sólido que se precipita en el tubo de ensayo que es la pastilla de grafito que se colocará en el cátodo. En el cátodo de aluminio se pesan aproximadamente 3 mg y posteriormente una prensa aplica una presión de 10.3 bar para evitar alguna burbuja de aire contamine la muestra. La muestra está lista para su posterior ingreso al carrusel de análisis en LEMA [40].

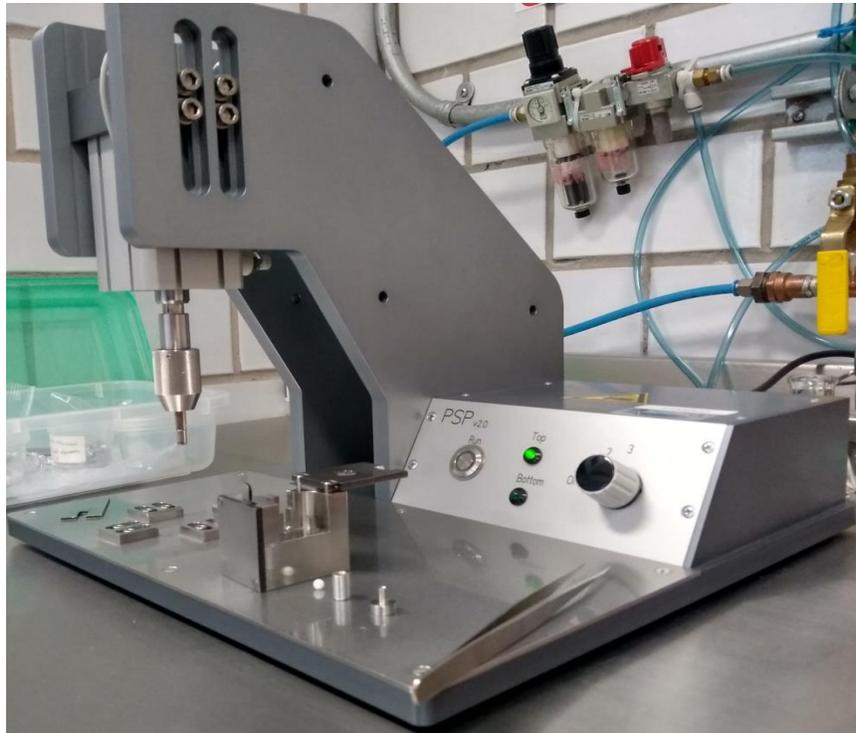


Figura 5. Prensa, cátodo de aluminio y utensilios necesarios para prensar la muestra. Foto: D. Belmont.

2.4 Laboratorio de Radiaciones.

En el laboratorio del taller de radiaciones de la Facultad de Ciencias de la UNAM, se cuenta con un equipo sofisticado el cual consiste en un detector de germanio hiperpuro el cual se encuentra dentro de una cámara de blindaje de plomo de aproximadamente 15 cm.

Para el correcto funcionamiento del detector se utiliza nitrógeno líquido que se deposita en el contenedor ubicado debajo del detector. A su vez se cuenta con un módulo de monitoreo para verificar que el detector se encuentre en la temperatura óptima. La señal del detector se envía a un amplificador que posteriormente se conectara a un convertidor de señal analógica a digital ADC que por medio de un puerto USB se conecta a una laptop donde una aplicación *USX Spectrum Techniques* inicia la adquisición de datos.



Figura 6. Dispositivo experimental para la caracterización por espectroscopía gamma. Foto: D. Belmont.

3. Experimento.

En el caso de las barras de control de grafito las muestras se tomaron directamente del grafito irradiado raspando uno de sus extremos fuera del laboratorio para evitar contaminar el equipo [24]. Debido al contenido del isótopo radioactivo no fue posible pesarlo con la balanza, por lo que únicamente se rellenó el cátodo en cuyo volumen se pueden tener masas de 3 mg a 5 mg. De igual modo, se tuvo que usar una prensa manual en donde la presión usada para eliminar cualquier burbuja de aire fue de 69 bar.



Figura 7. Prensa manual usada para comprimir los cátodos con muestras radioactivas. Foto: D. Belmont.

Se tomaron 3 muestras de la barra de carbón con etiqueta TRIGA 1, TRIGA 2 y TRIGA 3 además se prepararon dos muestras de OXA STD II, un cátodo con grafito y otro con ácido ftálico el cual es un compuesto inorgánico que contiene poca o nula presencia de ^{14}C (blanco). Estos últimos cátodos se adicionaron únicamente para comparar la concentración relativa de ^{14}C de una muestra de grafito sin irradiar, y otra con ausencia de ^{14}C .

Después cada cátodo TRIGA I, II y III, los de referencia y los blancos se colocaron en portacátodos y se montaron en el carrusel. Una vez realizada esta acción se procedió a hacer vacío de 1×10^{-7} bares, posteriormente se enciende la fuente de iones. Debido a la alta concentración de ^{14}C observada, fue necesario cerrar las rejillas a la salida de la fuente de iones dejando una apertura de únicamente 4 mm^2 . Adicionalmente se redujo la temperatura del horno de Cesio de su nominal 100 C a sólo 50 C . El resto de los parámetros de operación de la fuente SNICS se mantuvieron con sus valores rutinarios.

Se adquirieron un total de 50 datos por cátodo. Posteriormente se realizaron 2 medidas una con la fuente funcionando en condiciones normales a 100 C , pero con las rejillas cerradas y la segunda en las condiciones normales de operación del LEMA [41].

Para el caso de la espectroscopía gama se usaron 60 l de nitrógeno líquido aproximadamente, primero se tomó un espectro de una fuente radioactiva conocida de unos cuantos minutos para calibrar en energía los espectros a adquirir.

Posteriormente se tomó un espectro de fondo durante varios días previo a la muestra de grafito que se colocó para tomar un espectro de 8 horas aproximadamente, se verificó que el fragmento de la barra de control se encontrara con la cara más activa de frente al detector [29].

4. Análisis de Datos y Resultados.

Los datos brutos de las muestras ingresadas en LEMA se encuentran en el apartado de anexos, en esta sección se muestran los promedios de estos y su análisis.

4.1 Datos Obtenidos en el LEMA.

Para cada cátodo se tomaron 10 medidas y se realizaron 5 corridas. Los promedios de cada corrida se muestran en la tabla 2 donde se exhibe el cociente $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ en cada caso.

Tabla 2. Promedios obtenidos de los cátodos de interés en LEMA.

OXA STD IIa	PA BL	TRIGA I	TRIGA II	TRIGA III	OXA STD IIb	Grafito Natural
4.96E-12	7.72E-12	1.19E-08	2.69E-08	1.71E-08	5.93E-12	8.27E-13
5.25E-12	8.04E-12	1.25E-08	1.38E-08	1.74E-08	7.53E-12	5.18E-13
4.66E-12	6.35E-12	1.27E-08	1.03E-08	1.77E-08	8.34E-12	4.95E-12
4.95E-12	6.61E-12	1.27E-08	9.05E-09	1.79E-08	8.38E-12	9.80E-13
4.51E-12	8.33E-12	1.31E-08	8.47E-09	1.82E-08	8.47E-12	7.85E-13

Se ha etiquetado el cátodo de ácido oxálico con la minúscula a y b para diferenciar al que entró antes de la medición de los cátodos radioactivos del que entró después. Cabe destacar que el cátodo con etiqueta TRIGA II presenta un comportamiento distinto pues su concentración disminuye conforme al tiempo, por lo que se tratará por separado.

Con los datos de la tabla 2 se procedió a obtener su promedio usando la siguiente ecuación [42].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1)$$

Usando la ecuación anterior, se calculó el error absoluto para cada muestra de la tabla 2, de los 5 errores obtenidos se reporta el más grande de ellos, el cálculo se efectuó de la siguiente manera:

$$e_{abs} = \text{máx}|\bar{x} - x_i|, \quad (4.2)$$

Además, con el fin de comparar el error absoluto con la muestra medida se usó el error relativo expresado en porcentaje [43]:

$$e_{rel} = \frac{e_{abs}}{\bar{x}} * 100\%. \quad (4.3)$$

Los resultados obtenidos se expresan en la siguiente tabla:

Tabla 3. Error asociado a cada medición de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Cátodo	Error Absoluto	Error Relativo
OXA STD IIa	3.98278E-13	8%
PA BL	1.05864E-12	14%
TRIGA I	7.07398E-10	6%
TRIGA II	--	--
TRIGA III	5.43316E-10	3%
OXA STD IIb	1.80865E-12	23%
Grafito Natural	8.08128E-13	112%

El error absoluto encontrado se le asigna a cada medida realizada, a continuación, se muestran las gráficas correspondientes al cátodo con etiqueta TRIGA I, TRIGA III por ser éstas de interés y OXA STD IIb por tener el error absoluto más grande.

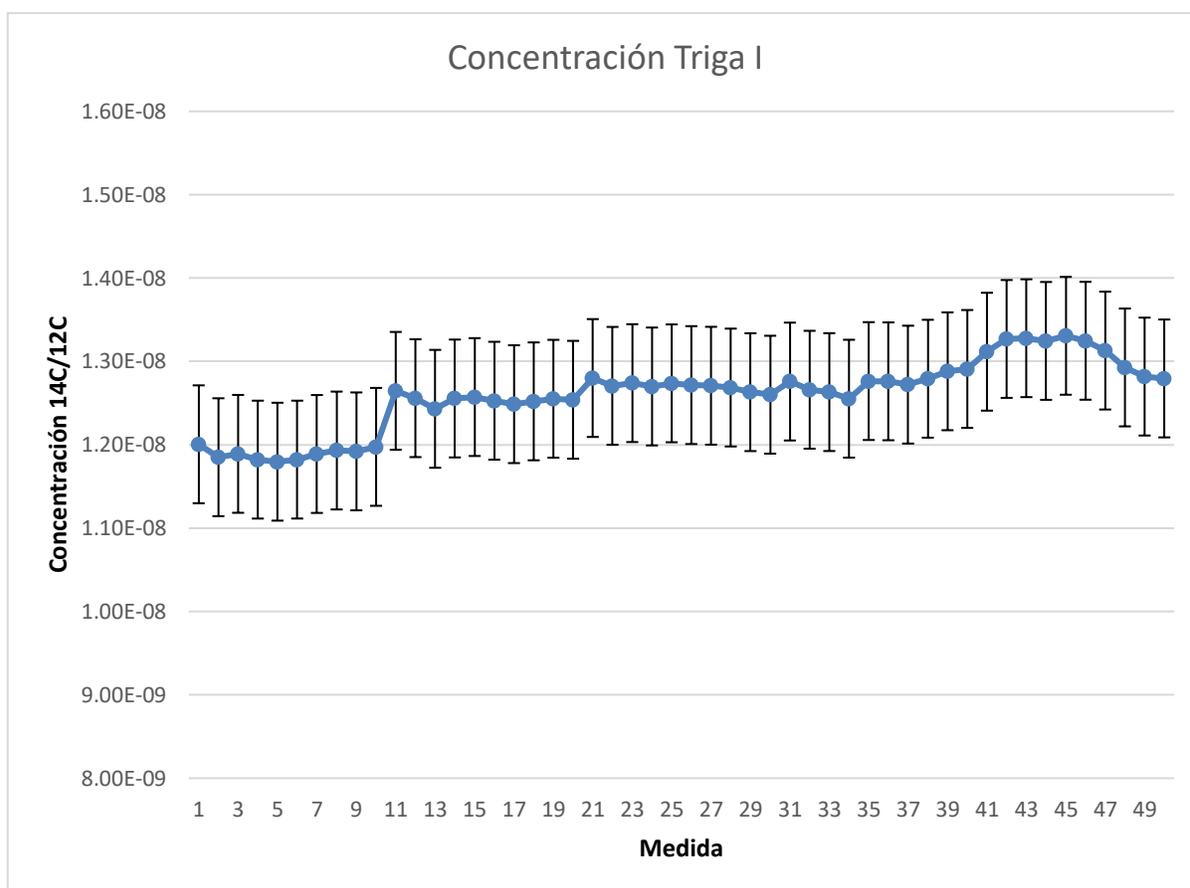


Figura 8. Gráfica de concentración medida en LEMA para el cátodo TRIGA I.

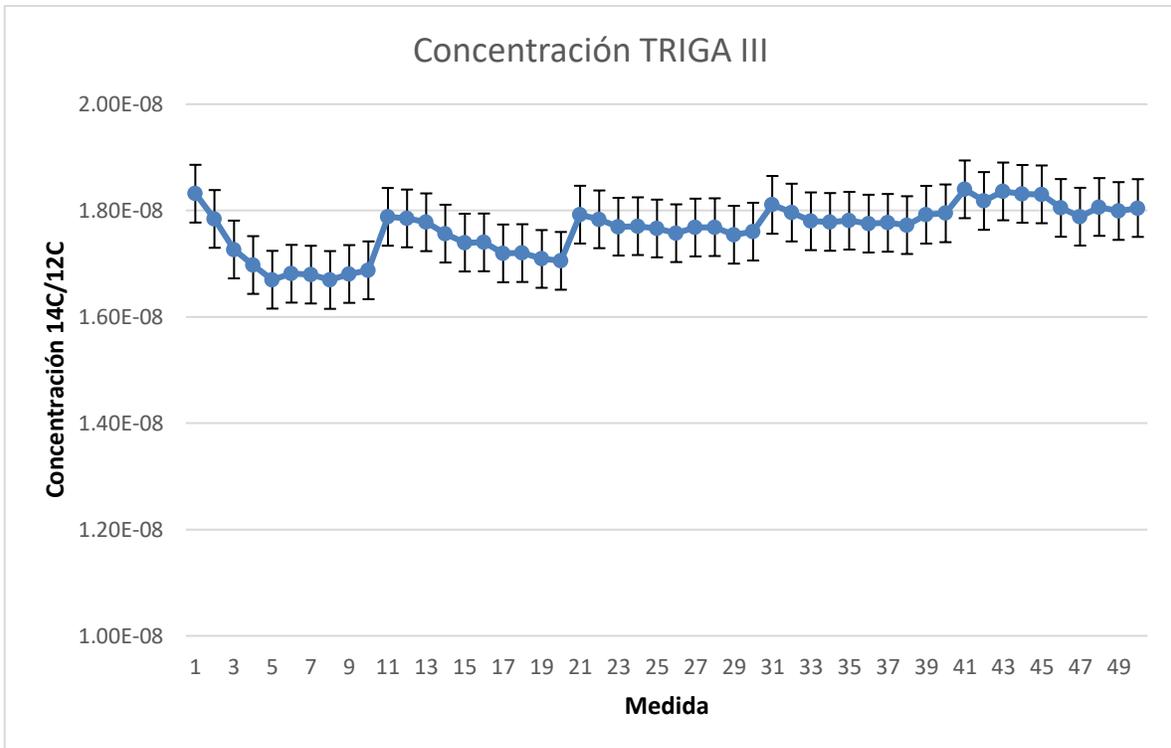


Figura 9. Gráfica de concentración medida en LEMA para el cátodo TRIGA III.

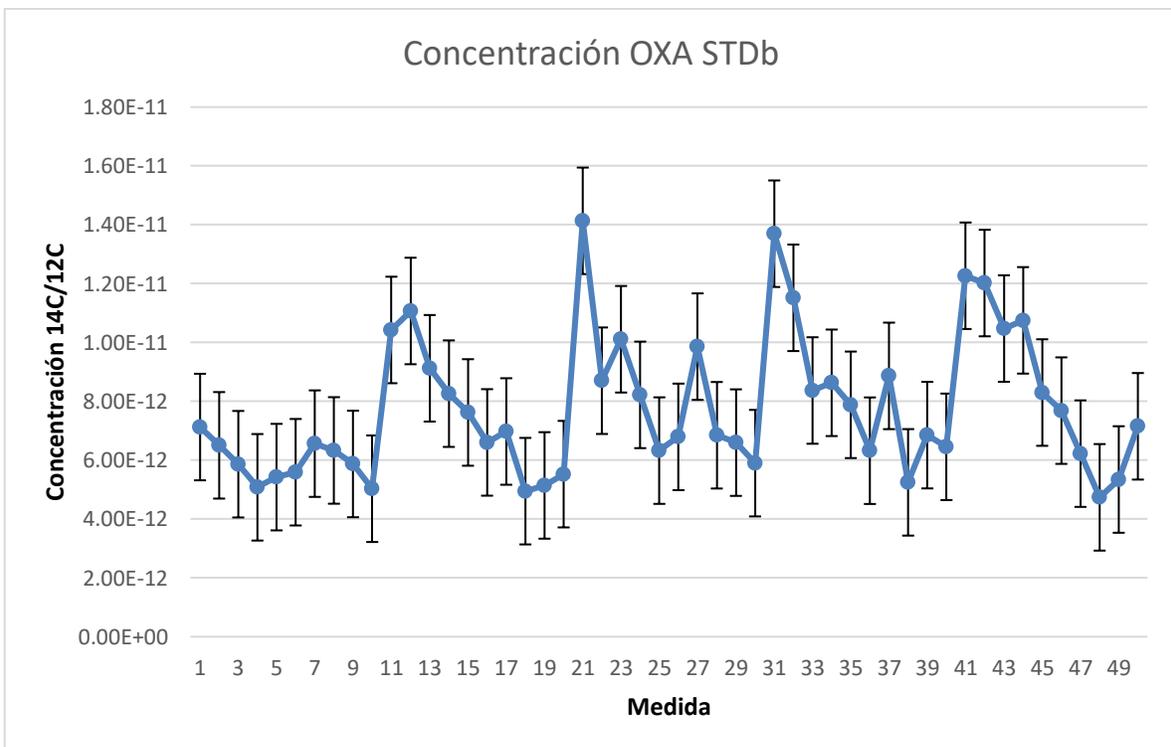


Figura 10. Gráfica de concentración medida en LEMA para el cátodo OXA STD IIB.

A continuación se inició una nueva corrida de medidas del ácido oxálico estándar II, ácido ftálico, y grafito natural con la finalidad de observar si existe algún crecimiento en el número de cuentas de ^{14}C a raíz de alguna posible contaminación del instrumento, esta medida se realizó bajo las mismas condiciones que las anteriores con la diferencia que la fuente de cesio se ajustó a 100 C. Nuevamente se tomó el promedio de 10 medidas, se muestra en la siguiente tabla los valores del ácido oxálico por ser una muestra estándar.

Tabla 4. Valores de referencia estándar $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ después de usar los cátodos radioactivos y con rejilla cerrada.

Medida	OXA STD II
1	1.49e-12
2	1.52e-12
3	1.51e-12
4	1.55e-12
5	1.46e-12
6	1.51e-12
7	1.42e-12
8	1.51e-12
9	1.40e-12
10	1.46e-12
11	1.36e-12
12	1.44e-12

De manera similar se calculó el error absoluto, y se le asignó el máximo a cada uno de los promedios, siendo este $1.11 \cdot 10^{-13}$ y se muestra en la siguiente gráfica.

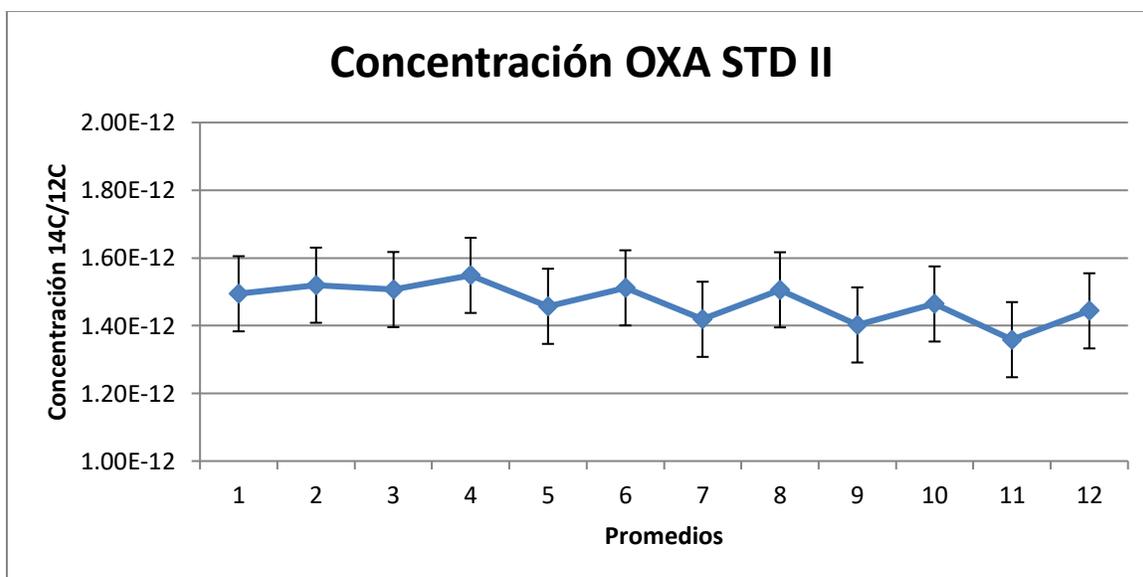


Figura 11. Gráfica de promedios de concentración medida en LEMA para el cátodo OXA STD II.

Posterior a esta medida se realizó una tercera con la diferencia de que las rejillas que habían sido cerradas para evitar la saturación del sistema ahora se abren y se repitió el mismo proceso, obteniendo los siguientes datos para la referencia estándar de ácido oxálico.

Tabla 5. Datos obtenidos para la referencia estándar de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ con rejillas abiertas.

Medida	OXA STD II
1	1.65e-12
2	1.69e-12
3	1.60e-12
4	1.67e-12
5	1.62e-12
6	1.64e-12
7	1.61e-12
8	1.66e-12
9	1.62e-12
10	1.68e-12
11	1.63e-12
12	1.70e-12

Se realizó un análisis semejante a los anteriores con error absoluto máximo de $5.1 \cdot 10^{-14}$ el cual se le asignó a cada promedio obteniéndose la siguiente gráfica. El error relativo es de 3%.

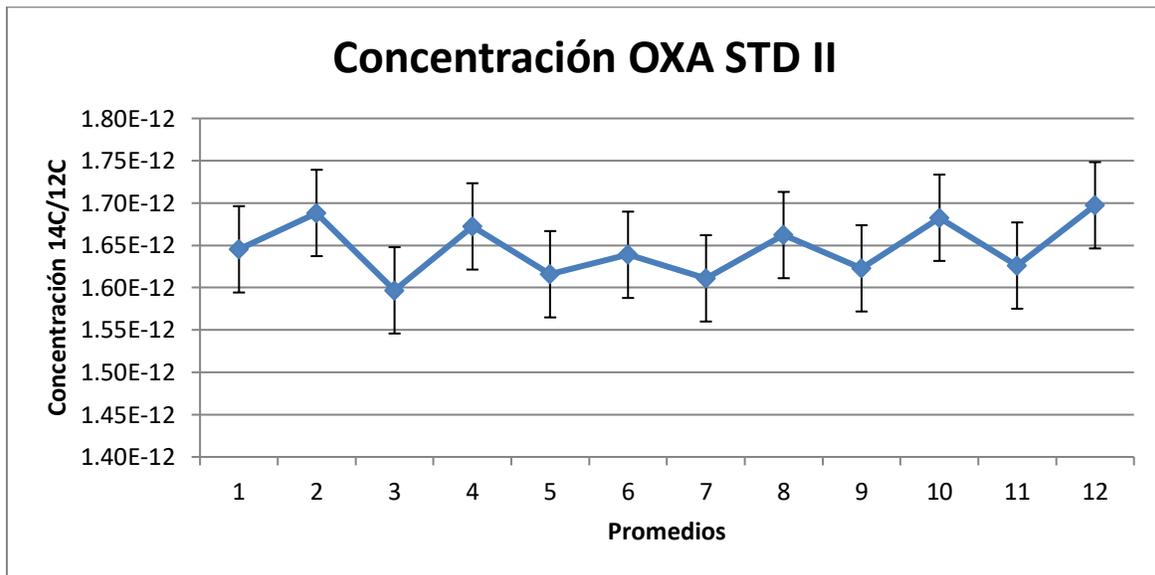


Figura 12. Gráfica de promedios de concentración medida en LEMA para el cátodo OXA STD II.

Por otra parte, se analizó la causa del incremento de ^{14}C en las barras de grafito, siendo la reacción más favorable la siguiente:



A consecuencia de la ecuación 4 y debido a que el flujo de neutrones es consecuencia del uso del reactor, se calculó el tiempo necesario para lograr la concentración encontrada usando un resultado experimental previo [44] y considerando que el reactor se encuentra en 1 MW de potencia se realizó la siguiente operación:

$$20 \text{ años} \left(\frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \right) \left(\frac{10^{-11}}{10 \text{ h}} \right) \left(\frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right) = 1.752 \times 10^{-7} \quad (4.5)$$

Se midió una concentración del orden $\sim 10^{-08}$ mientras que el cálculo de la ecuación 4.5 muestra un orden de magnitud mayor. Esta discrepancia en los datos se debe a que el reactor funciona únicamente 6 horas de las 24 del día, debido a que sólo opera en horas hábiles y bajo supervisión. En adición el reactor nuclear opera exclusivamente en días hábiles y no siempre al máximo de potencia de 1MW.

Considerando los factores anteriormente mencionados se tiene un factor de corrección de 0.25 por las horas y 0.693 por los días hábiles teniendo en cuenta que hay 253 días hábiles en 1 año.

$$1.752 \times 10^{-7} (0.250)(0.693) = 3.03534 \times 10^{-08} \quad (4.6)$$

Con la ecuación 4.6 se tiene el mismo orden de magnitud que los medidos en las barras de grafitos usando el método de espectrometría de masas, no obstante, se sigue considerando que la potencia es constante e igual a 1 MW.

Ahora bien, se compara el resultado de la ecuación 4.6, con los valores promedio de las muestras medidas en LEMA a través del error relativo expresado en porcentaje y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 6. Comparación de valor teórico calculado con promedio de los obtenidos experimentalmente para cada cátodo.

Muestra	Promedio	Valor Teórico	Error Relativo
TRIGA I	1.26E-08	3.03e-08	58.41%
TRIGA III	1.77E-08		41.58%

Con la comparación mostrada en la tabla 6 observamos que las discrepancias son semejantes, lo que sugiere que están relacionadas con la potencia del reactor nuclear que no se encuentra en máxima potencia en todo momento.

Por último, determinaremos los órdenes de magnitud que están por encima de la concentración de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ de una muestra de grafito sin irradiar en las mismas condiciones, por lo que se usó el promedio de medidas mostradas en la tabla 2 del cátodo con etiqueta de grafito natural siendo este valor $7.21 \times 10^{-13} \text{ }^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$. Esta comparación se realiza a través de un cociente generándose la siguiente tabla:

Tabla 7. Resultado del cociente de muestras de barra de control del reactor entre un grafito sin irradiar.

Muestra	TRIGA I	TRIGA III
Orden de Magnitud	1.75E04	2.45E04

En la tabla 7 se muestran los valores excedentes de ^{14}C en cada muestra de una barra de control del reactor nuclear TRIGA Mark III respecto al grafito.

4.2 Datos Obtenidos en el Laboratorio de Radiaciones.

El espectro de fondo medido durante 72 horas muestra la excelente reducción de fondo obtenida con el blindaje.

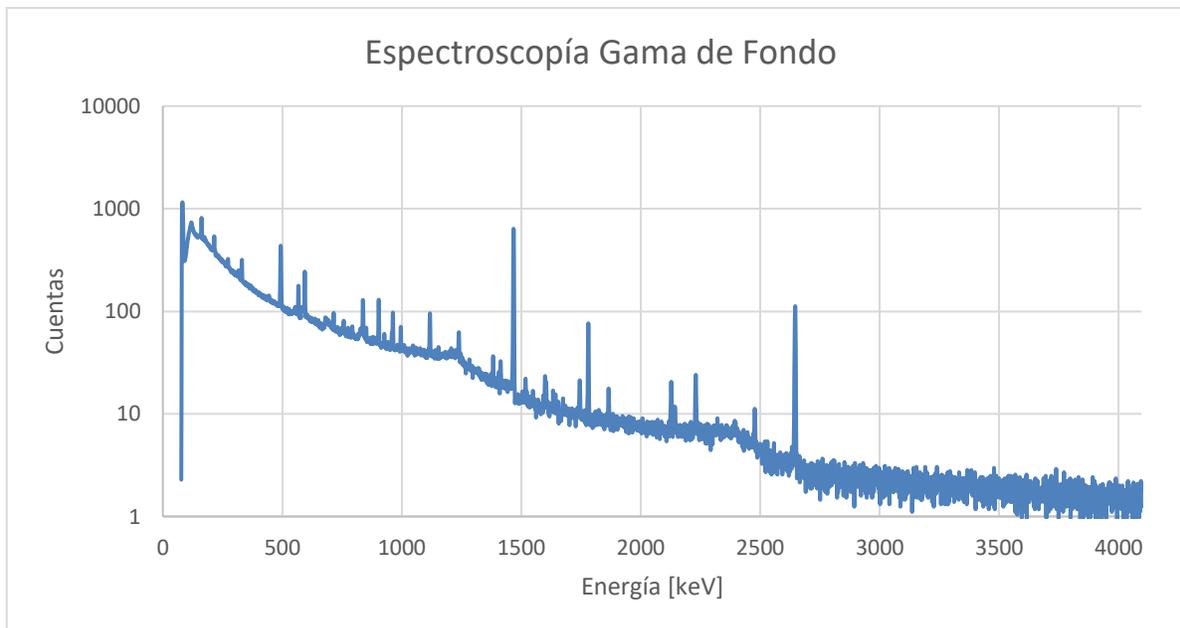


Figura 13. Espectroscopía gama de fondo.

Primero se tomó un espectro de gamas de una fuente conocida llamada Marinelli que contiene ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{123}Te , ^{51}Cr , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co e ^{88}Y , donde pudieron ser identificados los picos asociados a las gamas provenientes de ^{137}Cs y ^{60}Co , por lo que se obtuvo el centroide de dichos picos usando el programa USX de *Spectrum Techniques*.

Posteriormente a cada centroide (canal) se le asoció la energía de emisión gama y se calibró a través de un ajuste lineal.

Tabla 8. Datos usados en calibración para el espectro de gamas.

Centroide	Energía [keV]	Isótopo
645	661.66	^{137}Cs
1169	1173.23	^{60}Co
1332	1332.49	^{60}Co

Usando la calibración anterior se analizó el espectro de gamas producido por el grafito irradiado en el reactor nuclear, asociando a cada gama un elemento de origen, así como la energía de emisión gama reportada [45]. El espectro se tomó durante 31,082 s.

Espectroscopía Gamma de Grafito Irradiado

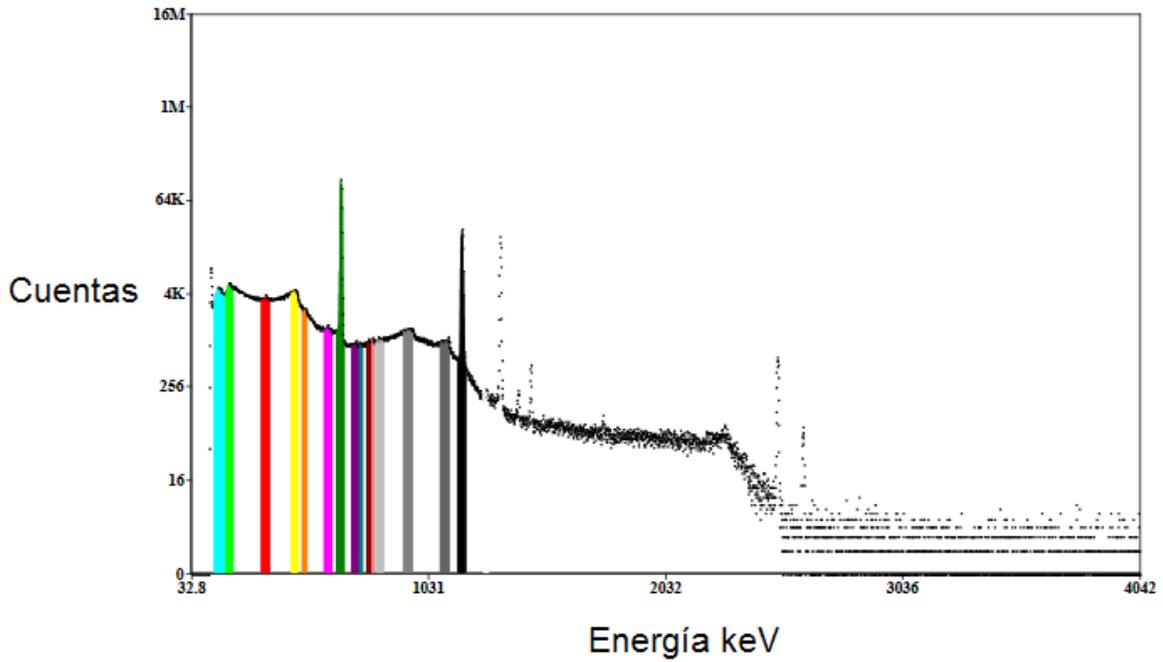


Figura 14. Espectro gama con 15 picos identificados.

Espectroscopía Gamma de Grafito Irradiado

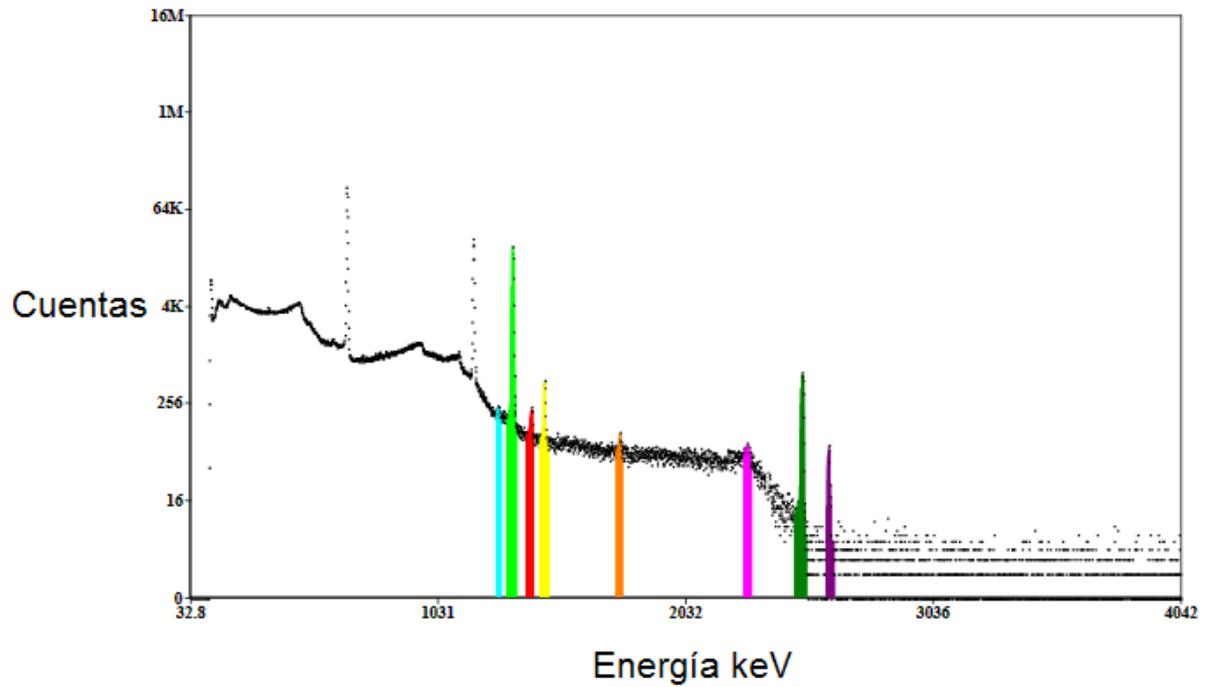


Figura 15. Espectro gama con 8 picos identificados.

Tabla 9. Isótopos asociados a cada gama en los picos identificados en las figuras 13 y 14.

Energía [keV]	Isótopo	Energía Reportada [keV]	Origen
149.80	²³⁵ U	143.76	Primordial
191.33	²²⁶ Ra	186.21	Serie ²³⁸ U
343.73	²²⁸ Ac	338.32	Serie ²³² Th
465.58	²²⁸ Ac	463.00	Serie ²³² Th
507.08	²⁰⁸ Tl	510.70	Serie ²³² Th
606.03	²¹⁴ Bi	609.31	Serie ²³⁸ U (²²⁶ Ra)
661.304	¹³⁷ Cs	661.66	Fisión
721.21	²²⁸ Ac	726.86	Serie ²³² Th
746.068	²²⁸ Ac	755.31	Serie ²³² Th
781.58	²²⁸ Ac	794.95	Serie ²³² Th
796.29	²⁰⁶ Pb	803.06	Serie ²³⁸ U (²²⁶ Ra)
823.72	²¹¹ Pb	832.01	Serie ²³⁵ U
942.93	²¹⁴ Bi	934.06	Serie ²³⁸ U (²²⁶ Ra)
1098.12	¹¹⁶ In	1097.30	Activación
1171.96	⁶⁰ Co	1173.23	Activación
1275.67	¹¹⁶ In	1293.54	Activación
1331.50	⁶⁰ Co	1332.49	Activación
1402.96	²¹⁴ Bi	1407.98	Serie ²³⁸ U (²²⁶ Ra)
1459.78	²²⁸ Ac	1459.14	Serie ²³² Th
1763.70	²¹⁴ Bi	1764.49	Serie ²³⁸ U (²²⁶ Ra)
2282.71	--	--	Efecto Suma ²²⁸ Ac (?)
2502.93	--	--	Efecto Suma ⁶⁰ Co
2612.73	²⁰⁸ Tl	2614.51	Serie ²³² Th, ²⁰⁸ Pb(n,p)

En la tabla 9, cabe destacar el pico al cual si bien se tiene bien definido se observa debido al efecto suma de los picos de ⁶⁰Co, esto es el detector cuenta un único evento de gamas sin embargo suma las energías de estos.

En la misma figura se encuentra otro pico de una gama de 2282.71 keV que no pudo compararse con la literatura debido a que no se encuentra publicada [46], por lo que se infiere que es el efecto suma de los 3 picos del ²²⁸Ac esto es para la energía de 721.21, 746.068 y 781.58 keV.

5. Conclusiones.

- Se logró medir la concentración de ^{14}C a partir del cociente $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ presente en un fragmento de una barra de control del reactor nuclear TRIGA Mark III.
- Con base en una referencia de grafito sin irradiar se determinó que las muestras se encuentran $\sim 10^4$ órdenes de magnitud por encima de la concentración normal, del cociente $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.
- Se concluyó que para llegar a las concentraciones de ^{14}C de la barra de grafito es necesario tener el reactor funcionando ininterrumpidamente a potencia de 1MW durante varios años.
- Se demostró que se puede trabajar con ^{14}C sin efectos perjudiciales para medidas posteriores en el LEMA.
- Debido al excedente de ^{14}C presente en la barra de grafito se infiere que se encontraba contaminada con ^{14}N .
- Se demostró que la barra de grafito presenta contaminantes como ^{235}U , ^{228}Ac , ^{226}Ra , ^{214}Bi , ^{208}Tl , $^{206, 211}\text{Pb}$, ^{116}In , ^{137}Cs , y ^{60}Co coincidiendo con diversas publicaciones.
- La barra de control presenta contaminantes que se encuentran en equilibrio secular provenientes del núcleo del reactor.

6. Bibliografía.

- [1] González Romero, Enrique M., (2010). *Energía Nuclear*. Madrid: Los libros de la catarata.
- [2] Kuhn, Thomas S., (1996). *La Revolución Copernicana; la astronomía planetaria en el desarrollo del pensamiento occidental*. Barcelona: Ariel.
- [3] Hobson, Art, (1995). *Physics: Concepts and Connections*. Prentice-Hall, New Jersey.
- [4] Wendell, H., (Ed). (1982). *Química General*. México D.F., México: Editorial Limusa.
- [5] Thomson, J. J. XL. Cathode Rays. *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.* (1897). doi:10.1080/14786449708621070
- [6] Millikan, R. A. On the elementary electrical charge and the avogadro constant. *Phys. Rev.* (1913). doi:10.1103/PhysRev.2.109
- [7] Born, M., (1957). *Atomic Physics*. Blackie and Son, Londres.
- [8] Richtmyer, F. K., (Ed). (1955). *Introduction to Modern Physics*. New York, McGraw-Hill Book Co.
- [9] Resnick, R., Halliday, D. (1992) *Basic Concepts in Relativity and Early Quantum Theory*. 2nd ed. Macmillan Publishing: New York.
- [10] Greenstein, G., Zajonc, A. (2005). *The Quantum Challenge*. 2nd ed. Jones and Bartlett Publishers: Sudbury MA.
- [11] Rodríguez-Meza, M. & Cervantes Cota, J. El efecto fotoeléctrico. *Ciencia. ergo-sum*, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva (2006).
- [12] Eisberg, M., (1992). *Fundamentos de Física Moderna*. México D.F., México: Editorial Limusa.
- [13] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. *Fundamentals of Physics*, 7th ed. Wiley & Sons: New York, 2004.
- [14] Segré, E. *From X-rays to Quarks: Modern Physicists and Their Discoveries*. W. H. Freeman: New York, 1980.
- [15] Gamow, G. *Thirty Years That Shook Physics: The Story of Quantum Theory*. Dover Publications: Mineola, NY, 1985.
- [16] McQuarrie A., *Quantum Chemistry*. 2nd ed. University Science Books: Sausalito, CA. 2008.
- [17] Levitah C. Mapatac, *Quantum Chemistry*. Delve Publishing LLC: New York. 2017.
- [18] Rutherford, E. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.* (1911). doi:10.1080/14786440508637080.
- [19] Rutherford, E. Collision of particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen. *Philos. Mag.* (2010). doi:10.1080/14786431003659230
- [20] Bertulani, C. A., (2007). *Nuclear Physics in a Nutshell*. United Kingdom: Princeton University Press.
- [21] Chadwick, J. The Existence of a Neutron. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* (1932). doi:10.1098/rspa.1932.0112

- [22] Price, P. B. (1989). Heavy-particle radioactivity ($A > 4$). *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 39(1), 19-42.
- [23] Bateman, H. The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations. *Proc. Camb. Phil. Soc.* 15:423–427 (1910).
- [24] Knoll, G. F., 2000. *Radiation Detection and Measurement*. Third edit., Michigan: John Wiley and Sons Inc.
- [25] Rangacharyulu, C., 2014. *Physics of Nuclear Radiations Concepts, Techniques and Applications*. Taylor & Francis Group. FL, USA.
- [26] W. Bygrave, P. Treado y J. Lambert, *Accelerator Nuclear Physics*. High Voltage Engineering Corporation: Massachusetts, USA. (1970).
- [27] Li, J., Dunzik-Gouga, M. Lou & Wang, J. Recent advances in the treatment of irradiated graphite: A review. *Annals of Nuclear Energy* (2017). doi:10.1016/j.anucene.2017.06.040
- [28] Fachinger, J., von Lensa, W. & Podruhzina, T. Decontamination of nuclear graphite. *Nucl. Eng. Des.* (2008). doi:10.1016/j.nucengdes.2008.02.010
- [29] Labrier, D. & Dunzik-Gougar, M. Lou. Characterization of ^{14}C in neutron irradiated NBG-25 nuclear graphite. *J. Nucl. Mater.* (2014). doi:10.1016/j.jnucmat.2014.01.041
- [30] www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/299375/Zenit_de_la_ciencia_nuclear_en_Mexico.pdf
- [31] <http://inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/51%20INSTALACIONES.pdf>
- [32] Middleton, R., 1989. *A Negative-Ion Cookbook*, Philadelphia: Department of Physics, University of Pennsylvania.
- [33] Middleton, R. A versatile high intensity negative ion source. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res.* (1983). doi:10.1016/0167-5087(83)90580-X
- [34] Vogel, J. S. Neutral resonant ionization in the high-intensity cesium sputter source. in *AIP Conference Proceedings* (2013). doi:10.1063/1.4792774
- [35] Solís, C. *et al.* A new AMS facility in Mexico. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* (2014). doi:10.1016/j.nimb.2014.02.015.
- [36] Cockcroft, J. D. & Walton, E. T. S. Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* (1932). doi:10.1098/rspa.1932.0107.
- [37] Suter, M. A new generation of small facilities for accelerator mass spectrometry. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* (1998). doi:10.1016/S0168-583X(97)00945-2
- [38] Khechen, W. & Laghari, J. R. Breakdown Studies of SF₆/Argon Gas Mixtures. *IEEE Trans. Electr. Insul.* (1989). doi:10.1109/14.46348.
- [39] Vogel, J. S., Giacomo, J. A. & Dueker, S. R. Quantifying absolute carbon isotope ratios by AMS. in *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* (2013). doi:10.1016/j.nimb.2012.03.033.

- [40] Wacker, L., Němec, M. & Bourquin, J. A revolutionary graphitisation system: Fully automated, compact and simple. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* (2010). doi:10.1016/j.nimb.2009.10.067.
- [41] Klein, M., Gott dang, A. & Mous, D. J. W. High-Current ^{14}C Measurements on an HVE 1MV AMS System. *Radiocarbon* (2013). doi:10.1017/s0033822200057325
- [42] Estadística Descriptiva. Rincón Luis. Las prensas de Ciencias. Facultad de Ciencias UNAM. Agosto 2017. 1ª Edición. PP: 24-46.
- [43] Valencia M. (2012). *Incertidumbre y Tratamiento de Datos Experimentales*. Departamento de Publicaciones Universidad Santo Tomas. Bogotá, Colombia.
- [44] García Ramírez, J., 2017. *Medidas de Sección Eficaz para las Reacciones Nucleares $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ y $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ Utilizando la Técnica de Espectrometría de Masas con Aceleradores*. Tesis de Maestría. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [45] *Practical Gamma-ray Spectrometry – 2nd Edition*, Gordon R. Gilmore, (2008), John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7.
- [46] *Table of Isotopes: 1999 Update – 8th Edition*, Richard B. Firestone, (1999), S. Y. Frank Chu (CD-ROM Editor), ISBN: 978-0-471-35633-2.

7. Anexo.

A continuación, se muestran diversas tablas cada una contiene los datos de cada una de las 5 corridas con sus respectivas 10 medidas para cada cátodo, es decir la concentración de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ se midió 10 veces para el primer cátodo posteriormente se cambió al siguiente cátodo al que nuevamente se le midió la concentración $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 10 veces y así sucesivamente. Al llegar nuevamente al primer cátodo se inicia una nueva corrida, o en este caso una nueva tabla.

Tabla 10. Primera corrida de datos, se muestran los valores de concentración $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Medida	OXA STDa	PA BL	TRIGA I	TRIGA II	TRIGA III	OXA STDb	Grafito Natural
1	4.45E-12	1.09E-11	1.20E-08	4.47E-08	1.83E-08	7.13E-12	0.00E+00
2	4.80E-12	9.19E-12	1.19E-08	3.42E-08	1.78E-08	6.50E-12	8.12E-13
3	6.31E-12	8.19E-12	1.19E-08	2.98E-08	1.73E-08	5.86E-12	7.94E-13
4	5.58E-12	9.30E-12	1.18E-08	2.68E-08	1.70E-08	5.08E-12	0.00E+00
5	5.91E-12	6.21E-12	1.18E-08	2.50E-08	1.67E-08	5.42E-12	1.10E-12
6	5.05E-12	7.62E-12	1.18E-08	2.36E-08	1.68E-08	5.59E-12	1.42E-12
7	5.33E-12	5.68E-12	1.19E-08	2.29E-08	1.68E-08	6.56E-12	1.37E-12
8	4.10E-12	7.95E-12	1.19E-08	2.22E-08	1.67E-08	6.33E-12	6.60E-13
9	3.74E-12	5.42E-12	1.19E-08	2.14E-08	1.68E-08	5.87E-12	6.50E-13
10	4.25E-12	6.90E-12	1.20E-08	2.03E-08	1.69E-08	5.03E-12	1.28E-12

Tabla 11. Segunda corrida de datos, se muestran los valores de concentración $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Medida	OXA STDa	PA BL	TRIGA I	TRIGA II	TRIGA III	OXA STDb	Grafito Natural
1	7.33E-12	7.65E-12	1.26E-08	2.14E-08	1.79E-08	1.04E-11	5.54E-13
2	4.66E-12	9.14E-12	1.26E-08	1.67E-08	1.79E-08	1.11E-11	8.66E-13
3	6.99E-12	1.08E-11	1.24E-08	1.50E-08	1.78E-08	9.12E-12	1.50E-12
4	4.27E-12	7.26E-12	1.26E-08	1.39E-08	1.76E-08	8.26E-12	0.00E+00
5	7.23E-12	7.57E-12	1.26E-08	1.32E-08	1.74E-08	7.62E-12	3.11E-13
6	4.27E-12	8.32E-12	1.25E-08	1.27E-08	1.74E-08	6.60E-12	0.00E+00
7	2.79E-12	7.15E-12	1.25E-08	1.22E-08	1.72E-08	6.97E-12	6.31E-13
8	6.69E-12	4.53E-12	1.25E-08	1.20E-08	1.72E-08	4.95E-12	6.31E-13
9	4.46E-12	9.73E-12	1.26E-08	1.17E-08	1.71E-08	5.14E-12	3.14E-13
10	4.09E-12	8.26E-12	1.25E-08	1.13E-08	1.71E-08	5.52E-12	3.11E-13

Tabla 12. Tercera corrida de datos, se muestran los valores de concentración $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Medida	OXA STDa	PA BL	TRIGA I	TRIGA II	TRIGA III	OXA STDb	Grafito Natural
1	4.58E-12	7.24E-12	1.28E-08	1.09E-08	1.79E-08	1.41E-11	2.77E-13
2	6.43E-12	8.57E-12	1.27E-08	1.08E-08	1.78E-08	8.70E-12	5.57E-13
3	6.24E-12	5.68E-12	1.27E-08	1.06E-08	1.77E-08	1.01E-11	8.45E-13
4	6.33E-12	6.90E-12	1.27E-08	1.04E-08	1.77E-08	8.22E-12	0.00E+00
5	4.01E-12	4.73E-12	1.27E-08	1.03E-08	1.77E-08	6.32E-12	1.15E-12
6	2.86E-12	7.75E-12	1.27E-08	1.02E-08	1.76E-08	6.79E-12	2.90E-13
7	4.31E-12	6.47E-12	1.27E-08	1.01E-08	1.77E-08	9.86E-12	8.85E-13
8	4.87E-12	3.86E-12	1.27E-08	9.92E-09	1.77E-08	6.85E-12	3.01E-13
9	3.61E-12	7.77E-12	1.26E-08	9.84E-09	1.75E-08	6.60E-12	6.09E-13
10	3.65E-12	4.74E-12	1.26E-08	9.73E-09	1.76E-08	5.90E-12	3.05E-13

Tabla 13. Cuarta corrida de datos, se muestran los valores de concentración $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Medida	OXA STDa	PA BL	TRIGA I	TRIGA II	TRIGA III	OXA STDb	Grafito Natural
1	4.34E-12	8.99E-12	1.28E-08	9.55E-09	1.81E-08	1.37E-11	1.12E-12
2	6.26E-12	8.83E-12	1.27E-08	9.34E-09	1.80E-08	1.15E-11	1.12E-12
3	6.08E-12	9.87E-12	1.26E-08	9.24E-09	1.78E-08	8.37E-12	8.51E-13
4	5.71E-12	4.14E-12	1.26E-08	9.17E-09	1.78E-08	8.63E-12	1.15E-12
5	4.61E-12	4.59E-12	1.28E-08	9.10E-09	1.78E-08	7.88E-12	8.72E-13
6	5.06E-12	4.16E-12	1.28E-08	9.02E-09	1.78E-08	6.32E-12	1.17E-12
7	6.25E-12	5.64E-12	1.27E-08	8.97E-09	1.78E-08	8.86E-12	8.78E-13
8	2.98E-12	7.57E-12	1.28E-08	8.79E-09	1.77E-08	5.25E-12	1.47E-12
9	4.18E-12	7.60E-12	1.29E-08	8.66E-09	1.79E-08	6.85E-12	5.82E-13
10	4.17E-12	5.22E-12	1.29E-08	8.70E-09	1.79E-08	6.45E-12	5.82E-13

Tabla 14. Quinta corrida de datos, se muestran los valores de concentración $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Medida	OXA STDa	PA BL	TRIGA I	TRIGA II	TRIGA III	OXA STDb	Grafito Natural
1	4.07E-12	8.20E-12	1.31E-08	8.61E-09	1.84E-08	1.23E-11	1.61E-12
2	5.61E-12	7.62E-12	1.33E-08	8.59E-09	1.82E-08	1.20E-11	5.32E-13
3	5.15E-12	1.21E-11	1.33E-08	8.56E-09	1.84E-08	1.05E-11	2.69E-13
4	2.81E-12	8.25E-12	1.32E-08	8.58E-09	1.83E-08	1.08E-11	8.26E-13
5	5.25E-12	6.15E-12	1.33E-08	8.47E-09	1.83E-08	8.30E-12	1.12E-12
6	2.73E-12	9.23E-12	1.32E-08	8.53E-09	1.80E-08	7.68E-12	2.86E-13
7	2.72E-12	7.71E-12	1.31E-08	8.29E-09	1.79E-08	6.22E-12	2.88E-13
8	6.80E-12	7.69E-12	1.29E-08	8.38E-09	1.81E-08	4.74E-12	1.45E-12
9	4.97E-12	8.23E-12	1.28E-08	8.38E-09	1.80E-08	5.34E-12	2.92E-13
10	5.00E-12	8.21E-12	1.28E-08	8.32E-09	1.80E-08	7.15E-12	1.16E-12