



Universidad Pedagógica Experimental Libertador
Instituto Pedagógico de Barquisimeto
Departamento de Ciencias Naturales
Programa de Física



Simulación numérica de la actividad de las fuentes de Cesio 137, Cobalto 60, Estroncio 90 y Talio 204 como la tasa de dosis para las fuentes emisoras de radiación Gamma pertenecientes a la Universidad Pedagógica Experimental Instituto Pedagógico de Barquisimeto.

Autor: Joselin Ortiz

Tutor: José Ceballos

Barquisimeto, Marzo 2012

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, mi esposo e hijo y a mis padres. A Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mi esposo, compañero inseparable de cada jornada, él representó gran esfuerzo y tesón en momentos de decline y cansancio, a mi hijo que es y ha sido mi pilar para el gran esfuerzo de seguir adelante siempre, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento de mi inteligencia y capacidad.

A ellos este proyecto, que sin ellos, no hubiese podido ser.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por haberme guiado por el camino de la felicidad hasta ahora; a mi esposo y tutor José Gregorio Ceballos por su paciencia incondicional y tiempo dedicado a este proyecto.

A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza. Finalmente y no menos importante a las instituciones que colaboraron a la realización del estudio experimental de este proyecto: Universidad Pedagógica Experimental Libertador - Instituto Pedagógico de Barquisimeto (UPEL-IPB) e Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas IVIC.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador
Instituto Pedagógico de Barquisimeto
Departamento de Ciencias Naturales
Programa de Física

Simulación numérica de la actividad de las fuentes de Cesio 137, Cobalto 60, Estroncio 90 y Talio 204 como la tasa de dosis para las fuentes emisoras de radiación Gamma pertenecientes a la Universidad Pedagógica Experimental Instituto Pedagógico de Barquisimeto.

Autor: Joselin Ortiz

Tutor: José Ceballos

RESUMEN

El decaimiento radiactivo se caracteriza por la descomposición espontánea de un núcleo, generando núcleos de menor masa, partículas pequeñas y energía. Los núcleos que experimentan desintegración poseen una razón por sobre o por debajo del cinturón de estabilidad del gráfico "estabilidad isotópica". El fenómeno radiactivo no significa que todos los núcleos de un determinado elemento liberan partículas simultáneamente, sino que es un proceso paulatino, lento o muy rápido, dependiendo del isótopo.

La radiactividad ioniza el medio que atraviesa. Una excepción lo constituye el neutrón, que no posee carga, pero ioniza la materia en forma indirecta. En las desintegraciones radiactivas se tienen varios tipos de radiación: alfa, beta, gamma y neutrones.

Palabras claves: Radioactivo, núcleos, estabilidad isotópica, ionización, radiación alfa, beta y gamma.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la investigación de los fenómenos físicos es necesario contar con una serie de herramientas que nos permitan avanzar en la construcción de nuevos conocimientos. La física Nuclear utiliza una herramienta fundamental para mostrar datos cuantitativos y así darles el formalismo a cada resultado experimental, esta herramienta es la Matemática.

En relación a lo anteriormente expuesto, es posible darle una estructura matemática a todo comportamiento físico que se va a estudiar en este trabajo de investigación, existen sistemas de ecuaciones que nos permiten encontrar incógnitas que satisfagan las condiciones de un fenómeno físico, como es el caso de las ecuaciones diferenciales que son de gran importancia para la física debido a que tienen grandes aplicaciones como lo es el decaimiento radiactivo, Tasa de exposición, Tasa de Dosis Equivalente que será simulado numéricamente haciendo uso de la implementación computacional en MATLAB.

Es importante resaltar que la tasa de dosis equivalente a cuerpo entero se determinará solamente a las fuentes emisoras de radiación Gamma (Co-60 y Cs-137) debido a que las fuentes emisoras de partículas beta (Sr-90 y Tl-204) conlleva a conocer otros conceptos de Física de las radiaciones como lo son Stopping Power, Continuos Slowing Down Approximation o CSDA, Range entre otros y que están fuera del alcance de esta investigación.

El presente trabajo se encuentra dividido en cinco capítulos. En el primero, se plantea la problemática existente y la justificación para llevar a cabo el trabajo; en el segundo, se detalla y explica toda la base teórica que sustenta el fenómeno en estudio; en el tercero, se describe la metodología realizada para cumplir cada uno de los objetivos propuestos; en el cuarto capítulo, se discuten y analizan los resultados obtenidos mediante la metodología aplicada y en el quinto se plantean las conclusiones y recomendaciones alcanzadas.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento del Problema

A lo largo del siglo XX la investigación científica y el desarrollo de la tecnología han estado profundamente vinculados a los fenómenos que ocurren a escala molecular, atómica y subatómica. Para estudiar el comportamiento de la materia a partir de la nano-escala se debe tener en cuenta su naturaleza atómica.

En el mismo orden de ideas Ferreira y Gonzáles (2000), destacan que: “... el rasgo característico de esta época muestra el despliegue de fabulosos avances científicos y tecnológicos en todos los campos del conocimiento y de la producción” (p.189).

Es por ello, que el interés por el estudio de la ciencia ha crecido en los últimos tiempos tanto en países donde el desarrollo científico tecnológico es bajo, como en aquellos en los que es más avanzado en esta materia. Esto es debido a que la tecnología ha dejado de ser parte del discurso de unos pocos académicos, para formar parte de una sociedad. Por tal motivo, la comprensión de los fenómenos naturales requiere de un desarrollo conceptual previo y una gran capacidad de interpretación y desarrollo matemático-numérico

En la misma dirección el campo de la investigación de los fenómenos físicos es necesario contar con una serie de herramientas que nos permitan avanzar en la construcción de nuevos conocimientos. La física Nuclear utiliza una herramienta fundamental para mostrar datos cuantitativos y así darles el formalismo a cada resultado experimental, esta herramienta es los métodos matemáticos y la simulación numérica.

En otra dirección las Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación

(las NBS), Colección Seguridad No 115, OIEA, Viena (1997) especifican los requisitos para la protección de la salud frente a la exposición a la radiación ionizante (en adelante denominada radiación) y para la seguridad de las fuentes de radiación.

Las NBS, que están basadas en la información sobre los efectos perjudiciales atribuidos a la exposición a la radiación aportada por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), así como en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), tienen como finalidad servir de fundamento para la regulación de “las prácticas” y “las intervenciones”. En las NBS se presupone la presencia de infraestructuras nacionales de protección radiológica.

En relación a lo anteriormente expuesto, en la Universidad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico de Barquisimeto existen distintas fuentes radiactivas como Co^{60} ; Cs^{137} ; Sr^{90} y el Tl^{204} , dichas fuentes mencionadas no tiene un control de su decaimiento radiactivo como su tasa de exposición. Por lo tanto el objetivo principal de ésta investigación se basa en llevar un registro de la Actividad de cada fuente y su tasa de dosis equivalente a cuerpo entero a través de la implementación computacional. Cabe destacar que la tasa de dosis se obtendrá solamente para las fuentes emisoras de radiación Gamma.

Objetivo General

- Simular numéricamente la Actividad de las fuentes de Cesio 137, Cobalto 60, Estroncio 90 y Talio 204 como la tasa de dosis para las fuentes emisoras de radiación Gamma pertenecientes a la Universidad Pedagógica Experimental Instituto Pedagógico de Barquisimeto.

Objetivos específicos

- Realizar mediciones con un contador Geiger Müller de las distintas fuentes radiactivas que se encuentran en el Laboratorio de Física Nuclear de la Universi-

dad Pedagógica Experimental Libertador Instituto Pedagógico de Barquisime-
to.

- Simular la actividad de cada una de las fuentes en cada paso del tiempo.
- Simular la tasa de exposición en función de la distancia para la fuentes de Co-60 y Cs-137.
- Comparar mediciones obtenidas a través del contador Geiger Müller de las distintas fuentes con las obtenidas en la implementación computacional.

Justificación

La presente investigación es suma importancia debido a que en el transcurso del tiempo se han presentado accidentes con fuentes radiactivas que conllevan a tener efectos radiológicos en el organismo tales efectos pueden ser estocásticos o determinístico. Entre los accidentes mas resaltantes se puede mencionar lo ocurrido en Goiânia Brasil donde un Instituto de Radioterapia dejo abandonado un equipo de Teleterapia de Cesio 137 sin notificar a la autoridad reguladora, el instituto donde se abandonó el equipo fue demolido parcialmente y dos personas que estaban informadas sobre el abandono de éste, removieron la fuente del cabezal del equipo de radioterapia trasladando el cilindro que contenía la fuente a su hogar e intentaron desmantelarlo provocando la ruptura de la cápsula. Después que la cápsula fue rota, el resto de los componentes del cilindro fueron vendidos y los fragmentos de la fuente del tamaño de un grano de arroz fueron distribuidos entre varias familias, transcurridos cinco días un cierto número de personas demostraron signos y síntomas gastrointestinales a consecuencia de la radiación. Los hechos más notorios de éste accidente fue la cantidad de personas contaminadas (271) entre las cuales 8 eran por síndrome agudo de radiación y 4 casos fatales.

En relación a lo anteriormente expuesto, es necesario llevar un control de las fuentes radiactivas que se encuentran en la UPEL-IPB tanto de su actividad como de su tasa de exposición sabiendo que se estan tratando de fuentes radiactivas de baja actividad. Sin embargo el ICRP en su publicación 103 (2007) destaca: “... los estudios epidemiológicos y experimentales proporcionan evidencia del riesgo de la radiación a dosis de alrededor de 100 *mSv* o menores aunque con incertidumbres” (p.46).

Alcances y Limitaciones

El presente trabajo de investigación tiene como propósito, la simulación numérica de la Actividad y la tasa de exposición de las fuentes radiactivas de la Universidad

Pedagógica Experimental Instituto Pedagógico de Barquisimeto debido a que mencionadas fuentes no tienen un control de su actividad actual y de su tasa de dosis. El alcance de la presente investigación es llevar un control de las fuentes radiactivas a través de la implementación computacional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Bases Teóricas

Contadores Geiger-Müller.

Es un detector de tipo gaseoso, que se ioniza al paso de la misma de forma que cuenta el número de partículas o fotones independientemente de su naturaleza o de su energía. Su funcionamiento se basa en que, tras crearse pares electrón-ion positivo en la ionización del gas producida por la radiación, estos son desplazados hacia dos electrodos en los que se establece a priori una diferencia de potencial. ()

Si se aumenta la diferencia de potencial entre electrodos de un detector gaseoso más allá de los valores que corresponden al rango de funcionamiento como contador proporcional, el factor de multiplicación de iones deja de ser lineal con la tensión aplicada. Ello se debe a que al ser la masa de los iones positivos mucho mayor que la de los electrones, estos se desplazan a menor velocidad que aquellos, llegando a constituir una carga espacial que altera la forma del campo eléctrico dentro del detector y, por ende, la linealidad. Si se aumenta aún más la diferencia de potencial, el efecto de la carga espacial resulta dominante frente a la diferencia de potencial exterior.

Cuando se llega a esta situación, cesa de aumentar la multiplicación y la amplitud del impulso resulta máxima. Esta región de operación del detector gaseoso recibe el nombre de Geiger-Müller.

La principal característica de un contador Geiger-Müller es que la amplitud de la señal eléctrica es independiente de la energía y naturaleza de la partícula, resultando la de mayor amplitud obtenible con la configuración del detector gaseoso utilizado. Si se continúa aumentando la diferencia de potencial entre electrodos, se produce una descarga en el gas por efecto de la alta intensidad del campo eléctrico. Esta zona no es de interés desde el punto de vista de la detección de la radiación; además, en general, provoca la destrucción del detector.

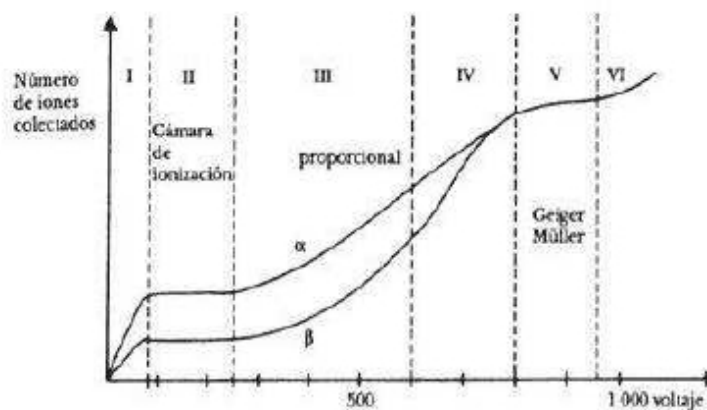


Figura 1: Número de Iones colectados versus Voltaje

En la figura 1 se puede observar que la energía de la partícula varía con el impulso eléctrico producido, llegando a la zona V donde se encuentra el rango operable del contador Geiger-Müller.

Características principales de un contador Geiger-Müller

Un contador Geiger-Müller, también llamado detector GM, está compuesto de una sonda llena de gas (generalmente Helio (He), Argón (Ar) o Neón (Ne)) bajo presión. El cátodo es cilíndrico y el ánodo se encuentra en el eje del cilindro. La sonda tiene una ventana muy delgada que permite el paso de partículas α , β y γ , como se puede observar en la siguiente figura (2).

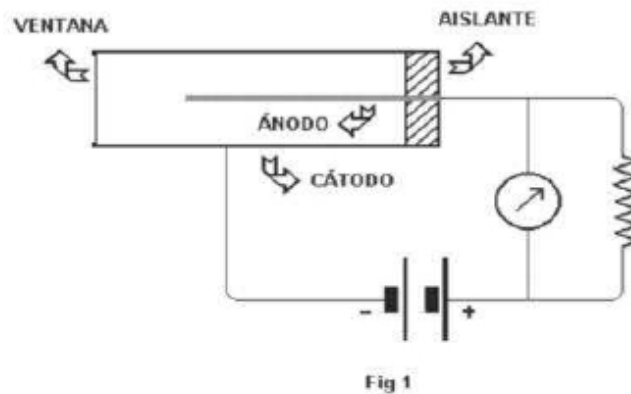


Figura 2: Estructura básica de un contador Geiger-Müller

Funcionamiento de un contador Geiger-Müller

En el contador Geiger-Müller, Cuando los iones positivos se acercan al cátodo, se neutralizan con un electrón arrancado del mismo, liberándose una cantidad de energía igual a la de ionización del gas menos la necesaria para extraer ese electrón de la pared del cátodo. Cuando el valor de la energía liberada alcanza el necesario para arrancar un nuevo electrón (función trabajo), el nuevo electrón liberado puede generar descargas secundaria formándose así una cascada de cargas que aumenta la amplitud del impulso eléctrico en el circuito exterior.

Curva característica de un contador Geiger-Müller

Si la tasa de fluencia de partículas que inciden en un contador Geiger-Müller se mantiene constante y se varía la tensión aplicada al detector, el número de impulsos registrados en la unidad de tiempo varía según el voltaje aplicado. Al intervalo de tensión durante el cual el conteo se mantiene aproximadamente constante se lo suele denominar plateau.

En un buen contador Geiger-Müller, su extensión es un porcentaje importante

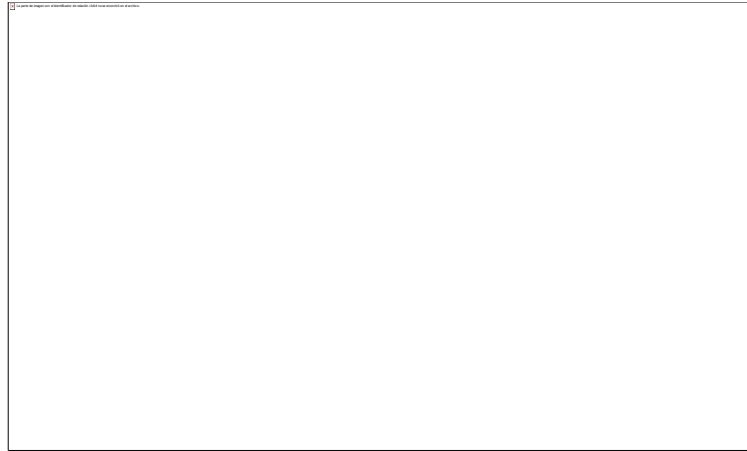


Figura 3: Ion atravesando el tubo Geiger-Müller, originando una ionización del gas y a su vez el nuevo electrón generando partículas secundarias produciéndose el efecto cascada.

de la tensión de operación del mismo (por ejemplo, un 25 %). En el valor de tensión en el cual comienza la zona plana influyen las características del contador y la sensibilidad del sistema electrónico de registro (esta última fija la amplitud mínima de los impulsos que podrán ser registrados).

A medida que se eleva la tensión aplicada al detector, crece la amplitud de los impulsos por hacerse las avalanchas más intensas, aumentando por consiguiente la probabilidad de que el gas de apagado no llegue a neutralizar todos los iones positivos formados. En estas condiciones, alguno de ellos puede alcanzar el cátodo y arrancar un nuevo electrón, lo que puede generar una nueva avalancha y producir un nuevo impulso eléctrico. Esto hace que más allá del valor indicado como V_2 en la figura 4, la gráfica deje de ser plana y eleve apreciablemente su pendiente.

Eficiencia de los contadores Geiger-Müller

En general, estos contadores se prevén para la detección de radiación beta o fotónica. Dado el gran poder de penetración de los fotones, las paredes del tubo pueden ser de vidrio o metal relativamente gruesos, no así en el caso de las partículas

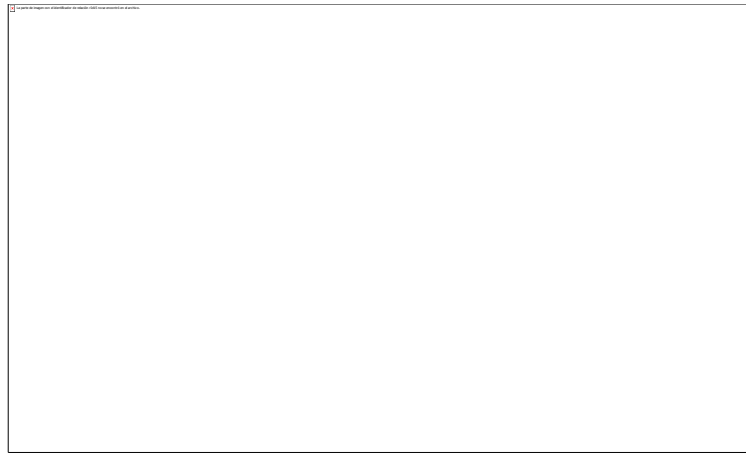


Figura 4: Curva característica de un contador Geiger-Müller

α (pues son rápidamente frenadas en un material denso). Para que el detector resulte sensible a estas partículas, es necesario que disponga de una ventana fina que permita el ingreso de las partículas α .

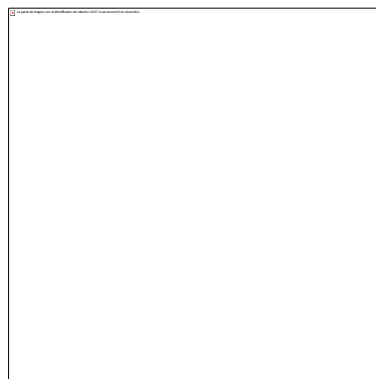
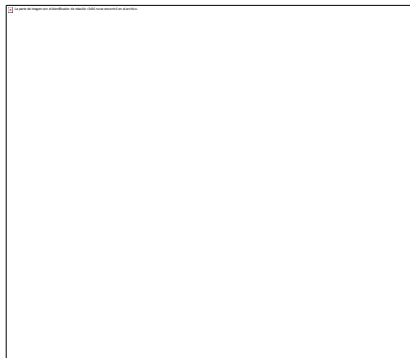
Para que tenga lugar la detección de un fotón X y γ , debe por lo menos liberarse un electrón secundario, lo cual puede realizarse por interacción tanto con el gas de llenado como con el material de las paredes (cátodo) o del ánodo. El electrón liberado debe a su vez, alcanzar el volumen sensible del contador (volumen delimitado por el campo eléctrico, donde tiene lugar la multiplicación de iones) e iniciar una avalancha. La eficiencia intrínseca (relación entre el número de las partículas contadas y de la que llegan al detector) de un contador Geiger-Müller para radiación fotónica en general no pasa del 1 o 2 %.

El Átomo

El átomo es la menor porción en que puede dividirse la materia, sin que pierda sus propiedades. Se han postulado modelos que expliquen su estructura, aceptándose el que sostiene que el átomo está constituido por un núcleo que ocupa la parte central

y que tiene un tamaño casi 10000 veces inferior al del átomo en su conjunto.

Alrededor del núcleo se encuentran girando en órbitas energéticamente bien definidas los electrones, que son partículas cargadas negativamente. En el interior del núcleo, se encuentran partículas llamadas protones (poseen carga positiva) y neutrones que no tienen carga.



Al conjunto de protones más neutrones (llamados nucleones) se lo denomina número másico y se lo simboliza con la letra A , mientras que el número de protones (o electrones) se lo escribe con la letra Z y al número de neutrones con la letra N .

$$\text{De esta manera: } A = Z + N$$

Nomenclatura

Para representar a un elemento de cualquier especie, la expresión que más suele usarse es: X_Z^A , donde X es el símbolo del elemento.

Todo elemento químico tiene una identificación a través de letras del alfabeto que en algunos casos se escriben con una única letra mayúscula (por ejemplo, K , P , S , para el potasio, fósforo y azufre respectivamente) y en otros casos con una mayúscula seguida de otra minúscula (por ejemplo, Na , Be , Al para el sodio, berilio y aluminio respectivamente).

▣ **Nucleido:** es toda especie atómica definida por un A , un Z y su estado energético.

▣ **Isótopos:** son átomos de un mismo elemento, o sea que poseen el mismo Z , pero difieren en el N . Así, en la naturaleza podemos encontrar 3 isótopos del oxígeno: O_{16} , O_{17} , O_{18} siendo el más abundante el isótopo de $A = 16$.

▣ **Isóbaros:** son nucleidos que tienen el mismo A , por ejemplo, Sr_{90} , Y_{90} .

▣ **Isótonos:** son nucleido que tienen el mismo N , por ejemplo, S_{30} , P_{15}^{31} , S_{16}^{32}

▣ **Isómeros:** son nucleidos que se diferencian solamente en el contenido energético teniendo igual Z e igual A , por ejemplo, Im_{13} , Im_{13m} (La letra m como supraíndice indica metaestable).

Unidades de masa atómica

La unidad de masa atómica (u.m.a.) se define como la $\frac{1}{12}$ parte de la masa de un átomo de C_{12} .

La masa de cualquier átomo expresada en gramos es igual al peso atómico de ese átomo dividido por el número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ átomos por cada átomo gramo) entonces:

$$\text{masa de un átomo de } C_{12} = \frac{\text{peso atómico del } C_{12}}{\text{número de Avogadro}}$$

$$\text{masa de un átomo de } C_{12} = \frac{12 \text{ g/atg}}{6,02 \times 10^{23} \text{ atg}} = 1,99 \times 10^{-23} \text{ g/atg}$$

$$\text{u.m.a} = \frac{1,99 \times 10^{-23}}{12} = 1,659 \times 10^{-24} \text{ g}$$

De acuerdo con esto es posible expresar la masa de las partículas del átomo en u.m.a.:

$$\text{Protón} = 1,007594 \text{ u.m.a.}$$

$$\text{Electrón} = 0,000549 \text{ u.m.a.}$$

$$\text{Neutrón} = 1,008986 \text{ u.m.a.}$$

Unidades de energía

Aunque se trate de una partícula tan pequeña como es el átomo, hay en juego una gran cantidad de energía que podríamos interpretar en términos de la ecuación de Einstein que relaciona la masa con la energía de la siguiente manera:

$$E = mc^2$$

donde

m = masa expresada en gramos, c = velocidad de la luz ($3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$) en consecuencia $E = 1,494 \times 10^{-3} \text{ gcm}^2/\text{s}^2 = 931,50 \text{ MeV}$.

Una unidad de energía comúnmente usada en física es el Joule y el electron-voltio.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Energía de unión del núcleo

En principio, la masa atómica de un nucleido podría entenderse como función de sus partículas constitutivas, pero, si se pesara en forma precisa cada una de ellas y luego el átomo en su totalidad se vería que el peso del átomo es menor que la suma de todas sus partículas.

Esta diferencia es lo que se conoce como “defecto de masa sería la masa que se transforma en energía para mantener el núcleo unido.

Por ejemplo, calculemos la masa de los nucleones de He_2 :

$$2(1,008) + 2(1,009) = 4,034 \text{ u.m.a.}$$

La masa de un núcleo de He es de 4,004 u.m.a.

Entonces $4,034 - 4,004 = 0,030$ u.m.a. (defecto de masa)

Desintegración Radiactiva

En la naturaleza existen elementos inestables que para alcanzar su equilibrio energético necesitan emitir en forma espontánea partículas o alguna clase de radiación, modificando de esta forma el estado de sus núcleos. Esta emisión se denomina desintegración radiactiva y el fenómeno que se produce es conocido como radiactividad.

La desintegración radiactiva es azarosa y tiene una constante de desintegración (λ) que depende de cada núcleo, ajustándose de esta manera a las leyes estadísticas.

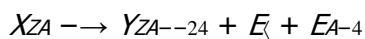
Esta constante de desintegración es la probabilidad de que un núcleo desinte-

gre en la unidad de tiempo y se denota con la letra τ , siendo su unidad la inversa del tiempo, s^{-1} , min^{-1} o ano^{-1} .

Desintegración alfa

Este tipo de desintegración es característico de núcleos pesados con Z mayor que 82 aunque existen algunos emisores alfa que tienen un Z menor, por ejemplo: samario (Sm_{62}^{147}).

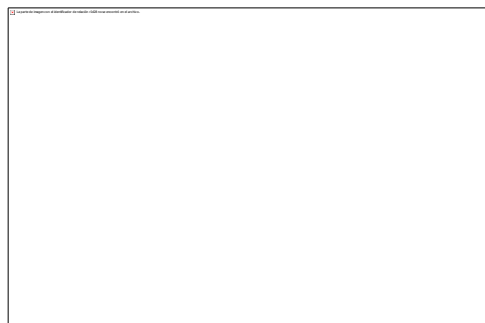
Las partículas alfa son núcleos de helio He_2^4 , que contienen 2 protones y 2 neutrones por lo que un átomo que se desintegra con emisión alfa pierde 4 unidades de su número másico (A) y 2 de su Z . El esquema de desintegración puede representarse así:



donde $E_{\alpha} + E_{A-4} = E \equiv \Delta(X_{ZA}) - \Delta(Y_{Z-2, A-4}) - \Delta(He_2^4)$

Es importante considerar el retroceso del núcleo hijo

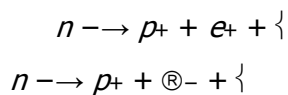
$$\Delta(X_{ZA}) \equiv M(X_{ZA}) - AM_u \quad M_u = 931,50 MeV \quad \Delta(C_{612}) \equiv 0$$



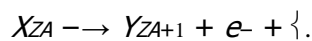
Desintegración beta

La desintegración beta puede ser de dos tipos: negativa o positiva.

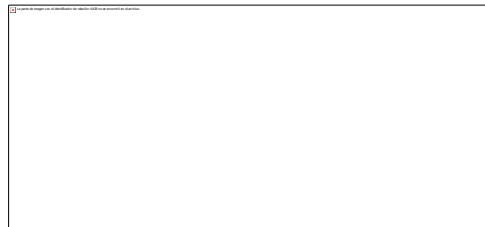
Las partículas beta negativas (e^-) son electrones que se generan en el núcleo y poseen mayor velocidad que los electrones orbitales. La generación de estos electrones sigue el mecanismo de transformación de un neutrón en un protón (p^+) más una partícula beta y una partícula sin carga, de masa despreciable, llamada neutrino ($\bar{\nu}$).



La desintegración beta negativa se puede representar así:

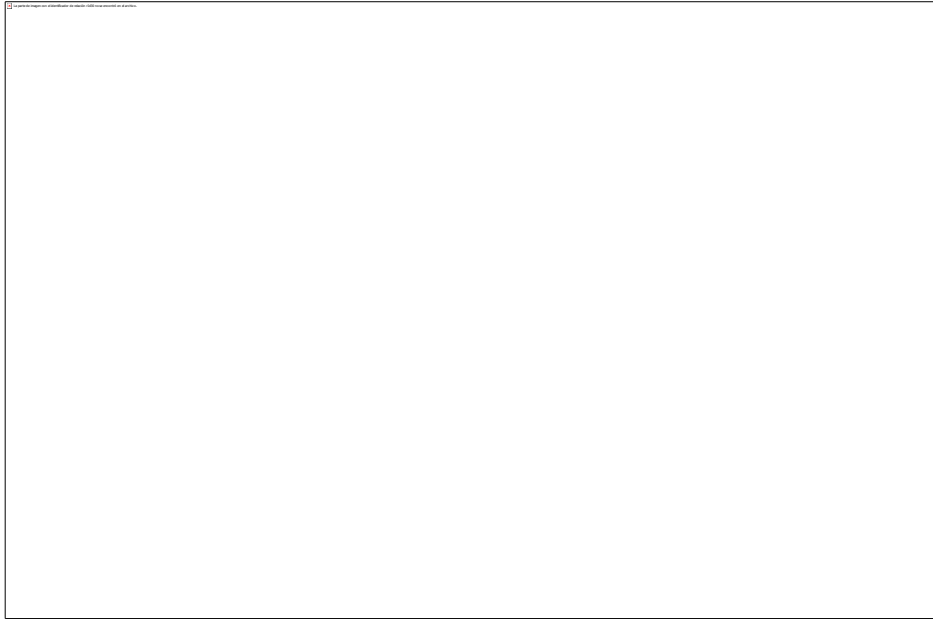


Un ejemplo de este tipo de desintegración se puede mencionar la del Sr_{90}



La emisión beta presenta un espectro de energías que van desde cero hasta un valor máximo. Este valor máximo, corresponde al valor de máxima energía que aparece en tablas.

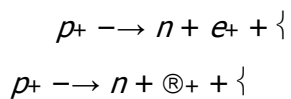
Esto significa que el electrón proveniente del núcleo que se está desintegrando puede adquirir cualquier energía entre cero y su máximo, ya que la energía total involucrada en la desintegración es repartida entre él y el neutrino (hay energía cinética del núcleo, pero es despreciable).



Desintegración beta positiva

Este tipo de desintegración es producto de la acción de deuterones, partículas alfa o neutrones rápidos sobre distintos elementos, no existiendo, por lo tanto, emisores beta positivos en la naturaleza.

El mecanismo de emisión implica la transformación de un protón en un neutrón y un positrón que es emitido junto con un neutrino de acuerdo al siguiente esquema:



La desintegración β^+ puede representarse de la siguiente forma



En este tipo de desintegración el núcleo hijo tiene un Z que es una unidad menor que el de la padre y como en el caso de la emisión beta negativa el número

másico también se conserva.

Emisión gamma

La radiación gamma es una radiación electromagnética del mismo tipo que la luz, pero de menor longitud de onda.

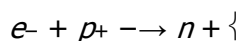
A diferencia de la radiación alfa o beta, no se desvía en un campo magnético indicando que sus partículas no poseen carga eléctrica, y además, no hay variación del número másico A , ni del número atómico Z del núcleo que emite esta radiación gamma.

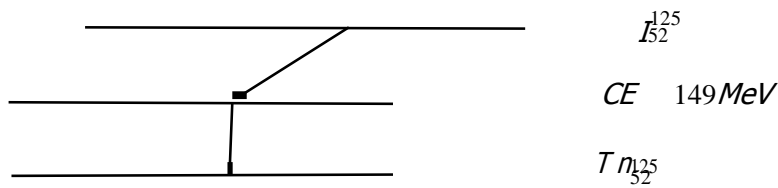
La radiación gamma habitualmente acompaña a algunos procesos de desintegración radiactiva en la que el núcleo queda en un estado excitado.

Captura electrónica

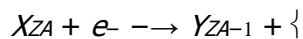
En este tipo de desintegración el núcleo capta un electrón de las órbitas electrónicas interiores, generalmente de la capa K. Esta órbita vacante es llenada por un electrón de una de las capas exteriores dando lugar a la emisión de rayos x, siendo esta la única indicación de que se ha producido una transformación.

El electrón capturado, junto con un protón del núcleo, generan un neutrón y un neutrino monoenergético, a diferencia del producido en la desintegración beta.





El mecanismo de captura electrónica se puede esquematizar así:



Conversión interna

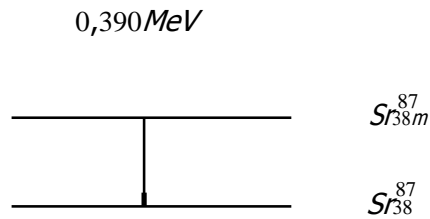
La conversión interna se produce cuando fotones gamma, que no pueden escapar de la nube de electrones que rodea al núcleo, le transfieren suficiente energía a uno de estos y lo expulsan del átomo. Este proceso se lleva a cabo en el nivel K. La energía con la cual se expulsa al electrón es igual a la energía de excitación menos la energía de unión del electrón en su órbita, de ahí que los electrones de conversión interna sean monoenergéticos.

Transición isomérica

Este tipo de desintegración se produce entre pares de radionucleidos que tienen A y Z iguales pero que tienen energías diferentes. No hay variación del número másico (A) ni del número atómico (Z). Los nucleidos madre e hija son en este caso isómeros que sólo se diferencian por su estado energético.

Generalmente uno de los isómeros del par es metaestable y llega al estado fundamental o un estado inferior de energía emitiendo radiación gamma.

Como ejemplo se puede citar el decaimiento del ^{87m}Sr .



Decaimiento Radiactivo

El decaimiento radiactivo del núcleo es un proceso estocástico, es decir cada núcleo excitado puede decaer emitiendo un fotón γ en cualquier dirección, sin posibilidad de predicción alguna. El número de átomos de la muestra que decaen por unidad de tiempo y de área es aleatorio. Para ello, se estudió el comportamiento estadístico de dicho decaimiento utilizando como fuente al ^{137}Cs . Se realizó un análisis más detallado en comparación con la distribución de Poisson.

$\lambda = -\frac{dN}{N dt}$ donde λ es la probabilidad de desintegración. Por lo tanto la probabilidad de desintegración por unidad de tiempo es

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \quad (1)$$

donde λ es un parámetro de desintegración. La actividad de una muestra se define por $A = \frac{dn}{dt} = \lambda N$ $\frac{\text{desintegraciones}}{s}$ y representa la razón a la cual ocurren las desintegraciones en los núcleos.

La ecuación (17) se puede reescribir en una forma ligeramente diferente, y si existe N_0 átomos en el tiempo $t = 0$, entonces aplicamos Transformada de Laplace a (17).

$$\mathcal{L} \left[\frac{dN(t)}{dt} \right] = -\mathcal{L} [N(t)]$$

$$-N(0) + sL N(t) = -L N(t)$$

$$L N(t) \quad s + \lambda = N(0)$$

$$L N(t) = \frac{N_0}{s + \lambda}$$

Ahora aplicamos transformada Inversa de Laplace

$$N(t) = N_0 L^{-1} \left[\frac{1}{s + \lambda} \right]$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Cuando a la ecuación (2) se multiplica por el parámetro λ se convierte en

$$\lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

donde $N_0 = A_0$ es la actividad inicial, y $\lambda N(t) = A(t)$ es la actividad en el tiempo t .
Esto da para la actividad

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Período (half live)

La vida media $T_{1/2}$ de un radioisótopo se define como el tiempo transcurrido en el cual el número de átomos decae a la mitad de su número inicial, o el tiempo en el cual la actividad disminuye a la mitad de la actividad inicial.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (5)$$

Vida media (mean life) de un Núcleo Radiactivo

Es el tiempo de vida promedio de todos los átomos en una muestra dada por lo tanto si hay dN_1 átomos con un tiempo de vida t_1 , dN_2 con un tiempo de vida t_2 , y así sucesivamente entonces la vida promedio \bar{t} se define de la forma:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{\mu=1}^{\infty} t_{\mu} dN_{\mu}}{\sum_{\mu=1}^{\infty} dN_{\mu}} \quad (6)$$

ó en términos de cálculo integral

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} t dN}{N_0} = \frac{\int_0^{\infty} t d(N_0 e^{-\lambda t})}{N_0}$$

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

La vida media esta relacionada con la vida promedio $\bar{t} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$ por lo tanto

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

Ahora sustituyendo (8) en (4) se tiene la siguiente ecuación

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad (9)$$

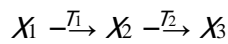
Curie

La actividad de una sustancia radiactiva puede medirse en Curies (C) que es

la actividad de un nucleido cuya velocidad de desintegración es $2,22 \times 10^{12}$ dpm.

Desintegraciones sucesivas

En la mayoría de los casos la especie radiactiva que se esta desintegrando, da lugar a la formación de otra especie que también se desintegra, con una constante de desintegración diferente a la del núcleo madre y también a la del núcleo hija. De esta manera se originan las series radiactivas que pueden ser representadas así:



Si para nuestro ejemplo suponemos que X_3 es estable, que a $t = t_0$ hay $N_{1,0}$ atomos con una constante de decaimiento λ_1 , y ademas, no hay atomos del hijo, entonces, despues de un intervalo de tiempo Δt , el incremento ΔN_2 (nucleos del hijo) estara dado por la velocidad de decaimiento del padre, menos la velocidad de decaimiento del hijo en ese Δt . Si la velocidad de decaimiento del padre es λ_1 . N_1 y la velocidad de decaimiento del hijo es λ_2 . N_2 , entonces:

$$\frac{\Delta N_2}{\Delta t} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (10)$$

Haciendo uso de (2), y luego de algunos pasos matemáticos, se integra la ecuación (10) obteniéndose:

$$N_2 = \frac{N_{1,0} \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{2,0} e^{-\lambda_2 t} \quad (11)$$

donde N_2 es el número de átomos hijo presentes en un tiempo t , y $N_{2,0}$ es el número de átomos hijo al tiempo $t_0 = 0$.

Como supusimos que inicialmente no habia atomos del hijo presentes, entonces el ultimo termino de la expresion anterior es cero. Ademas, vemos que el

producto $A_{1,0} T_1$ es la actividad del padre a $t = 0$.

Si ahora multiplicamos ambos miembros de la ecuación anterior por T_2 y la reescribimos en función del semiperíodo se obtiene:

$$A_2 = \frac{A_{1,0} T_1}{T_1 - T_2} (e^{-0,693 t / T_1} - e^{-0,693 t / T_2}) \quad (12)$$

Esta es la expresión de la actividad de un radionucleido hijo a tiempo t , conociendo la actividad inicial del padre $A_1 = 0$ y suponiendo que inicialmente no había núcleos del hijo presentes.

Equilibrio transitorio

Este tipo de equilibrio se presenta cuando la madre tiene un semiperíodo mayor que el del hijo, observándose que al principio la relación de actividades padre - hijo crece hasta que llega un momento al cabo de aproximadamente siete semiperíodos del hijo, en que esta relación permanece constante. Se dice entonces que el par padre - hijo ha entrado en equilibrio transitorio. Observando la ecuación (12) puede notarse que el término exponencial que contiene al semiperíodo del hijo, puede despreciarse frente al otro exponencial. De esa manera la ecuación (12) adquiere la forma:

$$A_2 = \frac{A_{1,0} T_1}{T_1 - T_2} (e^{-0,693 t / T_1}) \quad (13)$$

que es lo mismo que:

$$A_2 = \frac{A_1 T_1}{T_1 - T_2} \quad (14)$$

siendo A_2 la actividad del hijo a tiempo t y A_1 la actividad del padre a tiempo t .

Equilibrio secular

Cuando el semiperíodo del padre es mucho mayor que el del hijo, el término exponencial del hijo en la ecuación (12) se hace despreciable frente al del padre, siendo posible también, despreciar el semiperíodo del hijo frente al del padre en la misma ecuación, de tal manera que:

$$A_2 = \frac{A_{1,0} T_1}{T_1 - T_2} (e^{-0,693t/T_1}) \quad (15)$$

$$A_2 = A_1 \quad (16)$$

De aquí puede concluirse que en el equilibrio secular:

- ☐ La actividad del padre es igual a la del hijo
- ☒ La actividad del hijo decae con el semiperíodo del padre.

Exposición.

La magnitud exposición X , se define como el cociente $\frac{dQ}{dm}$ donde dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos los electrones liberados por fotones, en un volumen elemental de aire cuya masa es dm , son completamente frenados en aire.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (17)$$

La unidad práctica adoptada originalmente para esta magnitud, posee el nombre especial de roentgen (R), con una equivalencia: $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C.kg^{-1}$

En la actualidad, la magnitud exposición dada en unidades de R o $C.kg^{-1}$, se la reemplaza por la magnitud kerma en aire y su correspondiente unidad, el Gy .

Factor de calidad de radiación, Q

La dosis absorbida, D , o la dosis absorbida media en organo, D_T , no son magnitudes suficientes en si mismas para caracterizar la probabilidad de dano, detrimento en la salud, que puede resultar de la irradiacion.

Al intentar cuantificar el riesgo de efecto biologico por irradiacion, se ha encontrado que este no depende solo de la energia depositada por unidad de masa de tejido irradiado (dosis absorbida) sino tambien del modo en que esta energia es distribuida microscopicamente, a lo largo de la trayectoria de la particula cargada.

Por ello se ha introducido un factor de peso asociado al tipo de radiacion, llamado factor de calidad Q . Esta definido en funcion del coeficiente de transferencia lineal de energia irrestricto L_{\square} en agua, y sus valores son conservativos respecto de la eficiencia biologica relativa (RBE en ingles) para los efectos biologicos, segun distintos tipos y energias de las radiaciones.

Factor de ponderación de la radiación, WR

Una reevaluación de la información biológica y de los resultados de los cálculos de dosis equivalente, utilizando el factor de calidad Q , ha demostrado que este factor no representa un modo adecuado de ponderación para el amplio espectro de partículas y energías. Esto es así en razón de no contar con una adecuada comprensión teórica de los complejos fenómenos asociados y de la limitada evidencia experimental que se dispone, todo lo cual sugiere adoptar una postura más cauta.

En consecuencia se ha optado por introducir un nuevo factor, llamado factor de ponderación de la radiación, WR , basado en el tipo y calidad de la radiación incidente sobre el cuerpo cuando se trata de la irradiación externa o de la emitida por radioisó-

topos, cuando éstos están depositados internamente en el cuerpo.

Esto quiere decir que ahora no se requiere del conocimiento del tipo y calidad de la radiación que causa la dosis en el punto de interés, dentro del tejido u órgano, para la elección del factor WR , como ocurría con el factor de calidad Q .

En la Tabla 1 se muestran los valores para los factores de ponderación de la radiación WR según distintos tipos de radiaciones, los que han sido seleccionados por la ICRP, para reflejar la efectividad biológica relativa RBE de las radiaciones en la producción de efectos estocásticos a bajas dosis.

Tabla 1

Tipo de Radiación	WR
Fotones de todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones con energías	
< 10KeV	5
10KeV a 100KeV	10
100KeV > a 10MeV	20
> 2MeV a 20MeV	10
> 20MeV	5
Protones, salvo los de retroceso, de $E > 2MeV$	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión y núcleos pesados	20

Dosis equivalente en un órgano o tejido, H_T

Se define como el producto de la dosis absorbida media en el órgano o tejido

Ty el factor de ponderación de la radiación,

$$HT = \sum_R WRDT R$$

La unidad de la magnitud dosis equivalente en órgano o tejido recibe el nombre de Sievert (Sv).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Naturaleza de la Investigación

Para la realización de este trabajo se llevó a cabo una investigación Documental bajo la modalidad de proyecto especial. Según Cázares, Christen, Jaramillo, Villaseñor y Zamudio (2000), “La investigación documental depende fundamentalmente de la información que se recoge o consulta en documentos, entendiéndose este término, en sentido amplio, como todo material de índole permanente, es decir, al que se puede acudir como fuente o referencia en cualquier momento o lugar, sin que se altere su naturaleza o sentido, para que aporte información o rinda cuentas de una realidad o acontecimiento” (p.18). Las fuentes documentales pueden ser, entre otras: documento escritos, como libros, periódicos, revistas, actas notariales, tratados, encuestas y conferencias escritas; documentos fílmicos, como películas, diapositivas, fílmicas; documentos grabado, como discos, cintas y casetes, incluso documentos electrónicos como páginas Web.

En esta perspectiva metodológica, la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2006), explica que la investigación documental consiste en el “estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, con apoyo principalmente en trabajos previos...”(p.7). Además en este tipo de investigación se utiliza la información y datos divulgados por medios impresos, audiovisuales o electrónicos.

En lo que respecta a la originalidad del estudio documental, se refleja en el enfoque, criterios, conceptualizaciones, análisis Físico Numérico del fenómeno, reflexiones, conclusiones, recomendaciones y en general, en el pensamiento del autor. En este sentido, esta investigación se basa fundamentalmente en la simulación

numérica del decaimiento de diferentes isótopos radiactivos como el Co^{60} ; Cs^{137} ; Sr^{90} y el $T/204$. La Universidad Santa María (2000), considera que: “ésta se ocupa del estudio de problemas planteados a nivel teórico, la información requerida para abordarlos se encuentra básicamente en materiales impresos, audiovisuales y/o electrónicos” (p.44).

Al respecto, Ander-Egg (1978), manifiesta que: “Una de las formas más sencillas de economizar esfuerzos en una investigación, es el reposo y reconstrucción del trabajo realizado por otros... Por ello, deberá realizarse un minucioso examen de todas las fuentes documentales que sirvan de soporte...” (p.36). La localización de las fuentes dependerá de las habilidades del investigador y de su experiencia.

Es importante señalar que los trabajos de investigación documental pueden ser: (a) Estudios de desarrollo teórico, presentación de nuevas teorías, conceptualizaciones o modelos interpretativos originales del autor; (b) Revisiones críticas del estado del conocimiento; (c) Estudios de educación comparada, con el análisis de semejanzas, diferencias y tendencias sobre características o problemas de la educación en el contexto de realidades socioculturales, geográficas o históricas diversas y, (d) Estudios de investigación en cualquier especialidad.

En lo que respecta al nivel de la investigación se consideró el estudio descriptivo que según Dankhe citado por Hernández, Fernández y Baptista (2003): “...buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis” (p.60). Miden o evalúan diversos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno o fenómenos a investigar. Desde el punto de vista científico, describir es medir. Esto es, en un estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide cada una de ellas independientemente, para así y valga la redundancia describir lo que se investiga.

Como mencionan Selltiz (1965), en esta clase de estudios el investigador debe ser capaz de definir qué se va a medir y cómo se va a lograr precisión en esa medición. Asimismo, debe ser capaz de especificar quién o quiénes tienen que incluirse en la medición.

En cuanto al diseño, la investigación se apoyó en lo Bibliográfico, con la correspondiente revisión sistemática, rigurosa y profunda de fuentes para obtener la información necesaria y realizar el análisis respectivo. Según Tamayo y Tamayo (2001), este tipo de diseño consiste en la utilización de datos secundarios, es decir aquellos que han sido obtenidos por otros, que son elaborados y procesados de acuerdo a los fines de quien inicialmente los elaboran. El diseño bibliográfico permitió al investigador consultar libros y textos de donde se pudo extraer los aspectos importantes y los datos bibliográficos útiles para la investigación.

Procedimiento

Para el procedimiento documental en esta investigación, se cumplieron las siguientes etapas:

- Indagación de los antecedentes, lo cual se realizó a través de la visita de las Bibliotecas de varias instituciones de educación superior ubicadas en el estado Lara, con la finalidad de ubicar investigaciones previas relacionadas con la temática de estudio.
- Revisión de la literatura, libros, revistas especializadas, documentos y revistas en línea, que permitió lograr una visión integral de los resultados obtenidos por las investigaciones previas y la forma de analizarlos.
- Recolección de los datos mediante fichas bibliográficas, textuales y de resumen, con la finalidad de extraer la información relevante para la investigación.
- Construcción del Marco Teórico con el análisis de la situación problema y los antecedentes revisados, además realizar la interpretación y análisis físico-matemático de los resultados obtenidos en la investigación.
- Reflexión crítica para el arribo a las conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO IV

Modelo Numérico y Resultados

En este capítulo se introduce las medidas realizadas por el Contador Geiger Müller a las fuentes de Cs -137, Co-60, Sr-90 y Tl-204 como también la simulación numérica del decaimiento radiactivo y su tasa de dosis a cuerpo entero.

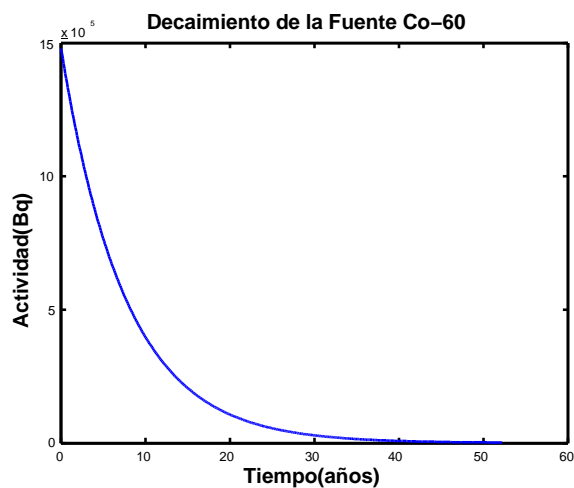
Fuente de ^{60}Co

Cálculo de la Actividad de ^{60}Co usando la ecuación (9)

$$A = 1480000 \text{ Bq} \exp - \frac{\ln 2}{5,27 \text{ años}} 52,25 \text{ años}$$

$$A = 1543,55 \text{ Bq}$$

Simulación en MATLAB del decaimiento de ^{60}Co



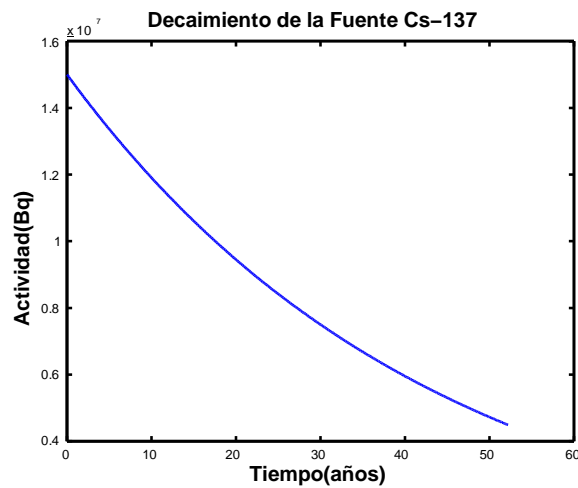
Fuente de ^{137}Cs

Cálculo de la actividad actual de una fuente ^{137}Cs usando la ecuación (9)

$$A = 15000000 \text{ Bq} \exp - \frac{\ln 2}{30,23 \text{ años}} (52,25 \text{ años})$$

$$A = 4531941,066 \text{ Bq}$$

Simulación en MATLAB de la actividad actual del ^{137}Cs



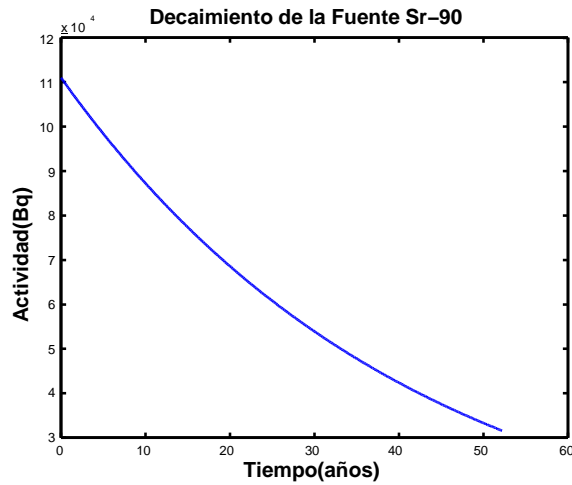
Fuente de ^{90}Sr

Cálculo de la Actividad de ^{90}Sr usando la ecuación (9)

$$A = 111000 \text{ Bq} \exp - \frac{\ln 2}{28,79 \text{ años}} (52,25 \text{ años})$$

$$A = 315875,975 \text{ Bq}$$

Simulación en MATLAB del decaimiento de ^{90}Sr



Equilibrio Secular (Solo una hija menos longeva que el padre $\lambda_1 \gg \lambda_2$)

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{\frac{\ln 2}{T_{1/2}}}{\frac{\ln 2}{T_{1/2}} - \frac{\ln 2}{T_{1/2}'} } = \frac{T_{1/2}'}{T_{1/2} - T_{1/2}'} \approx 1$$

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{T_{1/2}'}{T_{1/2} - T_{1/2}'} = \frac{28,79 \text{ años}}{28,79 \text{ años} - 0,007328 \text{ años}} \approx 1$$

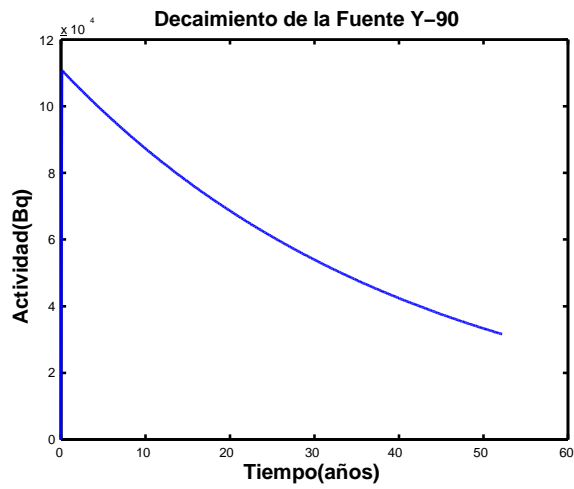
Cálculo de la actividad de la hija (${}^{90}\text{Y}$)

$$A_1(t) = A_0 \frac{T_{1/2}'}{T_{1/2} - T_{1/2}'} \exp\left[-\lambda_1 \frac{\ln(2)t}{T_{1/2}}\right] - \exp\left[-\lambda_2 \frac{\ln(2)t}{T_{1/2}'}\right]$$

$$A_1 = 111000 \text{ Bq} \frac{28,79 \text{ años}}{28,79 \text{ años} - 0,007328 \text{ años}} \exp\left[-\ln(2) \frac{28,79 \text{ años}}{28,79 \text{ años}}\right] - \exp\left[-\ln(2) \frac{28,79 \text{ años}}{0,007328 \text{ años}}\right] \quad 2)52, \text{ nos}$$

$$A_1 = 315956,396 \text{ Bq}$$

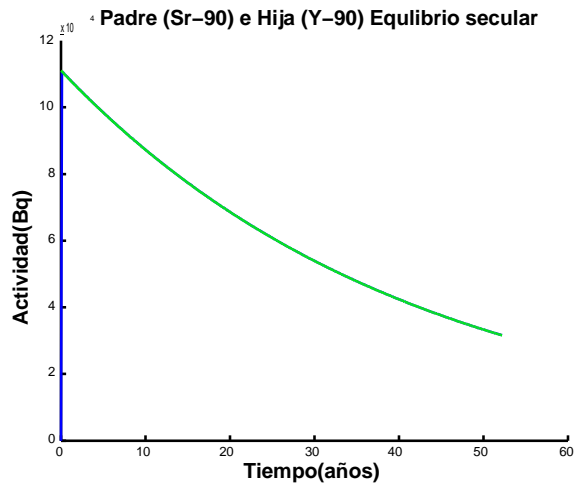
Simulación en MATLAB del decaimiento de ${}^{90}\text{Y}$



En conclusión como existe equilibrio secular entre el Padre(Sr_{90}) y la hija (Y_{90}) la actividad de éste isótopo es:

$$A_T = A + A_i = 315875,975 Bq + 315956,396 Bq = 631832,371 Bq$$

Simulación en MATLAB del equilibrio secular del Núcleo Padre ${}_{90}Sr$ e Hija ${}_{90}Y$.



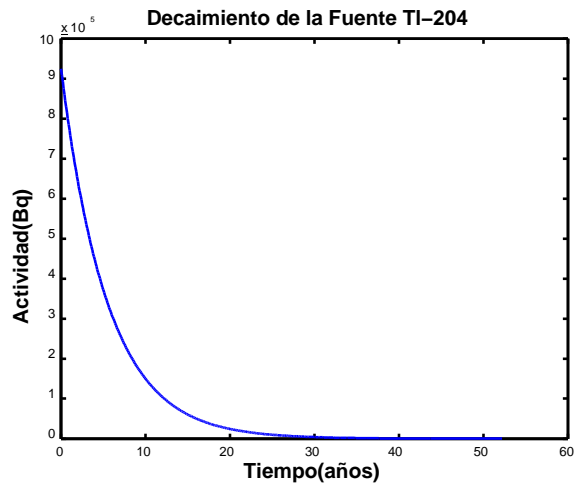
Fuente de ^{204}Tl

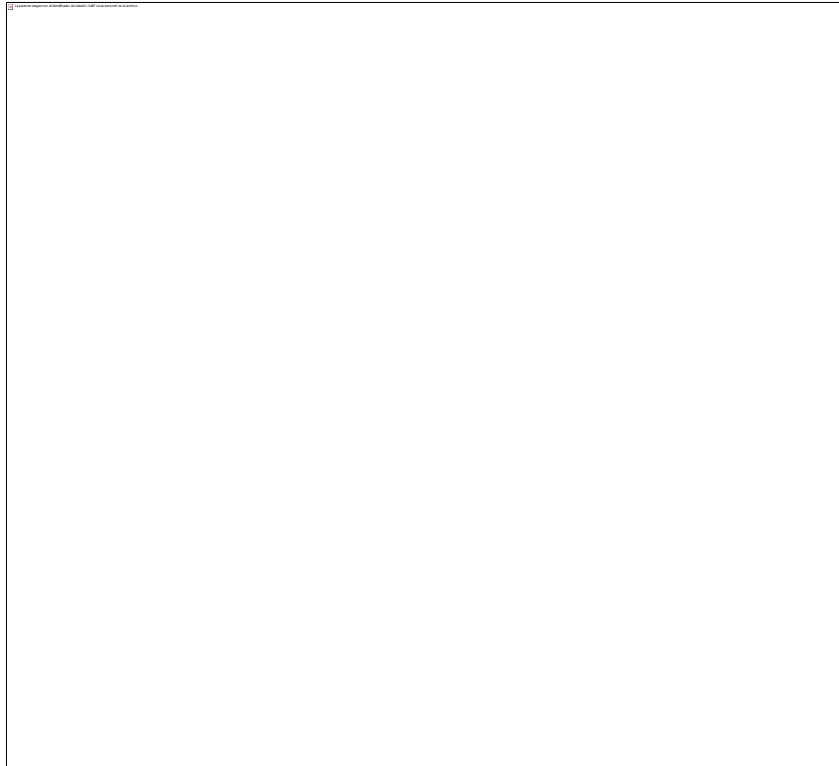
Cálculo de la actividad actual de una fuente ^{204}Tl usando la ecuación (9)

$$A = 925000 \text{ Bq} \exp \left(-\frac{\ln 2}{3,81 \text{ años}} (52,25 \text{ años}) \right)$$

$$A = 69,469 \text{ Bq}$$

Simulación en MATLAB del decaimiento de ^{204}Tl





Como podemos ver las medidas experimentales de la actividad de cada fuente radiactiva no es consistente con la información obtenida a través de la implementación computacional debido a que el contador Geiger Müller es un instrumento con una eficiencia muy baja para realizar mediciones precisas en la Física Nuclear.

Tasa de dosis equivalente a cuerpo entero para el Co-60


Actualmente la tasa de dosis equivalente a cuerpo entero para una persona que trabaje con la fuente de $Co - 60$ por una hora a una distancia de $20cm$ es de $\dot{H} = 0,00000130209588 \text{ mSv/h}$ lo que implica que ésta por debajo del límite establecido por el Comité Internacional de Protección Radiológica que es de $\dot{H} = 0,01 \text{ mSv/año}$ (ver anexo).

La tasa de dosis equivalente a cuerpo entero para una persona que trabaje con la fuente de $Co - 60$ por una hora a una distancia de $10cm$ es de $\dot{H} = 0,00000520838352 \text{ mSv/h}$ lo que implica que ésta por debajo del límite establecido por el Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP) que es de $\dot{H} = 0,01 \text{ mSv/año}$.

Tasa de dosis equivalente a cuerpo entero para el Cs-137

La tasa de dosis equivalente a cuerpo entero para una persona que trabaje con la fuente de $Cs - 137$ por una hora a una distancia de $20cm$ es de $H = 0,00111561013709 mSv$ lo que implica que ésta por debajo del límite establecido por el Comité Internacional de Protección Radiológica que es de $H = 0,01 mSv$ (ver anexo).

La tasa de dosis equivalente a cuerpo entero para una persona que trabaje con la fuente de $Cs - 137$ por una hora a una distancia de $10cm$ es de $H = 0,00446244054837 mSv$ lo que implica que ésta por debajo del límite establecido por el Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP) que es de $H = 0,01 mSv$. Es importante resaltar que el profesional que haya estado a $10cm$ de la fuente o menos y además no tenía ninguna protección estuvo por encima del límite de la tasa de dosis equivalente a cuerpo entero establecido por el ICRP publicación 103 en los primeros años de vida útil de la fuente radiactiva.

Para un profesional que trabaje con la fuente de $Cs - 137$ $8h$ diarias por 5 días a la semana y 50 semanas al año supera el límite de la tasa de dosis equivalente que es de $20 mSv$. 

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- La actividad Medida por el contador GM no es confiable debido a que éste posee muy poca eficiencia.
- La simulación numérica arrojo las Actividades de las distintas fuentes radiactivas para todo el campo temporal.
- La implementación computacional asegura el cálculo rápido y preciso de las actividades en cualquier paso del tiempo.
- A través del código computacional se pudo obtener la tasa de dosis equivalente a distintas distancias en todo el campo temporal donde se asegura que ésta tasa actualmente se encuentra por debajo $0,01 \text{ mSv/año}$ según ICRP.

RECOMENDACIONES

- Elaborar una Interfaz de Usuario para facilitar el cálculo de la Actividad y de la tasa de dosis equivalente.
- Realizar el estudio de la tasa de dosis equivalente para fuentes de $Sr - 90$ y $Tl - 204$.

REFERENCIAS

- Acosta, V. y Cowan, C. (1994). Curso de Física Moderna. pp 149-215. México: Harla.
- Attix, F. (1986). Introduction Radiological Physics and Radiation Dosimetry. USA, Wiley-Interscience Publication.
- Ander-Egg, E. (1978). *Introducción a las técnicas de investigación social para trabajadores sociales*. Volumen 6. *Colección Guidance*. (pp. 76). Buenos Aires, Argentina.
- ARFKEN, G. Y WEBER, H.(2001). *Mathematical Methods for Physicists*. Academic Press, San Diego, quinta edición.
- Carvajal, H. (1977). Conocimiento Basico para operadores del Reactor Nuclear de Investigación RV-1
- Cázares Hernandez, L.; Christen, M.; Jaramillo Levi, E.; Villaseñor Roca, L.y Zamudio Rodriguez, L. (2000). *Técnicas Actuales de Investigación Documental*. México.
- Colección de Normas de Seguridad del OIEA. GUÍA DE SEGURIDAD NRS-G-1.7
- Eisberg, R. y Resnick, R. (2006). Física Cuántica (L. Cota). pp 157-282. México: Limusa. (Trabajo originalmente publicado 2004).
- Ferreira, A. y González, E. (2000). Reflexiones sobre la enseñanza de la Física Universitaria. Revista de Enseñanza de la Física. Vol 18, N° 2. pp 189-199.
- Hernández, S. R.; Fernández Collado, C. y Baptista, L. P. (1998). *Metodología de la investigación*. México: México.
- ICRP 103. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica
- Kinsman, S. (1954). Handbook Radiological Health.
- Mayles, P.; Nahum, A. y Rosenwald JC. (2007). *Handbook of Radiotherapy Physics*. Taylor & Francis Group.
- Selltiz, C. (1965). *Métodos de investigación en las relaciones sociales*. Madrid:España.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Vicerrectorado de Investigación y Postgrado (2006). Manual de Trabajos de Grado de Especialización y Maestría y Tesis Doctorales. Caracas - Venezuela

Código Computacional

```
format long  
close all  
clear  
clc
```

```
%Decaimiento Radiactivo del Co-60
```

```
%Constantes Físicas
```

```
A_0 = 1480000; %Actividad Inicial del Co-60 en Bq
```

```
nt = 52.25; % Tiempo aproximado de expedición de la fuente
```

```
tau = 5.27; %Período ( half live) para Co-60
```

```
t = 0:0.1:nt;
```

```
A = A_0*exp(-log(2)*t/tau);
```

```
%Decaimiento Radiactivo del Cs-137 (Bario metaestable)
```

```
A_01 = 15000000; %Actividad Inicial del Cs-137 en Bq
```

```
tau1 = 30.23; %Período ( half live) para Cs-137
```

```
A_1 = A_01*exp(-log(2)*t/tau1);
```

```
%Decaimiento Radiactivo del Sr-90
```

```
A_02 = 111000; %Actividad Inicial del Sr-90 en Bq
```

```
tau2 = 28.79; %Período ( half live) para Sr-90
```

```
A10 = 0; %Actividad Inicial del Itrio-90 Bq
```

```
T = 0.007328; %Período ( half live) para Y-90
```

```
% Cálculo de la Actividad para el Y-90
```

$A_2 = A_{02} * (\tau_2 / (\tau_2 - T)) * (\exp(-\log(2) * t / \tau_2) - \exp(-\log(2) * t / T)) + A_{10} * \exp(-\log(2) * t / T);$

% Cálculo de la Actividad para el Sr-90

$date = A_{02} * \exp(-\log(2) * t / \tau_2);$

% Decaimiento Radiactivo del Tl-204

$A_{03} = 925000;$ *%Actividad Inicial del Tl-204 en Bq*

$\tau_3 = 3.81;$ *% Período (half live) para Tl-204*

$A_3 = A_{03} * \exp(-\log(2) * t / \tau_3);$

% Estudio de la Tasa de Exposición y de dosis para el Co-60

$r = 20;$ *%cm*

$K = 1.827E-8;$

$E = [0.4 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.8 \ 1 \ 1.5 \ 2 \ 3 \ 4];$ *% Energía en MeV*

% Coeficiente masico de absorción de energía en aire (cm²/gr)

$N = [0.0296 \ 0.0297 \ 0.0296 \ 0.0289 \ 0.0280 \ 0.0255 \ 0.0234 \ 0.0205 \ 0.0186];$

% Coeficiente masico de absorción de energía del HOH (cm²/gr)

$W = [0.0329 \ 0.0330 \ 0.0329 \ 0.0321 \ 0.0311 \ 0.0283 \ 0.0260 \ 0.0227 \ 0.0205];$

% Calculo de la densidad de Flujo para el Cobalto 60

$\phi = A / (4 * \pi * r^2);$ *% fotones/(cm²*s)*

$E_1 = 1.17;$ *% MeV*

$E_2 = 1.33;$ *% MeV*

$\alpha = 0.869;$ *% cGy/R*

%Coeficiente de absorción de energía en aire para una Energía E_1

N_1 = spline(E,N,E_1); %(cm^2/gr) Interpolación

%Coeficiente de absorción de energía en aire para una Energía E_2

N_2 = spline(E,N,E_2); %(cm^2/gr) Interpolación

%Tasa de exposición para una energía E_1

*T_X1 = K * phi * E_1 * N_1; % R/s*

%Tasa de exposición para una energía E_2

*T_X2 = K * phi * E_2 * N_2; % R/s*

% Tasa de exposición total

T_X = T_X1 + T_X2; % (R/s)

% Coeficiente masico de absorción de energía del HOH (cm^2/gr) para E_1

W_1 = spline(E,W,E_1); %(cm^2/gr) Interpolación

% Coeficiente masico de absorción de energía del HOH (cm^2/gr) para E_2

W_2 = spline(E,W,E_2); %(cm^2/gr) Interpolación

% Tasa de Dosis para E_1

*T_H1 = alpha * T_X1 * (W_1/N_1)*3600; % mSv/h*

% Tasa de dosis para E_2

*T_H2 = alpha * T_X2 * (W_2/N_2)*3600; %mSv/h*

% Tasa de dosis total

T_H = (T_H1 + T_H2); % mSv/h

for i = 1:length(A)

if T_H(i) <= 0.01 % mSv/h para el POE

T_H(i) = (T_H1(i) + T_H2(i));

elseif T_H(i) > 0.01 % mSv/h para el POE

T_H(i) = 0;

end

end

T_H

% Estudio de la Tasa de Exposición y de dosis para el Cs-137

*phi_1 = A_1 / (4*pi*r^2); % fotonos/(cm^2*s)*

E_Ba = 0.6617; % MeV

% Coeficiente de absorción de energía en aire para una Energía E_Ba

M = spline(E,N,E_Ba); % (cm^2/gr) Interpolación

% Tasa de exposición para una energía E_1

*TX_Ba = K * phi_1 * E_Ba * M; % R/s*

% Coeficiente masico de absorción de energía del HOH (cm^2/gr) para E_1

W_0 = spline(E,W,E_Ba); % (cm^2/gr) Interpolación

% Tasa de Dosis

*T_H0 = alpha * TX_Ba * (W_0/M)*3600; % mSv/h*

for j = 1:length(A_1)

if T_H0(j) <= 0.01 % mSv/h para el POE

T_H0(j) = alpha . TX_Ba(j) .* (W_0/M)*3600;*

elseif T_H0(j) > 0.01 % mSv/h para el POE

T_H0(j) = 0;

end

end

T_H0

figure

plot(t,A)

title('Decaimiento de la Fuente Co-60' ...

, 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

xlabel('Tiempo(años)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

ylabel('Actividad(Bq)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

figure

plot(t,A_1)

title('Decaimiento de la Fuente Cs-137' ...

, 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

xlabel('Tiempo(años)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

ylabel('Actividad(Bq)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

figure

plot(t,A_2)

title('Decaimiento de la Fuente Y-90' ...

, 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

xlabel('Tiempo(años)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

ylabel('Actividad(Bq)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')

figure

plot(t,date)

title('Decaimiento de la Fuente Sr-90' ...

```
, 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
xlabel('Tiempo(años)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
ylabel('Actividad(Bq)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
```

figure

```
hold on
plot_handles = plot(t,A_2, 'b', t, date, '--g');
hold off
```

```
title('Padre (Sr-90) e Hija (Y-90) Equilibrio secular' ...
, 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
xlabel('Tiempo(años)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
ylabel('Actividad(Bq)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
```

figure
plot(t,A_3)

```
title('Decaimiento de la Fuente Tl-204' ...
, 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
xlabel('Tiempo(años)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
ylabel('Actividad(Bq)', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'demi')
```

Resultados

Tasa de dosis para el Co-60

T_H =

Columns 1 through 8

0.00124848175657 0.00123216837085 0.00121606814529 0.00120017829459
0.00118449606988 0.00116901875821 0.00115374368206 0.00113866819889

Columns 9 through 16

0.00112378970072 0.00110910561363 0.00109461339732 0.00108031054470
0.00106619458144 0.00105226306553 0.00103851358688 0.00102494376688

Columns 17 through 24

0.00101155125800 0.00099833374340 0.00098528893651 0.00097241458061
0.00095970844851 0.00094716834209 0.00093479209196 0.00092257755708

Columns 25 through 32

0.00091052262439 0.00089862520843 0.00088688325100 0.00087529472079
0.00086385761302 0.00085256994913 0.00084142977639 0.00083043516760

Columns 33 through 40

0.00081958422074 0.00080887505863 0.00079830582864 0.00078787470233
0.00077757987515 0.00076741956615 0.00075739201764 0.00074749549487

Columns 41 through 48

0.00073772828581 0.00072808870076 0.00071857507211 0.00070918575404
0.00069991912224 0.00069077357361 0.00068174752603 0.00067283941800

Columns 49 through 56

0.00066404770848 0.00065537087652 0.00064680742108 0.00063835586070
0.00063001473331 0.00062178259592 0.00061365802440 0.00060563961324

Columns 57 through 64

0.00059772597529 0.00058991574151 0.00058220756077 0.00057460009958
0.00056709204189 0.00055968208883 0.00055236895851 0.00054515138578

Columns 65 through 72

0.00053802812204 0.00053099793498 0.00052405960843 0.00051721194206
0.00051045375128 0.00050378386692 0.00049720113514 0.00049070441714

Columns 73 through 80

0.00048429258903 0.00047796454157 0.00047171918005 0.00046555542404
0.00045947220723 0.00045346847726 0.00044754319550 0.00044169533690

Columns 81 through 88

0.00043592388982 0.00043022785580 0.00042460624946 0.00041905809828
0.00041358244246 0.00040817833474 0.00040284484021 0.00039758103621

Columns 89 through 96

0.00039238601213 0.00038725886923 0.00038219872056 0.00037720469072
0.00037227591576 0.00036741154304 0.00036261073102 0.00035787264920

Columns 97 through 104

0.00035319647789 0.00034858140815 0.00034402664159 0.00033953139024
0.00033509487645 0.00033071633271 0.00032639500157 0.00032213013544

Columns 105 through 112

0.00031792099652 0.00031376685665 0.00030966699718 0.00030562070884
0.00030162729166 0.00029768605477 0.00029379631637 0.00028995740354

Columns 113 through 120

0.00028616865217 0.00028242940682 0.00027873902062 0.00027509685514
0.00027150228030 0.00026795467426 0.00026445342329 0.00026099792170

Columns 121 through 128

0.00025758757169 0.00025422178329 0.00025089997424 0.00024762156986
0.00024438600301 0.00024119271396 0.00023804115026 0.00023493076673

Columns 129 through 136

0.00023186102526 0.00022883139482 0.00022584135128 0.00022289037739
0.00021997796263 0.00021710360316 0.00021426680174 0.00021146706761

Columns 137 through 144

0.00020870391643 0.00020597687019 0.00020328545710 0.00020062921159
0.00019800767411 0.00019542039116 0.00019286691515 0.00019034680433

Columns 145 through 152

0.00018785962274 0.00018540494011 0.00018298233178 0.00018059137865
0.00017823166711 0.00017590278892 0.00017360434120 0.00017133592633

Columns 153 through 160

0.00016909715189 0.00016688763056 0.00016470698013 0.00016255482333
0.00016043078786 0.00015833450627 0.00015626561591 0.00015422375887

Columns 161 through 168

0.00015220858191 0.00015021973643 0.00014825687835 0.00014631966811
0.00014440777058 0.00014252085501 0.00014065859498 0.00013882066831

Columns 169 through 176

0.00013700675706 0.00013521654742 0.00013344972970 0.00013170599824
0.00012998505139 0.00012828659142 0.00012661032452 0.00012495596069

Columns 177 through 184

0.00012332321374 0.00012171180120 0.00012012144432 0.00011855186795
0.00011700280058 0.00011547397423 0.00011396512440 0.00011247599008

Columns 185 through 192

0.00011100631365 0.00010955584087 0.00010812432080 0.00010671150580
0.00010531715146 0.00010394101656 0.00010258286304 0.00010124245594

Columns 193 through 200

0.00009991956337 0.00009861395649 0.00009732540942 0.00009605369925
0.00009479860599 0.00009355991250 0.00009233740449 0.00009113087049

Columns 201 through 208

0.00008994010175 0.00008876489229 0.00008760503880 0.00008646034062
0.00008533059974 0.00008421562070 0.00008311521063 0.00008202917915

Columns 209 through 216

0.00008095733838 0.00007989950291 0.00007885548973 0.00007782511823
0.00007680821016 0.00007580458960 0.00007481408293 0.00007383651879

Columns 217 through 224

0.00007287172807 0.00007191954387 0.00007097980146 0.00007005233826
0.00006913699384 0.00006823360983 0.00006734202997 0.00006646210000

Columns 225 through 232

0.00006559366771 0.00006473658286 0.00006389069717 0.00006305586432
0.00006223193988 0.00006141878131 0.00006061624794 0.00005982420094

Columns 233 through 240

0.00005904250328 0.00005827101974 0.00005750961684 0.00005675816288
0.00005601652785 0.00005528458346 0.00005456220307 0.00005384926172

Columns 241 through 248

0.00005314563608 0.00005245120442 0.00005176584661 0.00005108944407
0.00005042187981 0.00004976303832 0.00004911280564 0.00004847106928

Columns 249 through 256

0.00004783771822 0.00004721264288 0.00004659573515 0.00004598688828
0.00004538599697 0.00004479295725 0.00004420766652 0.00004363002355

Columns 257 through 264

0.00004305992839 0.00004249728243 0.00004194198832 0.00004139395001
0.00004085307269 0.00004031926278 0.00003979242794 0.00003927247703

Columns 265 through 272

0.00003875932010 0.00003825286837 0.00003775303424 0.00003725973123
0.00003677287400 0.00003629237833 0.00003581816110 0.00003535014026

Columns 273 through 280

0.00003488823485 0.00003443236497 0.00003398245175 0.00003353841735
0.00003310018497 0.00003266767878 0.00003224082397 0.00003181954669

Columns 281 through 288

0.00003140377406 0.00003099343416 0.00003058845600 0.00003018876952
0.00002979430557 0.00002940499592 0.00002902077321 0.00002864157098

Columns 289 through 296

0.00002826732363 0.00002789796641 0.00002753343542 0.00002717366761
0.00002681860073 0.00002646817336 0.00002612232487 0.00002578099545

Columns 297 through 304

0.00002544412603 0.00002511165834 0.00002478353487 0.00002445969885
0.00002414009426 0.00002382466581 0.00002351335892 0.00002320611976

Columns 305 through 312

0.00002290289516 0.00002260363266 0.00002230828051 0.00002201678760
0.00002172910350 0.00002144517845 0.00002116496332 0.00002088840965

Columns 313 through 320

0.00002061546960 0.00002034609593 0.00002008024206 0.00001981786198
0.00001955891032 0.00001930334227 0.00001905111362 0.00001880218074

Columns 321 through 328

0.00001855650055 0.00001831403057 0.00001807472884 0.00001783855397
0.00001760546509 0.00001737542188 0.00001714838456 0.00001692431383

Columns 329 through 336

0.00001670317095 0.00001648491764 0.00001626951616 0.00001605692924
0.00001584712010 0.00001564005245 0.00001543569047 0.00001523399880

Columns 337 through 344

0.00001503494255 0.00001483848728 0.00001464459901 0.00001445324420
0.00001426438974 0.00001407800296 0.00001389405162 0.00001371250389

Columns 345 through 352

0.00001353332838 0.00001335649407 0.00001318197038 0.00001300972712
0.00001283973449 0.00001267196309 0.00001250638388 0.00001234296822

Columns 353 through 360

0.00001218168785 0.00001202251486 0.00001186542172 0.00001171038125
0.00001155736662 0.00001140635138 0.00001125730938 0.00001111021486

Columns 361 through 368

0.00001096504236 0.00001082176676 0.00001068036329 0.00001054080748
0.00001040307518 0.00001026714258 0.00001013298615 0.00001000058268

Columns 369 through 376

0.00000986990928 0.00000974094333 0.00000961366252 0.00000948804484
0.00000936406855 0.00000924171220 0.00000912095464 0.00000900177496

Columns 377 through 384

0.00000888415256 0.00000876806708 0.00000865349843 0.00000854042681
0.00000842883265 0.00000831869664 0.00000820999973 0.00000810272312

Columns 385 through 392

0.00000799684825 0.00000789235680 0.00000778923069 0.00000768745209
0.00000758700339 0.00000748786721 0.00000739002640 0.00000729346403

Columns 393 through 400

0.00000719816341 0.00000710410804 0.00000701128165 0.00000691966818
0.00000682925179 0.00000674001683 0.00000665194787 0.00000656502966

Columns 401 through 408

0.00000647924718 0.00000639458559 0.00000631103023 0.00000622856665
0.00000614718059 0.00000606685797 0.00000598758489 0.00000590934764

Columns 409 through 416

0.00000583213268 0.00000575592666 0.00000568071638 0.00000560648885
0.00000553323122 0.00000546093082 0.00000538957513 0.00000531915182

Columns 417 through 424

0.00000524964871 0.00000518105376 0.00000511335511 0.00000504654105
0.00000498060002 0.00000491552061 0.00000485129158 0.00000478790179

Columns 425 through 432

0.00000472534029 0.00000466359626 0.00000460265901 0.00000454251800
0.00000448316283 0.00000442458323 0.00000436676906 0.00000430971033

Columns 433 through 440

0.00000425339716 0.00000419781981 0.00000414296866 0.00000408883423
0.00000403540716 0.00000398267819 0.00000393063821 0.00000387927821

Columns 441 through 448

0.00000382858932 0.00000377856275 0.00000372918986 0.00000368046211
0.00000363237106 0.00000358490840 0.00000353806591 0.00000349183549

Columns 449 through 456

0.00000344620914 0.00000340117898 0.00000335673720 0.00000331287613
0.00000326958817 0.00000322686584 0.00000318470174 0.00000314308858

Columns 457 through 464

0.00000310201917 0.00000306148639 0.00000302148324 0.00000298200279
0.00000294303821 0.00000290458277 0.00000286662981 0.00000282917276

Columns 465 through 472

0.00000279220515 0.00000275572058 0.00000271971274 0.00000268417540
0.00000264910241 0.00000261448770 0.00000258032529 0.00000254660927

Columns 473 through 480

0.00000251333380 0.00000248049312 0.00000244808156 0.00000241609351
0.00000238452343 0.00000235336587 0.00000232261543 0.00000229226679

Columns 481 through 488

0.00000226231470 0.00000223275399 0.00000220357953 0.00000217478629
0.00000214636927 0.00000211832356 0.00000209064432 0.00000206332675

Columns 489 through 496

0.00000203636613 0.00000200975779 0.00000198349713 0.00000195757961
0.00000193200074 0.00000190675610 0.00000188184132 0.00000185725209

Columns 497 through 504

0.00000183298416 0.00000180903333 0.00000178539545 0.00000176206644
0.00000173904226 0.00000171631893 0.00000169389251 0.00000167175913

Columns 505 through 512

0.00000164991495 0.00000162835621 0.00000160707916 0.00000158608014
0.00000156535550 0.00000154490165 0.00000152471507 0.00000150479226

Columns 513 through 520

0.00000148512978 0.00000146572421 0.00000144657221 0.00000142767046
0.00000140901569 0.00000139060468 0.00000137243423 0.00000135450121

Columns 521 through 523

0.00000133680251 0.00000131933508 0.00000130209588

Tasa de dosis para el Bario Metaestable (Padre Cs-137)

T_H0 =

Columns 1 through 8

0.00369249110064 0.00368403424404 0.00367559675604 0.00366717859229
0.00365877970854 0.00365040006063 0.00364203960449 0.00363369829619

Columns 9 through 16

0.00362537609185 0.00361707294773 0.00360878882018 0.00360052366564
0.00359227744066 0.00358405010189 0.00357584160606 0.00356765191003

Columns 17 through 24

0.00355948097074 0.00355132874522 0.00354319519063 0.00353508026419
0.00352698392324 0.00351890612522 0.00351084682766 0.00350280598819

Columns 25 through 32

0.00349478356453 0.00348677951451 0.00347879379604 0.00347082636714
0.00346287718593 0.00345494621060 0.00344703339947 0.00343913871093

Columns 33 through 40

0.00343126210347 0.00342340353569 0.00341556296627 0.00340774035399
0.00339993565771 0.00339214883642 0.00338437984917 0.00337662865510

Columns 41 through 48

0.00336889521349 0.00336117948365 0.00335348142504 0.00334580099717
0.00333813815967 0.00333049287225 0.00332286509472 0.00331525478697

Columns 49 through 56

0.00330766190900 0.00330008642088 0.00329252828278 0.00328498745498
0.00327746389782 0.00326995757174 0.00326246843730 0.00325499645510

Columns 57 through 64

0.00324754158587 0.00324010379042 0.00323268302964 0.00322527926451
0.00321789245612 0.00321052256562 0.00320316955427 0.00319583338341

Columns 65 through 72

0.00318851401447 0.00318121140898 0.00317392552853 0.00316665633482
0.00315940378963 0.00315216785484 0.00314494849241 0.00313774566437

Columns 73 through 80

0.00313055933285 0.00312338946009 0.00311623600837 0.00310909894010
0.00310197821775 0.00309487380388 0.00308778566114 0.00308071375227

Columns 81 through 88

0.00307365804009 0.00306661848749 0.00305959505748 0.00305258771312
0.00304559641758 0.00303862113410 0.00303166182600 0.00302471845670

Columns 89 through 96

0.00301779098970 0.00301087938857 0.00300398361697 0.00299710363865
0.00299023941745 0.00298339091727 0.00297655810210 0.00296974093603

Columns 97 through 104

0.00296293938321 0.00295615340788 0.00294938297438 0.00294262804709
0.00293588859051 0.00292916456920 0.00292245594782 0.00291576269110

Columns 105 through 112

0.00290908476384 0.00290242213093 0.00289577475736 0.00288914260816
0.00288252564847 0.00287592384351 0.00286933715856 0.00286276555900

Columns 113 through 120

0.00285620901027 0.00284966747790 0.00284314092751 0.00283662932478
0.00283013263547 0.00282365082543 0.00281718386059 0.00281073170694

Columns 121 through 128

0.00280429433055 0.00279787169759 0.00279146377430 0.00278507052697
0.00277869192200 0.00277232792585 0.00276597850507 0.00275964362626

Columns 129 through 136

0.00275332325614 0.00274701736146 0.00274072590908 0.00273444886592
0.00272818619898 0.00272193787533 0.00271570386211 0.00270948412657

Columns 137 through 144

0.00270327863599 0.00269708735775 0.00269091025930 0.00268474730817
0.00267859847196 0.00267246371832 0.00266634301503 0.00266023632988

Columns 145 through 152

0.00265414363079 0.00264806488571 0.00264200006269 0.00263594912985
0.00262991205536 0.00262388880749 0.00261787935458 0.00261188366503

Columns 153 through 160

0.00260590170731 0.00259993344998 0.00259397886167 0.00258803791105
0.00258211056690 0.00257619679807 0.00257029657344 0.00256440986201

Columns 161 through 168

0.00255853663283 0.00255267685502 0.00254683049777 0.00254099753034
0.00253517792206 0.00252937164235 0.00252357866068 0.00251779894658

Columns 169 through 176

0.00251203246967 0.00250627919964 0.00250053910624 0.00249481215928
0.00248909832867 0.00248339758435 0.00247770989637 0.00247203523481

Columns 177 through 184

0.00246637356984 0.00246072487170 0.00245508911068 0.00244946625717
0.00244385628159 0.00243825915445 0.00243267484633 0.00242710332787

Columns 185 through 192

0.00242154456977 0.00241599854281 0.00241046521783 0.00240494456574
0.00239943655752 0.00239394116420 0.00238845835691 0.00238298810680

Columns 193 through 200

0.00237753038512 0.00237208516319 0.00236665241236 0.00236123210408
0.00235582420985 0.00235042870123 0.00234504554987 0.00233967472746

Columns 201 through 208

0.00233431620577 0.00232896995661 0.00232363595189 0.00231831416356
0.00231300456364 0.00230770712421 0.00230242181744 0.00229714861552

Columns 209 through 216

0.00229188749073 0.00228663841542 0.00228140136199 0.00227617630290
0.00227096321069 0.00226576205794 0.00226057281731 0.00225539546153

Columns 217 through 224

0.00225022996336 0.00224507629566 0.00223993443132 0.00223480434332
0.00222968600468 0.00222457938849 0.00221948446791 0.00221440121615

Columns 225 through 232

0.00220932960648 0.00220426961225 0.00219922120684 0.00219418436372
0.00218915905641 0.00218414525848 0.00217914294358 0.00217415208540

Columns 233 through 240

0.00216917265771 0.00216420463433 0.00215924798914 0.00215430269608
0.00214936872914 0.00214444606240 0.00213953466997 0.00213463452602

Columns 241 through 248

0.00212974560480 0.00212486788060 0.00212000132779 0.00211514592076
0.00211030163400 0.00210546844203 0.00210064631945 0.00209583524091

Columns 249 through 256

0.00209103518111 0.00208624611481 0.00208146801684 0.00207670086207
0.00207194462545 0.00206719928196 0.00206246480666 0.00205774117466

Columns 257 through 264

0.00205302836112 0.00204832634127 0.00204363509038 0.00203895458379
0.00203428479690 0.00202962570515 0.00202497728405 0.00202033950915

Columns 265 through 272

0.00201571235608 0.00201109580051 0.00200648981817 0.00200189438484
0.00199730947636 0.00199273506863 0.00198817113759 0.00198361765926

Columns 273 through 280

0.00197907460969 0.00197454196500 0.00197001970135 0.00196550779498
0.00196100622216 0.00195651495922 0.00195203398256 0.00194756326860

Columns 281 through 288

0.00194310279386 0.00193865253487 0.00193421246825 0.00192978257064
0.00192536281876 0.00192095318937 0.00191655365929 0.00191216420539

Columns 289 through 296

0.00190778480458 0.00190341543385 0.00189905607023 0.00189470669079
0.00189036727267 0.00188603779305 0.00188171822917 0.00187740855833

Columns 297 through 304

0.00187310875786 0.00186881880516 0.00186453867767 0.00186026835289
0.00185600780837 0.00185175702172 0.00184751597057 0.00184328463265

Columns 305 through 312

0.00183906298569 0.00183485100750 0.00183064867595 0.00182645596893
0.00182227286441 0.00181809934038 0.00181393537492 0.00180978094612

Columns 313 through 320

0.00180563603215 0.00180150061121 0.00179737466157 0.00179325816152
0.00178915108944 0.00178505342371 0.00178096514281 0.00177688622524

Columns 321 through 328

0.00177281664955 0.00176875639435 0.00176470543829 0.00176066376007
0.00175663133845 0.00175260815222 0.00174859418024 0.00174458940139

Columns 329 through 336

0.00174059379463 0.00173660733895 0.00173263001339 0.00172866179703
0.00172470266902 0.00172075260854 0.00171681159483 0.00171287960716

Columns 337 through 344

0.00170895662486 0.00170504262731 0.00170113759393 0.00169724150419
0.00169335433760 0.00168947607373 0.00168560669219 0.00168174617264

Columns 345 through 352

0.00167789449478 0.00167405163835 0.00167021758317 0.00166639230906
0.00166257579592 0.00165876802368 0.00165496897232 0.00165117862188

Columns 353 through 360

0.00164739695241 0.00164362394405 0.00163985957695 0.00163610383133
0.00163235668743 0.00162861812556 0.00162488812606 0.00162116666932

Columns 361 through 368

0.00161745373578 0.00161374930591 0.00161005336025 0.00160636587935
0.00160268684383 0.00159901623436 0.00159535403162 0.00159170021637

Columns 369 through 376

0.00158805476941 0.00158441767155 0.00158078890368 0.00157716844673
0.00157355628165 0.00156995238946 0.00156635675121 0.00156276934800

Columns 377 through 384

0.00155919016096 0.00155561917128 0.00155205636018 0.00154850170894
0.00154495519886 0.00154141681130 0.00153788652765 0.00153436432936

Columns 385 through 392

0.00153085019791 0.00152734411482 0.00152384606165 0.00152035602003
0.00151687397160 0.00151339989805 0.00150993378111 0.00150647560258

Columns 393 through 400

0.00150302534425 0.00149958298800 0.00149614851573 0.00149272190938
0.00148930315093 0.00148589222242 0.00148248910590 0.00147909378348

Columns 401 through 408

0.00147570623733 0.00147232644962 0.00146895440258 0.00146559007850
0.00146223345967 0.00145888452846 0.00145554326726 0.00145220965849

Columns 409 through 416

0.00144888368464 0.00144556532822 0.00144225457178 0.00143895139791
0.00143565578925 0.00143236772848 0.00142908719830 0.00142581418147

Columns 417 through 424

0.00142254866078 0.00141929061907 0.00141604003919 0.00141279690408
0.00140956119666 0.00140633289994 0.00140311199693 0.00139989847072

Columns 425 through 432

0.00139669230439 0.00139349348110 0.00139030198402 0.00138711779638
0.00138394090144 0.00138077128249 0.00137760892287 0.00137445380596

Columns 433 through 440

0.00137130591516 0.00136816523393 0.00136503174576 0.00136190543417
0.00135878628272 0.00135567427501 0.00135256939469 0.00134947162543

Columns 441 through 448

0.00134638095095 0.00134329735499 0.00134022082134 0.00133715133383
0.00133408887632 0.00133103343272 0.00132798498695 0.00132494352298

Columns 449 through 456

0.00132190902484 0.00131888147656 0.00131586086223 0.00131284716597
0.00130984037193 0.00130684046431 0.00130384742733 0.00130086124526

Columns 457 through 464

0.00129788190239 0.00129490938307 0.00129194367166 0.00128898475258
0.00128603261027 0.00128308722920 0.00128014859389 0.00127721668890

Columns 465 through 472

0.00127429149881 0.00127137300823 0.00126846120183 0.00126555606429
0.00126265758035 0.00125976573476 0.00125688051232 0.00125400189786

Columns 473 through 480

0.00125112987625 0.00124826443239 0.00124540555121 0.00124255321769
0.00123970741682 0.00123686813364 0.00123403535323 0.00123120906070

Columns 481 through 488

0.00122838924118 0.00122557587985 0.00122276896192 0.00121996847263
0.00121717439726 0.00121438672112 0.00121160542955 0.00120883050793

Columns 489 through 496

0.00120606194167 0.00120329971622 0.00120054381705 0.00119779422968
0.00119505093964 0.00119231393252 0.00118958319393 0.00118685870950

Columns 497 through 504

0.00118414046492 0.00118142844590 0.00117872263817 0.00117602302751
0.00117332959973 0.00117064234066 0.00116796123619 0.00116528627221

Columns 505 through 512

0.00116261743465 0.00115995470950 0.00115729808275 0.00115464754042
0.00115200306860 0.00114936465337 0.00114673228086 0.00114410593723

Columns 513 through 520

0.00114148560868 0.00113887128143 0.00113626294173 0.00113366057587
0.00113106417018 0.00112847371099 0.00112588918469 0.00112331057769

Columns 521 through 523

0.00112073787644 0.00111817106740 0.00111561013709