

00323

50



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"PROCEDIMIENTOS PARA LA CERTIFICACION DE UN LABORATORIO DE CALIBRACION DE DOSIMETROS DE LECTURA DIRECTA".

VERIS CON FALLA DE ORIGEN

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
F I S I C O
P R E S E N T A :
J O R G E O L G U I N G A R C I A

DIRECTOR DE TESIS:
MAESTRO EN CIENCIAS
FRANCISCO PABLO RAMIREZ GARCIA

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES



2003



FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR



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.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

Autoriza la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo intelectual

NOMBRE: OLGUN GARCIA

JORGE

FECHA: 13/NOVI/2003

FIRMA: [Signature]

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA EL
MIZERO

DRA. MARÍA DE LOURDES ESTEVA PERALTA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:
"Procedimientos para la certificación de un laboratorio de calibración de dosímetros
de lectura directa"

realizado por Olguín García Jorge

con número de cuenta 8526384-6 , quién cubrió los créditos de la carrera de Física.

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario

M. en C. Francisco Pablo Ramírez García

Propietario

Dr. Jorge Rickards Campbell

Propietario

Dr. José Julio Emilio Herrera Velázquez

Suplente

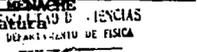
Dr. Fermín Castillo Mejía

Suplente

Dra. Beatriz Elizabeth Fuentes Madariaga

Consejo Departamental de Física

DRA. PATRICIA COLÁS
Coordinadora de Ciencias



DEPARTAMENTO DE FÍSICA

A Julio Olguín García (q.d.p.)
Cuya ayuda hizo posible la realización de mis estudios.

Agradecimientos:

A mis hijos y mi esposa, por su comprensión y ayuda a lo largo de la carrera.

A mi madre, por inculcarme el espíritu de lucha.

A Julio Antonio, Gloria Leticia, Gloria, Alfredo, Alma Margarita, Joel, Eloy,
Edén, Elba, Yuriko y Yoyis .

Índice

	Página
Índice	5
Introducción	9
1. Radiactividad	10
1.1 Ley de la transmutación radioactiva o del decaimiento exponencial	10
1.2 Vida media	11
1.3 Vida promedio	11
1.4 Actividad	11
1.5 Transformaciones radiactivas sucesivas.	12
1.6 Series radiactivas.	12
1.7 El núcleo atómico.	13
1.8 Fuerzas nucleares	14
1.9 Tipos de radiación.	15
2. Transformación.	16
2.1 Transformación alfa.	16
2.2 Transformación beta.	17
2.2.1 Emisión β^+ o de positrones.	17
2.2.2 Transformación β^- o de electrones.	18
2.2.3 Captura electrónica.	19
2.2.4 Efecto Auger	19
2.2.5 Conversión electrónica.	19
2.3 Decaimiento gamma.	19
3. Atenuación de rayos gamma por la materia	20
3.1 Coeficiente de atenuación	20
3.1.1 Tipos de coeficiente de atenuación.	20
3.2 Semiespesor.	21
3.3 Sección eficaz.	21
3.3.1 Sección eficaz total	21
3.3.2 Sección diferencial	22
3.4 Coeficiente de atenuación y efectos sobre la materia.	22
3.4.1 Efecto fotoeléctrico	23
3.4.1.1 Efecto fotoeléctrico cinemático	23
3.4.1.2 Interacción con la sección eficaz en el efecto fotoeléctrico	24
3.4.2 Efecto Compton.	25
3.4.2.1 Efecto Compton desde el punto de vista cinemático	25
3.4.2.2 Sección eficaz para el efecto Compton.	26
3.4.3 Producción de pares	27
3.4.3.1 Producción de pares desde el punto de vista cinemático	27
3.4.3.2 Sección eficaz para la producción de pares	27

4. Seguridad radiológica	28
4.1 Radiación ionizante.	28
4.2 Protección radiológica.	28
4.3 Dosimetría	29
4.4 Efectos biológicos.	29
4.5 Unidades de dosis.	30
4.5.1 Unidad de exposición.	30
4.5.2 Unidad de dosis absorbida.	31
4.5.3 Unidad equivalente de dosis	31
4.5.3.1 Factor de calidad Q	31
4.5.3.2 Equivalente de dosis efectivo H_E	32
4.5.3.3 Factor de ponderación del tejido	32
4.6 Síndromes letales	33
4.6.1 Síndrome de insuficiencia hematológica	33
4.6.2 Síndrome gastrointestinal	33
4.6.3 Síndrome de insuficiencia neurológica	33
4.7 Límites de dosis	33
5. Detectores	34
5.1 Eficiencia	34
5.2 Detectores de ionización	35
5.2.1 Cámaras de ionización	38
5.2.1.1 Dosímetros proporcionales	38
5.2.2 Contadores proporcionales	38
5.2.2.1 Eficiencia en los contadores proporcionales	38
5.2.3 Contadores Geiger-Müller	39
5.2.3.1 Eficiencia en los detectores Geiger-Müller	39
5.3 Detectores de centelleo	39
5.3.1 Centelleadores inorgánicos.	40
5.3.2 Centelleadores orgánicos	41
5.3.3 Tubo Fotomultiplicador	42
5.3.4 Acoplamiento de los detectores de centelleo.	43
5.3.5 Eficiencia intrínseca del detector de centelleo.	43
6. Requisitos legales para la certificación de un laboratorio	45
(Extracto de la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-024-NUCL-1995)	
7. Centro efectivo de detectores	51
7.1 Características generales de los detectores de lectura directa	51
7.2 Experimentos para encontrar el centro efectivo para detectores en donde el elemento detector tiene una geometría cilíndrica.	51
7.2.1 Geometría del experimento	52
7.2.1.1 Análisis del discriminante	53
7.3 Primer experimento	54

	Página	
7.3.1	Material	55
7.3.2	Cálculo del equivalente de dosis recibida durante el experimento	55
7.3.3	Desarrollo	56
7.3.4	Resultados	56
7.3.5	Incertidumbres	56
7.3.6	Comprobación	57
7.3.7	Conclusiones	57
7.4	Segundo experimento (discriminante negativo)	57
7.4.1	Resultados	58
7.5	Tercer experimento	58
7.5.1	Material	58
7.5.2	Cálculo del equivalente de dosis recibida durante el experimento	58
7.5.3	Desarrollo	59
7.5.4	Resultados	59
7.5.5	Análisis	59
7.5.6	Conclusiones	59
7.6	Conclusiones generales sobre el centro efectivo	60
8.	Experimentos de calibración de dosímetros	62
8.1	Primer experimento de calibración	62
8.1.1	Objetivo	62
8.1.2	Material	62
8.1.3	Desarrollo	63
8.1.4	Resultados	64
8.1.5	Observaciones	65
8.2	Segundo experimento de calibración	65
8.2.1	Descripción del dispositivo para calibrar	66
8.2.2	Material	67
8.2.3	Desarrollo para la calibración	67
8.2.4	Resultados	68
8.3	Equivalente de dosis absorbida	69
8.4	Conclusiones	70
9.	Valoración de los efectos no deseados en el proceso de calibrado	71
9.1	El diseño latino cuadrado	71
9.2	Primer experimento	72
9.2.1	Material	73
9.2.2	Desarrollo experimental	73
9.2.3	Resultados	73
9.2.4	Análisis de datos	74
9.2.5	Conclusiones	75
9.3	Segundo experimento	75
9.3.1	Material	75
9.3.2	Desarrollo experimental	75
9.3.3	Resultados	76

	Página	
9.3.4	Análisis	76
9.3.5	Conclusiones	77
9.4	Conclusiones generales	77
10. Conclusiones		78
10.1	Condiciones del laboratorio	78
10.2	Centro efectivo	78
10.3	Procedimiento de calibración	78
10.4	Dosis	78
10.5	Variables críticas en la calibración de dosímetros de lectura directa.	78
10.6	Importancia del certificado de calibración.	78
10.7	Necesidad de instrumentos calibrados para la calibración de dosímetros de lectura directa.	79
10.8	Tiempo de calibrado	79
10.9	Incertidumbres	79
Apéndice		80
Bibliografía		92

Introducción

El laboratorio de radiotrazado del Instituto Mexicano del Petróleo tiene como una de sus metas obtener la certificación para la calibración de detectores de lectura directa, con el objeto de ofrecer sus servicios a otros laboratorios del mismo Instituto y a particulares externos.

La presente tesis va encaminada a satisfacer los requerimientos para obtener esa certificación, apoyándose en la Norma Oficial Mexicana NOM-024-NUCL-1995. La estructura para el trabajo experimental desarrollado es la siguiente:

Para encontrar el centro efectivo del detector (ya que se desea considerar al detector como puntual, de acuerdo a la norma), debido al fácil manejo, mayor sensibilidad a la rapidez de exposición y a la geometría similar, se usa un detector de centelleo de Yoduro de sodio con trazas de Talio para realizar dos experimentos. Los resultados se trasladan al detector de lectura directa.

Una vez seleccionado el experimento adecuado y probado con los detectores de lectura directa, se realiza un procedimiento para que un POE (personal ocupacionalmente expuesto), a nivel técnico, encuentre el centro efectivo de cualquier detector en caso de que no haya mención de él en el manual.

Calibración. Se realizan dos experimentos de calibración:

El primero de ellos se realiza con una fuente de ^{137}Cs con una actividad de 3.7 MBq (100 μCi) calibrando 4 detectores de lectura directa.

El segundo se realiza con una fuente de ^{137}Cs con una actividad de 3370 MBq (10 mCi) y con un "banco" diseñado para tal fin, siempre cumpliendo con la norma.

En todos los experimentos se calcula la dosis absorbida por el POE y por el público, suponiendo que éste existiera mientras se realizan los experimentos.

Una vez elegido el experimento que se usará para la calibración, se realiza el procedimiento correspondiente.

Para probar el banco diseñado, se realizan experimentos para ver qué tanto afectan las variables no deseadas que se puedan presentar con este banco.

La presente tesis está escrita de la siguiente manera:

Los primeros tres capítulos tratan de conceptos de radiación, actividad, decaimiento radiactivo y atenuación de rayos gamma por la materia.

En el cuarto capítulo se resumen los conceptos de seguridad radiológica.

El quinto capítulo menciona el funcionamiento de los detectores.

El sexto capítulo es un extracto de la Norma Oficial Mexicana NOM-024-NUCL-1995.

En los últimos capítulos se exponen los experimentos desarrollados y se obtienen las conclusiones respectivas.

Finalmente, se cierra con un apéndice en donde se muestran los procedimientos creados por el presente trabajo.

1. Radiactividad

2.

En los núcleos de todos los átomos, por su contribución a las propiedades macroscópicas de los elementos, destacan dos partículas: protones y neutrones. Los primeros tienen un número que equilibra la carga del número de electrones circundantes. Los segundos contribuyen a la densidad específica del elemento; éstos últimos pueden variar en número dando lugar a los llamados *isótopos*.

Existen isótopos cuyos núcleos pueden sufrir una transformación espontánea para decaer en otros núcleos atómicos, acompañado de una emisión de partículas elementales o de una radiación electromagnética. Este fenómeno recibe el nombre de *radiactividad*; sólo los núcleos inestables sufren estas transformaciones.

Aunque no hay diferencia esencial, salvo en el origen, la radiactividad suele dividirse en natural y artificial. En el primer caso se encuentran los isótopos en los que la transformación de los núcleos se da en condiciones naturales, y en el segundo son generados por el hombre.

1.1 Ley de la transmutación radiactiva o del decaimiento exponencial

Los núcleos atómicos aislados se transforman independientemente uno de otro, de acuerdo a un fenómeno probabilístico que es característico de cada sustancia radiactiva. La probabilidad de que ocurra una transformación radiactiva, o desintegración, por unidad de tiempo se representa con la letra λ . Por esta definición de λ se puede representar a la probabilidad de que haya una transformación ($P(t)$) en el tiempo t . En el intervalo de tiempo δt , de un isótopo inestable cualquiera, se tiene la expresión:

$$P(t) = \lambda \delta t \quad (1.1)$$

Por otro lado si se considera una muestra de N núcleos al tiempo t , al transcurso de un tiempo δt se transforman δN núcleos. El número de núcleos transformados es proporcional al producto entre el tiempo y el número inicial de núcleos N que se tiene al tiempo t , es decir:

$$\delta N \propto N \delta t \quad (1.2a)$$

O bien:

$$\frac{\delta N}{N} \propto \delta t \quad (1.2b)$$

Pero el término de la derecha se puede interpretar como la probabilidad de que ocurra una desintegración, por lo que, de (1.1) y (1.2b) tenemos:

$$\lambda \delta t = -\frac{\delta N}{N}$$

El signo menos indica que el número de átomos decrece conforme el tiempo aumenta. Integrando desde N_0 , para $t = t_0$ hasta N_t para $t > t_0$ y haciendo $t_0 = 0$, se llega a la expresión:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

Esta ecuación recibe el nombre de ley de la transformación radiactiva o ley del decaimiento exponencial.

1.2 Vida media

La vida media, también llamado periodo de la semidesintegración, se define como el intervalo de tiempo T en el cual el número de átomos que se transforma decrece a la mitad; matemáticamente:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

De donde, despejando T , queda:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.4)$$

La vida media (T) de los núcleos radiactivos conocidos en el presente se encuentra entre los límites de 3×10^{-7} segundos hasta 5×10^{15} años.

1.3 Vida promedio

La vida promedio de los N_0 núcleos del isótopo inestable se obtiene mediante la integración de la expresión $t dN(t)$, dividida entre el número de núcleos N_0 , es decir, el tiempo de vida media τ . Matemáticamente es:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt \quad (1.5)$$

sustituyendo (1.3) en esta expresión se tiene:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$$

Integrando por partes se llega a la expresión:

$$\tau = -\lambda \left(\frac{t}{\lambda} e^{-\lambda t} + \frac{1}{\lambda^2} e^{-\lambda t} \right) \Big|_0^{\infty}$$

evaluando queda:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.6)$$

1.4 Actividad

La actividad A , está definida como el número de transformaciones por unidad de tiempo:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

De (1.3) se tiene:

$$A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

como $A(t=0) = \lambda N_0$ y haciendo $\lambda N_0 = A_0$, se llega a la expresión:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

La unidad para medir la actividad, en el Sistema Internacional de Unidades, es el recíproco del segundo, con el nombre especial de Becquerel (Bq), donde:

1 Bq = una transformación por segundo

Otra unidad usada, aunque está cayendo en desuso, es el Curie (Ci), definido originalmente como la actividad de un gramo de Radio-216. Una definición actualizada, se enuncia como la cantidad de material radiactivo en el que ocurren 3.7×10^{10} transformaciones por segundo, de donde se obtiene la equivalencia:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

En la práctica se usan múltiplos de Bq o submúltiplos de Ci, según las unidades que se estén usando.

1.5 Transformaciones radiactivas sucesivas

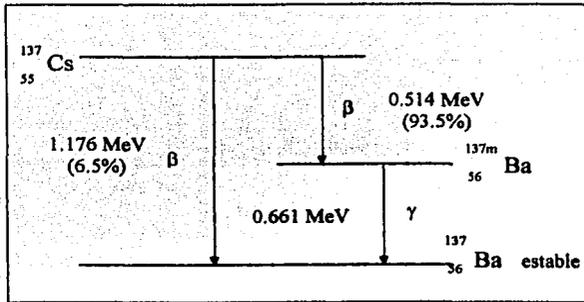
Algunas sustancias radiactivas decaen a átomos (hijos) cuyos núcleos también son inestables, estos a su vez decaen en átomos con núcleos inestables, y así sucesivamente, formando series o familias radiactivas.

Un ejemplo particular se muestra el esquema de decaimiento del $^{137}_{55}\text{Cs}$ en la figura 1.1

1.6 Series radiactivas

Existen cuatro familias radiactivas, de las cuales tres son naturales y una artificial. De las primeras se tienen:

- i) $^{232}_{90}\text{Th}$ que decae al $^{208}_{82}\text{Pb}$; esta serie se conoce como la *serie del torio* y su número de masa A es de la forma $4n$, con n natural.
- ii) $^{238}_{92}\text{U}$ que decae al $^{208}_{82}\text{Pb}$; esta serie se conoce como la *serie del uranio-radio* y su número de masa A es de la forma $4n+2$, con n natural (a esta serie pertenece el $^{234}_{92}\text{U}$).



Esquema del decaimiento del Cs-137

Figura 1.1

iii) ${}_{92}^{235}\text{U}$ que decae al ${}_{82}^{207}\text{Pb}$; esta serie se conoce como la *serie actinio uranio* y su número de masa A es de la forma $4n+3$, con n natural.

Finalmente la serie artificial es:

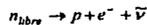
iv) ${}_{93}^{237}\text{Np}$ que decae al ${}_{83}^{209}\text{Bi}$; esta serie se conoce como la *serie del neptunio* y su número de masa A es de la forma $4n+1$, con n natural.

1.7 El núcleo atómico

El núcleo contiene protones y neutrones, los primeros con una carga positiva igual y de signo contrario a la de un electrón y una masa que supera a éste en 1836.149 veces. La segunda partícula carece de carga eléctrica y su masa es 1838.679 veces la masa del electrón.

La energía de la masa en reposo del protón es de 938.272 MeV y la del neutrón de 939.566 MeV.

El neutrón en estado libre es inestable y se transforma de acuerdo a la relación:



Donde p representa al protón, e^{-} al electrón y $\bar{\nu}$ a un antineutrino (la energía máxima del electrón es $E_0=782$ keV y su vida media de 15 minutos).

El núcleo, como una aproximación, se puede encerrar en una esfera de radio

$$r = 1.25 \times 10^{-13} A^{1/3} \text{ cm} \quad (1.8)$$

Donde A es el número de núclidos.

El núcleo atómico de una sustancia se puede representar por la notación:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En donde Z representa el número de protones, A representa al número de nucleones o número de masa y X el símbolo del elemento. Al número de neutrones se le representa con N , de modo que $A=Z+N$.

1.8 Fuerzas nucleares

La fuerza que mantiene unidas a las partículas en el núcleo se conoce con el nombre de fuerza nuclear y tiene las siguientes características:

A) Son de corto radio de acción (alrededor de 1 fm).

B) No depende de la carga.

C) No son centrales, es decir, que no se pueden representar como una fuerza dirigida a lo largo de la recta que une a los nucleones.

D) Tienen la propiedad de saturación.

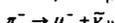
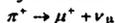
Para explicar estas fuerzas el físico japonés Yukawa propuso la existencia de unas partículas que hoy se conocen como mesones π o piones. Los piones tienen una masa 264 veces la del electrone ($140 \text{ MeV}/c^2$) y son de tres tipos:

π^+ , con carga +e y un tiempo de vida de $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$.

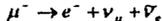
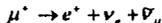
π^- , con carga -e y un tiempo de vida de $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$.

π^0 , sin carga y un tiempo de vida de $0.8 \times 10^{-16} \text{ s}$.³

Los piones con carga decaen a mesones μ y neutrinos o antineutrinos, según los esquemas:



Donde ν representa un neutrino y $\bar{\nu}$ representa a un antineutrino. (Estas partículas reciben el nombre de "leptones" del griego "ligeros". Algunas propiedades se muestran en la tabla 1.1). Los mesones, también con carga +e o bien -e, decaen a su vez bajo el esquema:



En donde e^- representa un electrón y e^+ representa un positrón.

Los piones neutros decaen en un 99.8% a dos cuantos de rayos gamma y el porcentaje restante en: un positrón, un electrón y un cuanto de rayos gamma; dos positrones dos electrones, o bien en tres cuantos de rayos gamma.

Según Yukawa, las fuerzas nucleares consisten en una nube de piones virtuales rodeando a los nucleones e intercambiándose bajo los siguientes esquemas:

A) Un protón y un neutrón: El protón cede un pion positivo convirtiéndose en neutrón, el neutrón lo recibe convirtiéndose en un protón y viceversa.

B) Un neutrón y un protón: El neutrón cede un pion negativo convirtiéndose en protón, el protón lo recibe convirtiéndose en un neutrón y viceversa.

A) nucleón 1 y nucleón 2: El nucleón 1 cede un pion neutro sin alterar su estado eléctrico, el nucleón 2 lo recibe también sin alterar su estado y viceversa.

³ Curso de Física General (tomo III), V. Savéliev. 1a. edición. Mir 1984, Moscú

Tabla 1.1
Algunas propiedades de los leptones

Familia	Carga	Masa (MeV/c ²)	spin	Vida media	
1	ν_e	0	$<1.5 \times 10^{-6}$	1/2	Estable
	e	-1	0.511	1/2	Estable
2	ν_μ	0	<0.17	1/2	Estable
	μ	-1	105.7	1/2	2.197×10^{-6} s
3	ν_τ	0	<18.2	1/2	Estable
	τ	-1	1777.1	1/2	2.900×10^{-13} s

1.9 Tipos de radiación

La radiación que se emite al decaer los núcleos de una sustancia se clasifica, en presencia de un campo magnético, en tres tipos. La primera se desvía como lo harían las cargas positivas. La segunda como las cargas negativas y la tercera no se ve afectada por el campo. Lo nombres que han recibido estos tres tipos de radiación son:

- A) Radiación alfa, constituida por núcleos de ${}^4_2\text{He}$ y debido a su carga positiva puede ser desviada por campos magnéticos y eléctricos, la velocidad con la que salen las partículas ⁴ está dentro del intervalo que va de $1.4 \times 10^7 \frac{m}{s}$ a los $2.2 \times 10^7 \frac{m}{s}$.
- B) Radiación beta, que consiste de electrones y por ende también son desviados en presencia de campos eléctricos y magnéticos, pero de dirección contraria a los primeros.
- C) Radiación gamma, ondas electromagnéticas de alta penetrabilidad y de comportamiento similar a la de los rayos X.

⁴ Kaplan, p 34.

2. Transformación

Los átomos de núcleos inestables pueden transformarse bajo diferentes esquemas, los cuales se clasifican a continuación:

2.1 Transformación alfa.

Se le llama así al núcleo que decae bajo el siguiente esquema:



Donde el primer término representa al núcleo inicial, el segundo el núcleo al que decae y el tercero es una partícula alfa, identificada como un núcleo de un átomo de helio (dos protones y dos neutrones).

Aplicando la ley de la conservación de la masa-energía:

$$m_X c^2 = m_Y c^2 + m_\alpha c^2 + K_Y + K_\alpha \quad (2.2)$$

Donde m_X , m_Y y m_α representan a la masa del núcleo padre, la masa del núcleo hijo y de la partícula alfa respectivamente y los dos últimos términos representan a las energías cinéticas del núcleo hijo y de la partícula alfa, en ese orden.

Para que tenga lugar este decaimiento es necesario que la suma de las energías cinéticas sea positiva. A esta suma se le conoce como el valor Q (es decir $Q = K_Y + K_\alpha$) y se identifica con la energía de amarre entre los núclidos.

De la conservación de momento, se tiene:

$$m_\alpha K_\alpha = m_Y K_Y \quad (2.3)$$

Pero la masa del núcleo está relacionada con la de la partícula alfa por medio de:

$$\frac{m_\alpha}{m_Y} = \frac{4}{A-4} = \frac{K_Y}{K_\alpha} \quad (2.4)$$

Sustituyendo la definición de Q en esta expresión se tiene:

$$Q = K_\alpha + K_Y = \frac{A-4}{4} K_Y + K_Y \quad , \quad \text{o también} \quad Q = K_\alpha + K_Y = K_\alpha + \frac{4}{A-4} K_\alpha \quad , \quad \text{llegando respectivamente a las siguientes expresiones:}$$

$$K_Y = \frac{4}{A} Q \quad \text{y} \quad K_\alpha = \frac{A-4}{A} Q \quad (2.5)$$

Donde Q pertenece a un pequeño intervalo de energía, y representa al número de masa. En el caso en que A es mucho mayor que 4, la energía del núcleo hijo es prácticamente nula y la energía cinética de la partícula alfa es cercana a Q.

Una gráfica del número de partículas alfa emitidas como función de su energía recibe el nombre de *espectro de energía*. El espectro de energía de la radiación alfa muestra que ésta es prácticamente monoenergética.

Algunos núcleos inestables, con energía E_n , se transforman en otros núcleos con energía de estado E_{n-1} (más bajo), generando emisiones de partículas alfa que, despreciando la energía cinética del núcleo hijo, se llevan toda la energía como energía cinética $K_\alpha = E_n - E_{n-1}$. A las partículas alfa así liberadas se les llama α_{n-1} . Puede suceder lo mismo con otros estados de energía creando diferentes α_i , con $i=0, 1, \dots, n-1$, con sus respectivos fotones gamma, excepto en $i=0$. Este fenómeno crea los espectros de energía de partículas alfa con diferentes valores discretos.

El exceso de energía $E_i - E_0$, en lugar de generar un fotón gamma, puede ser dado directamente a un electrón de la capa K, L o incluso M, expulsando al electrón del átomo. Los huecos son llenados por electrones de capas superiores emitiendo rayos X; este fenómeno se conoce con el nombre de *conversión interna*.

Las energías cinéticas de las partículas alfa están entre los valores de 4MeV y 9MeV.

La radiación alfa tiene en el aire un alcance de unos cuantos centímetros, formando a su paso pares de iones. En la formación de un par de iones en el aire la energía cinética de la partícula alfa disminuye 35eV, creando en su recorrido aproximadamente 10^2 pares de iones.

2.2 Transformación beta

En el decaimiento beta se pueden distinguir tres fenómenos:

2.2.1 Emisión β^+ o de positrones

Se llama así a la desintegración que ocurre de acuerdo al siguiente esquema de transformación:



En donde Z_X representa el núcleo padre; ${}^Z_{-1}Y$ al núcleo hijo; β^+ un positrón y ν un neutrino.

El espectro de energía de la emisión β^+ es continuo, es decir, la partícula β^+ tiene cualquier valor de energía cinética menor que una energía cinética máxima, K_{max} , si se considera que sólo se producen dos partículas. El núcleo hijo y β^+ , toda la energía del decaimiento se quedaría con el positrón, creando con ello un espectro de energía bien definido (discreto), cosa que no sucede experimentalmente. La solución fue dada por Pauli proponiendo la existencia de una partícula neutra y de masa igual a cero, a la cual llamó neutrino (que significa "pequeño neutrón"). De esta forma el neutrino comparte la energía cinética con la partícula β^+ y ésta puede alcanzar valores continuos. La existencia del neutrino fue demostrada experimentalmente por F. Reines y C. L. Cowan en 1956.

Por la ley de conservación de la masa-energía se tiene, para el átomo:

$$(m_X - Zm_e)c^2 = [m_Y - (Z-1)m_e]c^2 + m_\nu c^2 + K_Y + K_\beta + K_\nu \quad (2.7)$$

Donde m_X , m_Y , m_e y m_ν representan las masas del átomo padre, átomo hijo, electrón y positrón, respectivamente. Y K_γ , K_{β^+} y K_ν , representan la energía cinética del núcleo hijo, del positrón y del neutrino.

De la definición de Q se tiene:

$$Q = (m_X - m_Y - 2m_e)c^2 \quad (2.8)$$

De donde la condición para que suceda esta transformación es que la masa del padre sea mayor a la suma de la masa hijo con el doble de la masa del electrón.

Existen núcleos que emiten varios grupos de partículas β^+ , cada uno con su respectivo espectro de energía continuo y su energía máxima. Y es posible también, como en la transformación alfa, emisión de rayos gamma.

Una interpretación que se da a este fenómeno es que un protón del núcleo se convierte en un neutrón emitiendo un positrón y un neutrino, es decir, se transforma bajo el siguiente esquema:



2.2.2 Transformación β^- o de electrones

El esquema de desintegración de este tipo de emisión es similar al anterior difiriendo en que se emiten electrones en lugar de positrones, es decir:



En donde ${}^A_Z X$ representa el núcleo padre; ${}^A_{Z+1} Y$ al núcleo hijo; β^- un electrón y $\bar{\nu}$ un antineutrino.

Por la ley de conservación de la masa-energía se tiene:

$$(m_X - Zm_e)c^2 = [m_Y - (Z+1)m_e]c^2 + m_e c^2 + K_Y + K_{\beta^-} + K_\nu \quad (2.11)$$

Análogamente, la definición de Q se tiene:

$$Q = (m_X - m_Y)c^2 \quad (2.12)$$

Para que se logre este decaimiento se requiere que $Q > 0$ y, por lo tanto, que $m_X > m_Y$. El espectro de energía del decaimiento β^- tiene un comportamiento similar al del decaimiento β^+ . Y también es posible la emisión de rayos gamma.

La interpretación que se da a este fenómeno es que un neutrón del núcleo se convierte en un protón emitiendo un electrón y un antineutrino, como se muestra en el siguiente esquema:



2.2.3 Captura electrónica

Aunque en realidad no es una transformación radiactiva, este fenómeno que se produce debido a la desexcitación del núcleo. Consiste en la captura de un electrón, de la capa K (menos frecuentemente de las capas M o L), por el núcleo del átomo, de acuerdo al siguiente esquema:



2.2.4 Efecto Auger

Es un fenómeno colateral que está asociado a la captura electrónica, cuando un electrón de las capas inferiores es capturado por el núcleo, los electrones de las capas exteriores ocupan el hueco, la energía sobrante se puede transmitir en forma de rayos X o puede ser absorbido por algún electrón de las capas externas al átomo, quedando libre. Estos electrones se conocen como *electrones Auger*.

2.2.5 Conversión electrónica

Cuando un núcleo inestable cede su energía, ésta puede ser absorbida por un electrón y con ella salir del átomo.

2.3 Decaimiento gamma

Los átomos con núcleos que tienen un estado de energía mayor al estado base pueden regresar al estado base emitiendo fotones, radiación gamma; esta transformación se sigue del siguiente esquema:



En este esquema el número atómico Z y el número másico A son los mismos en el núcleo y lo único que los diferencia es el estado de excitación. Para hacer notar esto, en la notación se coloca una "m" al lado derecha del número másico A o "metaestable" (figura 1.1).

Los rayos gamma tienen una energía:

$$h\nu = E^m - E_0 \quad (2.16)$$

Donde E^m es la energía del núcleo excitado y E_0 es la energía del estado base. La conservación del momento para este caso es:

$$p_x = \frac{h\nu}{c} \quad (2.17)$$

Los rayos gamma son de gran energía y no son desviados por campos eléctricos o magnéticos, transfieren toda o parte de su energía a los electrones que se encuentran en el medio ionizándolo. Los mecanismos de interacción de los rayos gamma con la materia, con mayor probabilidad, son: 1) efecto fotoeléctrico; 2) Efecto Compton y 3) Producción de pares.

TEMAS CON
FALTA DE ORIGEN

3. Atenuación de rayos gamma por la materia

Al ser emitidos los rayos gamma, éstos interaccionan con la materia del medio, que funciona como atenuador, lo que significa que al interponer un material entre una fuente radiactiva y el detector disminuye el número de fotones que llegan al mismo. Los fotones ceden su energía al liberar electrones de los átomos, pueden colisionar con los electrones de las capas superiores de los átomos, o bien, son dispersados cediendo energía al átomo.

3.1 Coeficiente de atenuación

Cuando un haz homogéneo, colimado y de un pequeño ángulo sólido de rayos gamma incide sobre un espesor Δx de materia, sufre un cambio de intensidad ΔI que es proporcional a la intensidad original I y al espesor Δx . Matemáticamente:

$$\Delta I = -\mu I \Delta x \quad (3.1)$$

Donde μ es la constante de proporcionalidad conocida con el nombre de *coeficiente de atenuación* del material interpuesto. Al integrar la expresión 3.1, con las condiciones iniciales $I(t=0)=I_0$, se tiene:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.2)$$

La intensidad también se puede escribir como $I=Bh\nu$, en donde h es la constante de Plank, ν es la frecuencia y B es el número de fotones que atraviesan un área unitaria (1 cm^2), perpendicular al haz incidente, en un segundo.

3.1.1 Tipos de coeficiente de atenuación.

El coeficiente de atenuación μ puede ser de diferentes tipos y se expresa en unidades, de acuerdo a lo que se mide. El espesor x del absorbente, en consecuencia, se debe expresar en las unidades adecuadas para que el exponente de la expresión 3.1 sea adimensional.

- μ . Coeficiente de atenuación "lineal", sus unidades son en cm^{-1} y el espesor x está expresado en unidades lineales (cm).
- μ/ρ_x . Coeficiente de atenuación másico, sus unidades son cm^2/g y ρ_x esta definido como el producto entre la densidad volumétrica y el espesor del material atenuador, es decir la cantidad de masa por unidad de área.
- μ_e . Coeficiente de atenuación electrónico, sus unidades están dadas en $\text{cm}^2/\text{electrones}$ y x_e es el número de electrones por unidad de área.
- μ_a . Coeficiente de atenuación atómico, esta expresado en $\text{cm}^2/\text{átomos}$ y el espesor x_a está definido como el número de átomos por unidad de área.

La relación que existe entre las definiciones anteriores se puede expresar en las siguientes ecuaciones:

$$\mu_a = Z \mu_e \quad (3.3)$$

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A Z}{A} \mu_e \quad (3.4-a)$$

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N}{A} \mu_a \quad (3.4-b)$$

$$\mu = \rho N_{Av} \left(\frac{Z}{A} \right) \mu_a = \frac{\rho N_{Av}}{A} \mu_a \quad (3.5)$$

En donde Z representa el número atómico, A al peso atómico, N_{Av} , al número de Avogadro y ρ la densidad.

Al sustituir el coeficiente de atenuación másico (μ/ρ) en la expresión 3.2 y su correspondiente espesor x_p se tiene lo siguiente:

De 3.4 y 3.5 μ_a es aproximadamente el mismo para todos los elementos químicos en una cierta región (es decir, para elementos con número atómico similar) y el factor Z/A varía lentamente, conforme Z aumenta su valor. De donde μ/ρ es aproximadamente una función de Z . Por otro lado la variación de x_p es muy lenta de elemento a elemento, por lo tanto cuando mayor es la densidad del elemento atenuador menor es el espesor necesario para atenuar la radiación.

3.2 Semiespesor

El semiespesor $x_{1/2}$ está definido como el espesor de material atenuador que es necesario para reducir la intensidad de la radiación incidente a la mitad de su valor inicial, de modo que sustituyendo $I=I_0/2$ en la expresión 3.2 se puede encontrar que:

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad 3.6$$

3.3 Sección eficaz

Existen tres definiciones para la sección eficaz, de acuerdo al tipo de colisión que se da entre las partículas incidentes (fotones), y las partículas de la materia, y a las partículas resultantes.

Considerando como blanco una lámina delgada con partículas B distribuidas al azar sobre su superficie, entonces la sección eficaz total está definida como la probabilidad de que una partícula A incidente sobre la lámina experimente una interacción con alguna partícula B, dividida entre el número de partículas por unidad de área, es decir:

$$\sigma_T = \frac{P}{N} \quad (3.7)$$

En donde P representa la probabilidad, N el número de partículas por unidad de área y σ_T la sección eficaz total.

3.3.1 Sección eficaz total

La sección eficaz total se puede escribir como:

$$\sigma_T = \sigma_B + \sigma_{AB \rightarrow CD} \quad (3.8)$$

Donde σ_e es la sección eficaz cuando el choque entre las partículas A y B es elástico y $\sigma_{AB \rightarrow CD}$ es la sección eficaz en donde la partícula incidente A reacciona con la partícula B, produciendo una partícula C y otra D.

En la expresión 3.8 se debe cumplir

$$P_e + P_{AB \rightarrow CD} = 1$$

En donde P_e es la probabilidad de que ocurra el choque elástico y $P_{AB \rightarrow CD}$ es la probabilidad de que se produzca una reacción $A+B \rightarrow C+D$.

La sección eficaz total σ_T es una función que depende de la energía de la partícula incidente (E) y de los ángulos polares θ y ϕ respecto a un origen. Este origen está ubicado en la intersección del haz incidente y el plano del blanco.

3.3.2 Sección diferencial

Se define como la probabilidad de que una partícula incidente sea dispersada en una dirección contenida dentro de un ángulo sólido $d\Omega$, en donde la lámina del blanco es tal que la densidad superficial es la unidad. En este caso para obtener la sección eficaz total basta integrar la sección eficaz diferencial sobre las direcciones del ángulo sólido, es decir:

$$\sigma(E) = \int_0^{4\pi} \sigma(E, \theta, \phi) d\Omega \quad (3.9)$$

3.4 Coeficiente de atenuación y efectos sobre la materia

El coeficiente de absorción depende, principalmente, de tres fenómenos que se presentan al interaccionar los fotones de rayos gamma con la materia. Estos fenómenos son, el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares. Esta dependencia se puede representar como:

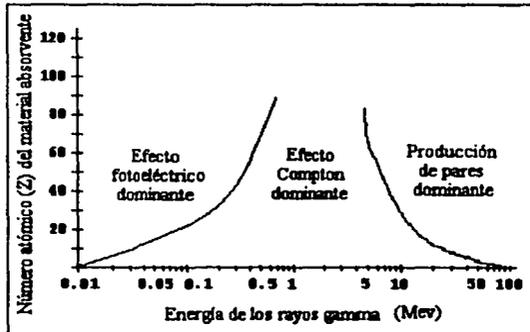


figura 3.1

$$\mu(E) = \tau(E) + \sigma(E) + \kappa(E) \quad (3.10)$$

En donde el primer sumando representa la contribución debida al efecto fotoeléctrico τ , el segundo al efecto Compton σ y el tercero a la producción de pares κ .

Los fenómenos marcados en la expresión 3.10 dependen de la energía de los fotones incidentes (E), como se muestra explícitamente en la expresión, y experimentalmente se encuentra una gráfica como la de la figura 3.1. Otros fenómenos que pueden ocurrir, pero que se desprecian, son: a) Colisiones Compton, en donde las colisiones se dan con el núcleo; y b) El efecto Raleigh.

3.4.1 Efecto fotoeléctrico

Como se muestra en la figura 3.1, este fenómeno se presenta a bajas energías y con electrones unidos a un átomo. Se puede dividir en dos partes, una de ellas desde el punto de vista cinemático y el otro desde la sección eficaz.

3.4.1.1 Efecto fotoeléctrico cinemático

Un fotón incidente de energía $h\nu$ colisiona con un electrón cediendo toda su energía. El electrón está ligado al átomo con una energía E_b , conocida como energía de ionización.

La energía cinética E_k con la que es expulsado el electrón es:

$$E_k = h\nu - E_b - E_n \quad (3.11)$$

En donde E_n es la energía del átomo, que en general es despreciable.

La vacancia producida por un fotoelectrón es llenada por electrones de niveles más excitados con la emisión de radiación electromagnética (rayos X).

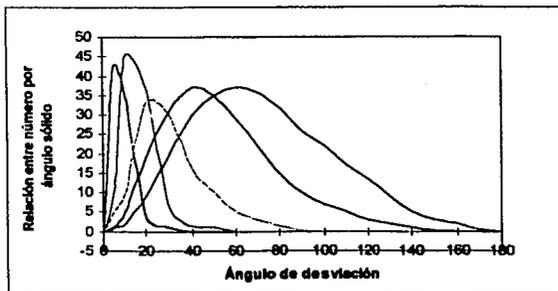


figura 3.2

Las gráficas representan la distribución direccional de fotoelectrones. Las áreas no están normalizadas para las distintas energías de los fotones incidentes. El primer pico de la figura corresponde a 2.79 MeV, el segundo a 1.3, el tercero a 0.511, el cuarto a 0.367, el quinto a 0.0918 y el último a 0.0202 MeV.

"Para los rayos gamma de suficiente energía, el origen más probable de fotoelectrones está fuertemente limitado a la capa K del átomo" [Knoll, pp 50].

3.4.1.2 Interacción con la sección eficaz en el efecto fotoeléctrico

La distribución de fotoelectrones como función del ángulo θ por unidad de ángulo sólido se muestra en la figura 3.2

La interacción para la sección eficaz por átomo para el efecto fotoeléctrico se obtiene integrando para todos los ángulos de emisión fotoeléctrica y se ha encontrado como:

$$\tau_a = K \frac{Z^n}{(h\nu)^m} \quad \text{con unidades en cm}^2/\text{átomo} \quad (3.12)$$

En donde K es una constante.

$n=4$ para $h\nu = 0.1 \text{ MeV}$ ascendiendo gradualmente n a un valor de 4.6 cuando $h\nu = 3 \text{ MeV}$ y

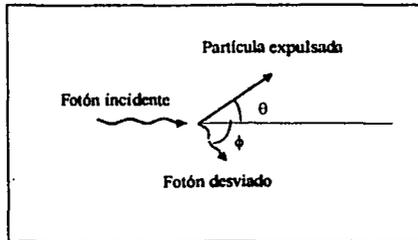
$m=3$ para $h\nu = 0.1 \text{ MeV}$, decreciendo gradualmente n a un valor de uno para 5 MeV

El efecto fotoeléctrico es dominante en la región para la cual el valor de $h\nu$ es 0.1 MeV o menor. De donde, para la sección eficaz se tiene.

$$\tau_a \propto \frac{Z^4}{(h\nu)^3} \quad (3.13)$$

De las expresiones 3.3 y 3.4-a, se puede obtener:

$$\frac{\mu}{\rho} = \left(\frac{N_A Z}{A} \right) \frac{\mu_a}{Z} \quad (3.14)$$



Efecto Compton

figura 3.3

En donde la expresión entre paréntesis representa el número de electrones por gramo de material y prácticamente es constante. Interpretando τ_e en lugar μ_e y sustituyendo en 3.15 se tiene:

$$\frac{\tau_e}{\rho} \propto \left(\frac{Z}{h\nu} \right)^2 \quad (3.15)$$

[En esta expresión la proporcionalidad es aproximada].

Para un haz de energía determinada, este fenómeno es representativo en presencia de un atenuante con un número atómico Z alto, como el plomo.

3.4.2 Efecto Compton

Al incrementar la energía de la radiación el efecto Compton predomina sobre el efecto fotoeléctrico; ver figura 3.1. Los fotones del haz incidente prácticamente ven a los electrones de los orbitales exteriores, de los átomos del material atenuante, como electrones libres. La interacción entre estas partículas, el fotón y el electrón, se puede representar como una colisión elástica.

3.4.2.1 Efecto Compton desde el punto de vista cinemático

El esquema mostrado en la figura 3.3 muestra el efecto Compton, en donde un fotón incidente de energía $h\nu$ colisiona con un electrón que se puede considerar en reposo. Después de la colisión, el fotón cede parte de su energía al electrón y es desviado un ángulo ϕ .

Para que se cumpla la conservación de energía se debe tener:

$$E_k = h\nu - h\nu' + E_e \quad (3.16)$$

En donde E_k es la energía cinética con la que sale el electrón y $h\nu'$ es la energía del fotón después de la colisión y E_e es la energía de escape del electrón del átomo.

Para la conservación del momento se tiene para el eje horizontal

$$h\nu = h\nu' \cos \phi + cp \cos \theta \quad (3.17)$$

En donde p representa el momentum del electrón.

Para el eje vertical se tiene:

$$0 = -h\nu' \sin \phi + cp \sin \theta$$



De éstas tres ecuaciones [3.16, 3.17 y 3.18] se tienen 5 variables: la energía del fotón incidente; la energía del fotón después de la colisión; la energía cinética del electrón y, finalmente, los ángulos ϕ y θ . De ellas se pueden encontrar las siguientes expresiones:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \left(\frac{h\nu}{m_0c^2}\right)(1 - \cos\phi)} \quad (3.19)$$

$$\cot\theta = \left(1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}\right) \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (3.20)$$

3.4.2.2 Sección eficaz para el efecto Compton

Thomson dedujo que la sección eficaz diferencial para un fotón dispersado un ángulo ϕ por unidad de ángulo sólido se puede expresar como:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_\phi} = \frac{r_0^2}{2} (1 + \cos^2\phi) \quad (3.21)$$

En donde $r_0 = e^2/(m_0c^2) = 2.818 \times 10^{-13}$ cm es conocido como el radio clásico del electrón.

La sección eficaz total se encuentra integrando sobre toda la dirección de la dispersión. Debido a la simetría cilíndrica $d\Omega_\phi = 2\pi \sin\phi d\phi$

$$\sigma_0 = \int_{\phi=0}^{\pi} d\sigma = \frac{8\pi r_0^2}{3} = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2/\text{electrón} \quad (3.22)$$

El resultado anterior se puede interpretar como la probabilidad de que ocurra una dispersión cuando un solo fotón colisiona con un sólo electrón por cm^2 .

En 1928 Klein y Nishina (K-N) perfeccionaron los cálculos para encontrar una sección eficaz diferencial, llegando a la expresión:

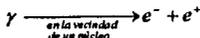
$$\frac{d\sigma}{d\Omega_\phi} = \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{h\nu'}{h\nu}\right) \left(\frac{h\nu}{h\nu'} + \frac{h\nu'}{h\nu} - \sin^2\theta\right) \quad (3.23)$$

Para bajas energías, $h\nu' = h\nu$ al sustituir en 3.23 se obtiene la ecuación 3.22.

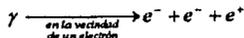
3.4.3 Producción de pares

En la producción de pares un fotón desaparece dando lugar a la aparición a un electrón y un positrón, cuando el haz incidente tiene energías mayores que 1.024 MeV ($2m_0c^2$, con m_0 la masa del electrón).

Para que ocurra este fenómeno es necesaria la presencia de una fuerza de campo coulombiano, usualmente cerca del núcleo atómico aunque también ocurre en el campo eléctrico de un electrón atómico. Este último proceso recibe el nombre de producción triple ya que salen del átomo tres partículas dos electrones y un positrón. Los esquemas de la formación de pares tienen la siguiente forma:



Para la triple producción, el esquema es:



La energía umbral del fotón para la formación de pares es, prácticamente $h\nu > 2m_0c^2$ y para la formación de la producción triple es $h\nu > 4m_0c^2$.

3.4.3.1 Producción de pares desde el punto de vista cinemático

En la creación de pares el fotón incide con una energía $h\nu$ cede toda su energía en la creación de los pares y en la energía cinética de los mismos. Matemáticamente:

$$h\nu = 2m_0c^2 + T + T^+$$

En donde T^+ y T^- son las energías cinéticas del positrón y electrón respectivamente, las cuales son del mismo valor, $T^+ = T^- = T$, es decir:

$$T = \frac{h\nu - 2m_0c^2}{2} \quad (3.24)$$

3.4.3.2 Sección eficaz para la producción de pares

En este caso la sección eficaz es proporcional al cuadrado de Z y el coeficiente de atenuación másico es proporcional a Z , excepto para el hidrógeno [Kaplan pp 413].

Notas:

Las figuras 3.1 y 3.3 fueron tomadas del libro "Nuclear Physics. Kaplan, Irving. 2a. edition. Addison & Wesley Publication Co. Mass. 1964"

La figura 3.2 fue tomada del libro "Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry, Frank H. Attix, A. Wiley-Interscience Publication, N. York, 1980"

ESTAS CON
FALLA DE ORIGEN

4. Seguridad radiológica

Cuando el material absorbente de radiación es biológico puede tener severos daños, como quemaduras, modificación de material genético (DNA) y a la célula. Por estos daños puede morir la célula o incrementar el riesgo de inducción de cáncer.

4.1 Radiación ionizante

La radiación ionizante es aquella de naturaleza electromagnética o corpuscular que altera la estructura de los átomos de la materia que atraviesa, por medio de una ionización.

La radiación ionizante puede ser de los siguientes tipos:

- Partículas alfa, α . Este tipo de radiación no penetra la piel y solo es de riesgo cuando se encuentra en el torrente sanguíneo. Se encuentra en la superficie de la tierra y se detiene fácilmente con la hoja de un papel.
- Partículas beta, β . Estas partículas en radiación son de alto riesgo, pero se puede detener con aluminio. Abunda generalmente en el aire, agua y alimentos.
- Rayos gamma (γ) y rayos X, radiación de origen electromagnético. Se encuentra naturalmente en el ambiente (rayos cósmicos), son altamente penetrantes. Para detenerlos es necesario utilizar plomo o materiales con mayor densidad.
- Neutrones. Representan un gran riesgo y genera material radiactivo, son absorbidos por el cuerpo humano con suma facilidad debido al su alto contenido de hidrógeno. La fuente natural de neutrones es el uranio. Para blindar los neutrones se usa cadmio, helio e hidrógeno, principalmente.

La radiación X y γ se encuentra, dentro del espectro electromagnético, a la derecha de la zona ultravioleta, o sea que presentan altas energías y por lo tanto corta longitud de onda. Con excepción de neutrones la radiación ionizante tiene diversas aplicaciones médicas para diagnóstico y curación de enfermedades.

4.2 Protección radiológica

A mediano plazo la energía nuclear será el sustento de las actividades para generar energía para consumo humano. Actualmente el uso de fuentes de radiación ionizante se ha ido extendiendo en la investigación y en la industria, por ello no deben perderse de vista los principios de seguridad radiológica.

La I.C.R.P. (International Council on Radiation Protection) propone las reglas de seguridad radiológica que deben aplicarse, por medio de reglamentos y normas en los países que usan material radiactivo. "El uso de fuentes radioactivas debe hacerse bajo los siguientes principios:

- Justificación. No debe aprobarse ningún caso el uso de material radiactivo a menos que sea rentable y no haya otras alteraciones al ambiente. Para ello deben medirse los pros y los contras de los usos de dichas fuentes.
- Optimización. La concepción, diseño, planificación, uso y aplicación de material radiactivo deben asegurar que las exposiciones se mantengan tan bajas como razonablemente pueda lograrse. [Concepto ALARA]

- Limitación de dosis. [...]deben establecerse límites adecuados [...], que permitan evitar que la combinación de las dosis debidas a prácticas actuales y futuras den lugar a una exposición [a radiación ionizante].”¹

4.3 Dosimetría

“Dosimetría” o “dosimetría de la radiación ionizante” es el nombre que se le da al conjunto de técnicas para poder cuantificar las medidas necesarias para evitar daños biológicos. Para ello se pueden trazar los siguientes factores importantes o puntos característicos:

- Tipo de emisión e intensidad (característica de la fuente).
- Distribución de los pares de iones formados que dependen del tipo de radiación y del mecanismo de interacción.
- La naturaleza del tejido irradiado.

4.4 Efectos biológicos

La célula es considerada la unidad fundamental de la vida, se puede dividir en tres partes: pared celular, citoplasma y núcleo. En el núcleo está contenida la información genética para la reproducción celular, esta información se encuentra en unas estructuras moleculares llamadas cromosomas. Los cromosomas, desde el punto de vista físico, tienen una alta densidad electrónica.

Las células se clasifican en dos tipos:

Células somáticas. Con capacidad para multiplicarse y con 23 pares de cromosomas en el ser humano.

Células germinales o sexuales. Contienen 23 cromosomas en el ser humano y se multiplican cuando existe fecundación entre dos células generadas por individuos del sexo opuesto: espermatozoide y óvulo.

De acuerdo a la relación entre la dosis de radiación y el efecto biológico se pueden clasificar dos tipos de efectos:

- Efectos estocásticos, son efectos aleatorios, que varían de acuerdo a diferentes causas como ambientales, hereditarias y otras; en este caso los efectos son diferidos.
- Efectos determinísticos o no estocásticos, para los cuales existe un umbral a partir del cual el efecto biológico es función de la dosis recibida. Este umbral varía de acuerdo a las condiciones de la dosis recibidas y de las características del individuo. Los órganos más sensibles son las gónadas (ovarios y testículos) y la médula ósea.

Sobrepasando el umbral de dosis (caso extremo), desde el punto de vista fisiológico, se puede presentar una destrucción de tejidos vivos, quemaduras y/o incremento en el riesgo de inducción de cáncer y, dependiendo del daño, esto se puede manifestar como alteraciones cromosómicas (daños tardíos) y alteración en el desarrollo celular.

De acuerdo al tipo de célula afectada los daños son los siguientes:

En células somáticas, temporalmente los daños son precoces o tardíos, desde algunos meses a varios años. Fisiológicamente, en el caso de la destrucción celular (daños precoces) y reproducción acelerada de las células, lo que se manifiesta con la aparición de tumores y en casos extremos cáncer.

¹ Manual de Seguridad radiológica. Francisco Pablo Ramírez y María Eugenia Cortés Islas. IMP

En células germinales se puede dar una alteración en la información genética, como por ejemplo cambio en el color de los ojos, síndrome de Down o muerte en alguna etapa temprana de los descendientes.

Un modelo propuesto de las secuelas desde la interacción con radiación hasta tener un efecto observable es el siguiente:

- Efecto primario. Absorción de radiación ionizante en alrededor de 10^{13} segundos, generalmente átomos y moléculas ionizadas.
- Reacciones fisico-químicas. Caracterizada por la presencia de radicales libres de alta reactividad, sucediendo en un tiempo de 10^{-9} a 10^{-6} segundos.
- Reacciones químicas en cadena. Reacciones que desarrolla el organismo para recobrar el equilibrio químico, cuya duración va de una fracción de segundo hasta semanas.
- Fase histopatológica. Lesiones perceptibles que pueden ser reversibles o irreversibles. Los daños sobre las células, tanto germinales como somáticas, consisten en mutaciones genéticas o su aniquilamiento.

En caso de una sobreexposición los efectos comunes en cualquier caso son: Náusea y vómito; malestar y fatiga; aumento de temperatura; cambios sanguíneos.

La radiación que recibe un ente biológico puede provenir además del ambiente, aunque en muy bajas dosis. Las fuentes ambientales son de dos tipos: naturales o artificiales. Las primeras están dados por los siguientes factores: radiación cósmica; en la dieta; radiación debida al radón, localizado principalmente en donde hay magma volcánico; radiación terrestre. La radiación ambiental artificial que se recibe se debe a: el fumar cigarrillos; aplicaciones médicas; materiales de construcción; detectores de humo; radiación debida a pruebas nucleares ("fallout"), principalmente.

4.5 Unidades de dosis

Para la dosimetría son importantes las siguientes unidades:

4.5.1 Unidad de exposición

Definida como "la razón entre el valor absoluto de iones del mismo signo (δQ) producido en una masa de aire δm y cuando todos los fotones son detenidos completamente dentro de un volumen de aire"⁽⁴⁾. La exposición se denota con la letra X, de modo que la definición se puede representar por medio de la expresión:

$$X = \frac{\delta Q}{\delta m} \quad (4.1)$$

La unidad en el SI para medir la unidad de exposición es el Coulomb por kilogramo de aire (C/Kg) y esta definido como "la cantidad de radiación electromagnética de rayos X o gamma, que produce en un Kg de aire seco a condiciones estándar, una cantidad de iones cuya carga total es de un Coulomb de cada signo"⁽³⁾

Existe una unidad equivalente llamada Roentgen (R) que, aunque está cayendo en desuso, está muy difundida y su definición es la siguiente: "Cantidad de radiación electromagnética, de rayos X o gamma, que produce en un cm^3 de aire seco, a condiciones estándar, la formación de pares de iones cuya carga total es de un esu para cada signo"⁽³⁾.

4.5.2 Unidad de dosis absorbida

La unidad de dosis absorbida esta definida como la cantidad de energía δE absorbida que cede la radiación en un elemento de masa del material δm , se denota con la letra D. Matemáticamente:

$$D = \frac{\delta E}{\delta m} \quad (4.2)$$

El patrón de medida para la unidad de dosis absorbida, de acuerdo al SI, es el Gray (Gy) y está definido como la cantidad de radiación absorbida equivalente a un Joule de energía por Kg de material.

Una unidad alternativa, y también muy difundida, es el rad definido como la dosis absorbida que resulta de la absorción de 100 ergios por gramo de material.

De las últimas dos definiciones se sigue que:

$$1 \text{Gy} = 100 \text{rad} \quad (4.3)$$

4.5.3 Unidad equivalente de dosis

Esta unidad es usada como parámetro para predecir la probabilidad o severidad de un daño debido a la radiación recibida, es decir "el equivalente de dosis especifica el efecto biológico para una misma dosis absorbida, o bien especifica, el efecto de un tipo particular de radiación"⁴³. Se representa con la letra H y está definido como el producto de la unidad de dosis absorbida D; el factor de calidad de la radiación Q. La expresión para H se muestra a continuación:

$$H = D Q \quad (4.4)$$

La unidad del equivalente de dosis es el Joule sobre kilogramo (J/Kg), utilizándose el nombre específico de sievert (Sv). La unidad que se usó hasta 1980 fue el rem, con la equivalencia siguiente:

$$1 \text{ rem} = 1 \times 10^{-2} \text{ Sv}$$

4.5.3.1 Factor de calidad Q

El factor de calidad incluye el efecto de la distribución microscópica de la energía absorbida. Se define en función del poder de frenado por colisión que sufre la radiación. Los valores para diferentes tipos de radiación se muestran en la tabla 4.1:

TABLA 4.1²

Tipo de radiación	Q
Fotones (rayos X y γ) con energías mayores a 30KeV	1
Electrones con energías mayores a 30 KeV	1
Partículas β de tritio	2
Partículas α , protones y iones pesados	20
Neutrones:	
Con energías menores a 10 KeV	5
" " entre 10 KeV y 100 KeV	10
" " entre 100 KeV y 2 MeV	20
" " entre 2 MeV y 20 M eV	10
" " mayores a 20 M eV	5

4.5.3.2 Equivalente de dosis efectivo H_E

Es la suma ponderada de los equivalentes de dosis para los diferentes tejidos del cuerpo humano. Se calcula mediante la relación:

$$H_E = w_T H_T \quad (4.5)$$

En donde H_T es el equivalente de dosis para cada tejido y w_T es el factor de ponderación por tejido.

4.5.3.3 Factor de ponderación del tejido

Representan una "distribución no uniforme de la radiación en diversos tejidos, que modifican los tejidos biológicos potencialmente dañados por la dosis absorbida". El valor de w_T se muestra en la tabla 4.2:

Tabla 4.2³

Factores de ponderación por tejido

Tejido	w_T
Gónadas	0.25
Médula roja	0.12
Pulmón	0.12
Mama	0.15
Tiroides	0.03
Hueso (superficie)	0.03
Resto	0.30

² De acuerdo a la Norme Oficial Mexicana NOM-001-1994, pp3

³ De acuerdo a la Norme Oficial Mexicana NOM-001-1994, pp3



4.6 Síndromes letales

Cuando un valor determinado de dosis de radiación es recibido por un individuo, se tienen los tres síndromes asociados estadísticamente a la dosis recibida. La estadística se refiere al síndrome del 50% de la población que ha recibido la dosis en Grays durante n días.

4.6.1 Síndrome de insuficiencia hematológica

Con una dosis desde 2 hasta 5 Gy. Los efectos se manifiestan como depresión y ablación de la médula ósea produciendo insuficiencia hematológica, causa la muerte en un periodo que va de 30 a 60 días.

4.6.2 Síndrome gastrointestinal

Con una dosis de 5 a 15 Gy. Los efectos son: fuerte daño a las células del epitelio intestinal, causa la muerte en 3 a 5 días.

4.6.3 Síndrome de insuficiencia neurológica

Con dosis mayores a 15 Gy, afecta al sistema nervioso además de otros órganos del cuerpo causando la muerte entre 0 a 5 días.

4.7 Límites de dosis

A) Limitación de dosis.

Para asegurar el cumplimiento de los objetivos de la protección radiológica deben ser cumplidos los siguientes límites.

Primarios. Magnitud que cuantifica el posible efecto deletéreo para la salud.

Secundarios. Se usan cuando no se puede aplicar directamente el límite primario.

Derivados. Se relacionan con los límites primarios mediante un modelo específico.

B) Límites de dosis.

Para POE (Personal Ocupacionalmente Expuesto) 50 mSv (5 rem) en un año.

Para el público es de 2 mSv (0.2 rem) anual.

5. Detectores

Cuando la radiación interactúa con la materia de un detector, se producen algunos de los fenómenos descritos en el capítulo III. Estos fenómenos son traducidos a señales a la salida; como señales, algunos detectores usan la corriente eléctrica, el pulso o bien el cuadrado del voltaje. De ellos el más usado es el pulso.

Para lograr la recolección de los iones producidos por la radiación se puede utilizar un campo eléctrico aplicado convenientemente dentro del detector.

El tiempo requerido para recolectar las cargas eléctricas producidas por la radiación varía de algunos milisegundos en las cámaras de ionización hasta unos nanosegundos en los detectores de diodos semiconductores. O bien, el tiempo de interacción para la radiación con la materia de los detectores va de algunos nanosegundos en los gases hasta picosegundos en sólidos.

5.1 Eficiencia

Los detectores de radiación dan un pulso como respuesta a que algún cuanto de material ionizante interactuó con el volumen activo del detector.

Para radiaciones cargadas como los rayos α o β la interacción en forma de ionización o excitación puede tener lugar al momento en que la partícula entra al volumen activo. Después avanzar un pequeño intervalo en ese volumen, se crearan los suficientes iones a lo largo de la trayectoria como para asegurar que el pulso es lo suficientemente grande para ser registrado como pulso de salida. Bajo estas condiciones se puede hablar de una eficiencia del 100%.

En el caso de las partículas sin carga (neutrones) o bien de fotones de radiación, la simple llegada de uno de ellos al volumen activo, no necesariamente garantiza un registro a la salida en forma de pulso. En este caso no se puede hablar de una eficiencia del 100%.

Para radiación γ , y de acuerdo al detector, o al experimento que se esté realizando, la eficiencia se puede definir de la siguiente manera:

Eficiencia absoluta (ϵ_{abs}). Es la razón entre el número de pulsos registrados por el detector y el número de pulsos que son emitidos por la fuente. En la eficiencia absoluta hay una dependencia marcada de la geometría del arreglo fuente detector.

Eficiencia intrínseca (ϵ_{int}). Es la razón entre el número de pulsos registrados y el número de pulsos que llegan al detector. La eficiencia intrínseca depende del material del detector y de la energía de la fuente, incluso hay una leve variación en la dependencia entre la distancia fuente detector, debido a que la trayectoria que siguen las partículas de radiación puede variar por la presencia de partículas del medio.

Eficiencia relativa (ϵ_{rel}). Es la eficiencia de un detector con respecto a otro.

Eficiencia de energía total de pico o eficiencia de fotopico. La eficiencia de un pulso que registra la energía total que ha dejado un fotón de rayos γ en el detector y que va acumulando un pico en la distribución de pulsos.

La relación entre las eficiencias absoluta y relativa está dada en la expresión:

$$\epsilon_{rel} = \epsilon_{abs} (4\pi/\Omega) \quad (5.1)$$

En donde Ω es ángulo sólido cuyo centro es la fuente.

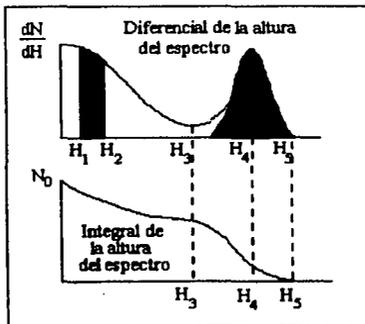


figura 5.1

La eficiencia de conteo también está caracterizada por la naturaleza del evento registrado. Tomando en cuenta todos los pulsos que llegan al detector lo apropiado es usar la eficiencia total; en este caso todos los pulsos que llegan al detector son contados. En términos de una curva diferencial como la de la figura 5.1, el área bajo la curva del pico, representa todos los pulsos que ceden su energía y representa la eficiencia total. Esos eventos de energía total se evidencian con el pico que aparece a la derecha del espectro, los eventos que depositan sólo parte de la energía de la radiación incidente aparecen a la izquierda de ese pico.

El número de eventos de energía total se puede encontrar integrando la parte del pico mencionada, la energía pico y la energía total se relaciona por la razón r

$$r = E_{\text{pico}}/E_{\text{total}} \quad (5.2)$$

Para experimentos en donde se requiere una sola energía del espectro se trabaja en este pico de energía total.

5.2 Detectores de ionización

Dentro de los detectores de ionización se pueden catalogar a los siguientes: cámaras de ionización, detectores proporcionales, y detectores Geiger-Müller. Su funcionamiento se describe a continuación.

En la figura 5.2 se muestra el esquema de un dispositivo para medir radiación ionizante. Consta de un electrodo central y un recipiente cilíndrico que sirve como segundo electrodo; en el interior hay un gas ionizable. En este dispositivo la interacción de la radiación con el gas genera una pequeña corriente eléctrica que es registrada a la salida.

El voltímetro permite registrar la cantidad de carga que llega a estos electrodos.

Al graficar el número de iones como función del voltaje, se obtiene una gráfica como la de la figura 5.3.

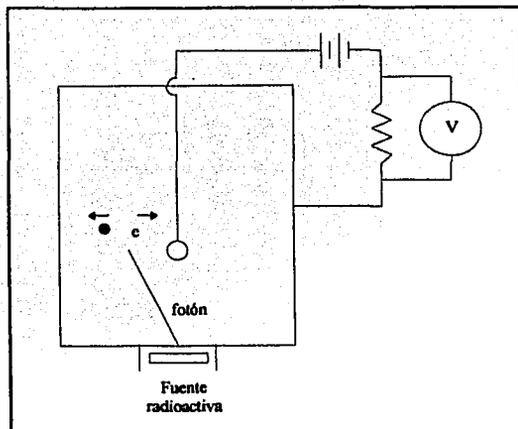


Figura 5.2

En la figura 5.3 la curva superior corresponde a una ionización más alta que la de curva inferior, debido a que las partículas α tienen mayor carga y masa. En ella se pueden distinguir seis regiones. La primera región de la izquierda es conocida como la de recombinación de iones. En esta región sólo un pequeño porcentaje de los iones formados llega a los electrodos. El débil campo eléctrico permite la recombinación de algunos iones.

La segunda región equivale a un intervalo de voltaje que va de los 10 a los 200 volts. Al ir aumentando el voltaje, el campo eléctrico también aumenta proporcionalmente y todos los iones son recolectados por los electrodos; esta región recibe el nombre de región de voltaje saturado. En esta región trabajan las cámaras de ionización y es la región usada para radiaciones producidas por rayos α y β .

La tercera región permite que los iones producidos por la radiación incidente (llamados también primarios), sean acelerados para lograr ionizaciones adicionales (iones secundarios) en otras moléculas del gas. En esta región, el incremento de la carga reunida en el electrodo central es proporcional al voltaje aplicado y el número de iones producidos en forma secundaria tiene una relación prácticamente lineal con el número de iones primarios. Por lo tanto la carga colectada es proporcional al número de iones primarios. Esta región se conoce como región proporcional y el fenómeno como "ampliación gaseosa" o "multiplicación gaseosa". Esta es la zona de operación de los contadores proporcionales.

Al incrementar el voltaje se llega a la cuarta región. Aquí el incremento puede producir efectos no lineales, de ellos el más importante está relacionado con los iones positivos creados por cada proceso de ionización secundaria. Aunque los electrones son rápidamente colectados, los iones positivos se mueven más lentamente y durante el tiempo de

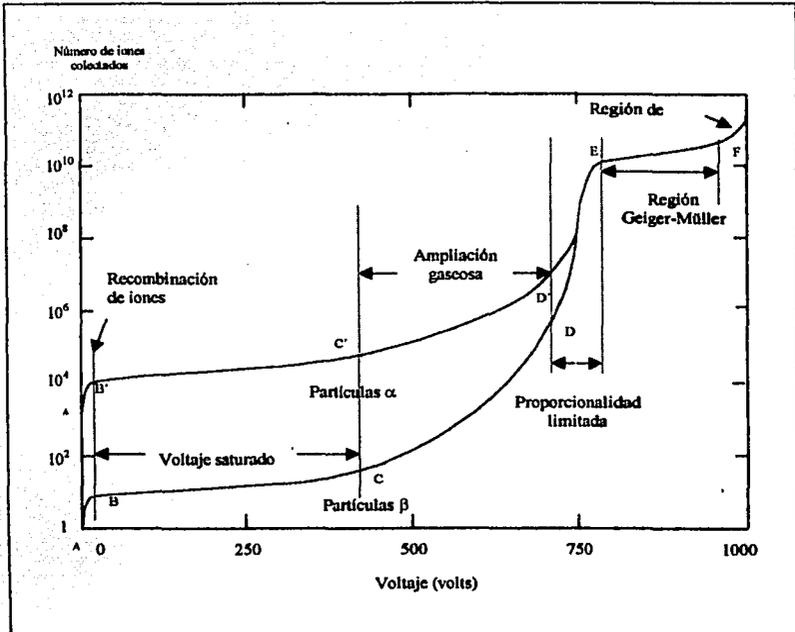


Figura 5.3

Intervalos de operación de los diferentes detectores de ionización

recolección de los electrones, éstos apenas se están moviendo. Esto origina que a cada pulso del detector se cree una nube de iones positivos que se dispersa lentamente mientras llega al cátodo. La región es conocida con el nombre de región de proporcionalidad limitada. Si la concentración de los iones positivos es alta se crea un espacio cargado que afecta significativamente al campo eléctrico del detector. Estos efectos marcan el inicio de una nueva región.

Aumentando el voltaje la carga es independiente de la radiación o del número de iones producidos inicialmente. La intensidad del campo eléctrico permite que cualquier ion formado sea acelerado lo suficiente como para crear ionizaciones adicionales, creando una avalancha de electrones por una reacción en cadena. Los pulsos de la señal en esta región no son proporcionales a la radiación incidente aunque, debido al tamaño, son fácilmente

detectables. Esta parte de la gráfica se conoce con el nombre de **región Geiger-Müller**, y es la banda en donde opera el contador que recibe el mismo nombre.

La **región Geiger-Müller** termina en una zona de descarga, en donde los electrodos se descargan de manera continua.

5.2.1 Cámaras de ionización

Estos instrumentos son usados para detectar partículas que producen una gran ionización. Debido a que emiten pulsos a la salida de muy bajo voltaje es necesaria una gran amplificación de la señal. Su utilización más frecuente es en dosímetros y monitores.

Para aumentar la sensibilidad se pueden sustituir los electrodos del esquema de la figura 5.2, por laminillas cargadas alternativamente con cargas positivas y negativas. Además, como la ionización de un gas se incrementa con la presión y con el peso molecular del gas, se usa generalmente argón a altas presiones.

5.2.1.1 Dosímetros proporcionales

Consisten en una pequeña cámara de ionización de forma cilíndrica provista de un electrodo móvil que se comporta como un electroscopio.

Al cargar el aparato el electrodo móvil se separa. Cuando la cámara de ionización está en presencia de una fuente radiactiva, los iones colectados por los electrodos (debido a la interacción de la radiación y, en este caso, con la pared del aparato), descargan el electroscopio, desplazando al electrodo móvil. Este electrodo móvil se va descargando delante de una graduación y un sistema óptico permite verificar que la graduación indicada es proporcional al número de iones colectados.

La sensibilidad de estos aparatos permite medir la dosis absorbida de una forma correcta de 20keV hasta algunos MeV.

Para recargarlo es necesario un aparato especial.

5.2.2 Contadores proporcionales

Los contadores proporcionales funcionan en la región de "ampliación gaseosa" (arcos CD y C'D' de la figura 5.3). Sin embargo, el voltaje de funcionamiento es tal que asegura la rápida recolección de iones sin llegar a permitir la ampliación gaseosa. Ya que se puede confinar la región de multiplicación a un pequeño volumen alrededor del ánodo, comparado con el volumen del gas y, bajo estas condiciones, los electrones primarios derivan a esta región antes de que la multiplicación tenga lugar. De esta forma, únicamente en una región restringida del ánodo se alcanzan valores del campo eléctrico que producen avalancha.

En los contadores proporcionales es usual que se incluya un control de voltaje muy preciso, un módulo de amplificación, un analizador de altura de pulsos y un escalador que registre el número de pulsos por unidad de tiempo. El uso de ellos permite contar y determinar la energía de las partículas que no pueden producir suficientes iones para crear un pulso detectable en ese intervalo de voltaje.

5.2.2.1 Eficiencia en los contadores proporcionales

Para los fotones de rayos γ , este tipo de detectores tienen una baja eficiencia, debido a que la probabilidad de que haya una interacción directa entre el fotón y el gas decrece al incrementarse la energía del fotón incidente.

5.2.3 Contadores Geiger-Müller

Estos detectores funcionan en un voltaje que va de los 800 a los 2000 V (región marcada en la figura 5.3 con el arco EF). Los pulsos obtenidos en estos detectores y la escala del tiempo que manejan es similar con los detectores proporcionales. Sin embargo, tomando en cuenta que el tiempo de resolución es el intervalo de tiempo necesario para producir dos pulsos sucesivos, los detectores Geiger-Müller tienen un mayor tiempo de resolución que los detectores proporcionales y, debido a ello, manejan un menor número de cuentas por unidad de tiempo.

Los detectores Geiger-Müller consisten en un delgado alambre de tungsteno rodeado a lo largo por un cilindro metálico de cobre u otro metal. En el interior del cilindro hay un gas con una presión que va de dos a diez cm de mercurio; el gas más recomendable es una mezcla de argón en un 90% con el porcentaje restante de alcohol etílico.

5.2.3.1 Eficiencia en los detectores Geiger-Müller

La eficiencia de los detectores Geiger-Müller para la detección de los rayos γ depende de dos factores principalmente:

- 1.- La probabilidad de que el fotón de rayos γ interactúe con el material de la pared del detector y produzca un electrón secundario. Esta probabilidad se puede aumentar si la pared es de un material de alto número atómico, y
2. - La probabilidad de que el electrón secundario formado por esa interacción tenga una trayectoria que llegue hasta gas del detector.

Aunque en general la eficiencia de estos detectores para radiación γ es baja, ésta se puede elevar usando gases de alto número atómico a la mayor presión posible.

5.3 Detectores de centelleo

"Una partícula cargada a su paso por una sustancia, provoca no sólo su ionización, sino también la excitación de los átomos. Al regresar a su estado normal, éstos emiten luz visible. Las sustancias en las cuales las partículas cargadas provocan un destello luminoso (centelleo), se denominan *centelleantes* [o *centelleadores*]"¹

Un centelleador óptimo debe reunir las siguientes características:

- La razón entre la energía luminosa y la energía cinética cedida debe ser proporcional a la máxima eficiencia.
- Esta conversión debe ser lineal en un amplio rango de energías.
- El material, visto como un medio, debe ser transparente a la longitud de onda que él mismo emite al regresar a su estado base.
- El tiempo de decaimiento de los impulsos luminosos es corto, promoviendo con esto que las señales sean rápidas.
- Debe ser tal que posibilite la construcción de detectores con las dimensiones apropiadas de acuerdo a la aplicación prevista.
- Su índice de refracción debe ser cercano a la del vidrio para permitir un acoplamiento óptico eficiente con un dispositivo transductor, que transforma los pulsos luminosos en señales eléctricas.

¹ I. V. SÁVELÉIV. Curso de Física General, tomo 3. pp 275

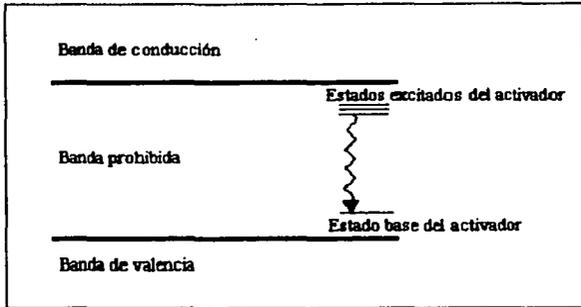


Figura 5.4

Aunque ningún material cumple con todos los requisitos, generalmente se elige uno que cumpla con los requerimientos necesarios para el trabajo que ha de desarrollarse. Los centelleadores más utilizados se pueden clasificar en orgánicos o inorgánicos.

5.3.1 Centelleadores inorgánicos

Son cristales con mayor rendimiento y linealidad con respecto a los orgánicos, aunque tienen menor velocidad de respuesta.

El mecanismo de centelleo en un material inorgánico depende de los estados de energía, determinados por la red cristalina del material. En aislantes o semiconductores los electrones ocupan un número discreto de niveles de energía agrupados en bandas, como se muestra en la figura 5.4.

En dicha figura, la banda inferior representa a la banda de valencia donde se encuentran los niveles de energía de todos los electrones que están ligados a la red cristalina.

La banda de conducción, en la parte de arriba de la figura 5.4, está constituida por los niveles de energía que ocupan los electrones que poseen la suficiente energía como para escapar libremente.

La banda intermedia, con una anchura de entre 4 y 5 eV, representa la banda prohibida. Cuando un cristal absorbe energía, ésta se traduce en la pérdida de un electrón de la banda de valencia y la aparición de ese electrón en la banda de conducción. Al regresar el electrón a cubrir el hueco se emite un fotón de una frecuencia superior a la de la luz visible.

En un cristal puro el proceso de desexcitación es poco eficiente, pero la probabilidad de emisión se puede ampliar si se agregan algunas impurezas llamadas activadores. Estos activadores crean lugares especiales en la red en donde la banda prohibida es modificada, apareciendo nuevos niveles energéticos en ella. En estas condiciones, al escapar un electrón deja un hueco que al ser llenado por algún otro electrón emite un fotón de menor energía y

de frecuencias comprendidas en el intervalo de la luz visible. Este fenómeno es la base del funcionamiento de los detectores de centelleo.

Al interactuar una partícula cargada con el centelleador se generara un gran número de pares hueco-electrón debido a que los electrones escapan a la banda de conducción. Un hueco puede "viajar" hasta encontrar una impureza activadora ionizandola, porque la energía de ionización de la impureza es menor que del cristal. Por otro lado el electrón puede desplazarse libremente hasta encontrar un hueco en el activador. Este nuevo átomo de impureza queda eléctricamente neutro aunque en estado excitado, y al regresar a su estado base existe una probabilidad de que emita el exceso de energía en forma de un fotón luminoso.

En la figura 5.4, se muestran unas líneas dentro de la banda prohibida que representan los estados excitados del activador. Si el estado del activador está en una de las líneas excitadas, regresará a su estado base muy rápidamente y con una alta probabilidad de emisión de un fotón correspondiente. Si el activador es elegido adecuadamente la transición puede ser en el intervalo de energía visible y con una vida media típica de 10^{-7} s.

Algunos de los centelleadores inorgánicos más usados son:

Yoduro de sodio, activado con talio NaI(Tl).

Yoduro de cesio, activado con talio CsI(Tl).

Yoduro de litio, activado con europio LiI(Eu).

Sulfuro de zinc, activado con plata ZnS(Ag).

Fluoruro de calcio, activado con europio CaF₂(Eu).

Las características generales de ellos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla I

Material	Longitud de onda de máxima emisión* (nm)	Constante de decaimiento (μs)	Eficiencia de centelleo para rápidos**	Índice de refracción absoluto λ_{max}	de para
NaI(Tl)	410	0.23	11.3%	1.85	
CsI(Tl)	565	1.0	11.9%	1.80	
LiI(Eu)	470-485	1.4	2.8%	1.96	
ZnS(Ag)	450	0.2	-	2.36	
CaF ₂ (Eu)	435	0.9	6.7%	1.44	

* Es la longitud de onda característica que emiten esos centelleadores.

** Considerando que los rayos γ usados en el laboratorio son fotones de una energía del orden de 664 KeV entonces la energía cinética del electrón que es expulsado de su átomo padre es $E_e \sim 664$ KeV; estos son electrones considerados rápidos.

5.3.2 Centelleadores orgánicos

Los centelleadores orgánicos se construyen usando moléculas orgánicas, Su estructura es tal que los electrones de esta molécula tienen a su vez una configuración que permiten transiciones generando el proceso de centelleo. Algunos centelleadores pueden mostrar este fenómeno en estado sólido, en vapor o incluso en líquido en solución.

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

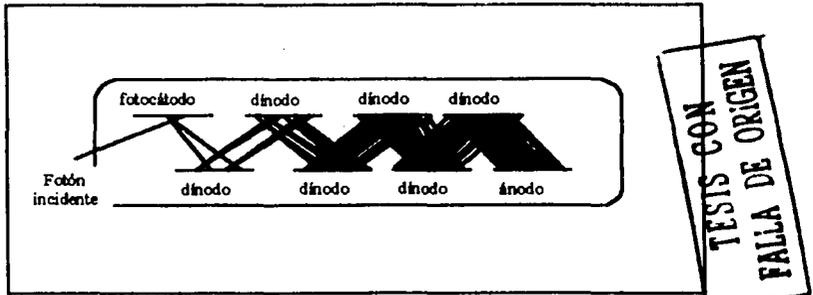


Figura 5.5

En estos materiales, una fracción significativa de la energía de la partícula incidente se transforma en calor. Esta fracción puede ser disminuida durante la fabricación reduciendo la cantidad de impurezas que degradan la emisión luminosa.

Quando se emplean centelleadores líquidos, éstos se obtienen con una pequeña cantidad de un centelleador orgánico disuelto en un material determinado para formar una mezcla. A esta mezcla se le agrega un tercer componente cuya función es la de modificar la longitud de onda, para ser detectado por el transductor.

5.3.3 Tubo Fotomultiplicador

Los tubos fotomultiplicadores o fototubos son dispositivos electrónicos que sirven para convertir destellos luminosos en señales eléctricas.

En la figura 5.5 se muestra un diagrama esquemático de un tubo fotomultiplicado. Consiste de tres partes importantes: Un fotocátodo, diversos electrodos llamados dínodos y un ánodo.

Los fotones de radiación que llegan al cátodo del fototubo interactúan con el material de éste (efecto fotoeléctrico). El fotoelectrón resultante es acelerado (debido a la presencia de un campo electrostático entre el cátodo y el primer dínodo), llegando al primer dínodo con la energía necesaria para arrancar de él más electrones. Repitiendo este proceso con los siguientes dínodos se llega a una ganancia de electrones suficiente para establecer una señal eléctrica que es recibida por el ánodo.

Dos características del fototubo son importantes mencionar.

A) La eficiencia cuántica. Definida como la razón del número de fotoelectrones emitidos entre el número de fotoelectrones recibidos; ésta eficiencia depende de la longitud de onda del fotón.

B) Respuesta espectral. Representa la variación de la eficiencia como función de la longitud de onda. La máxima respuesta espectral está en longitudes de onda cercanas a los $0.4 \mu\text{m}$.

Otras importantes características de los tubos fotomultiplicadores son las siguientes:

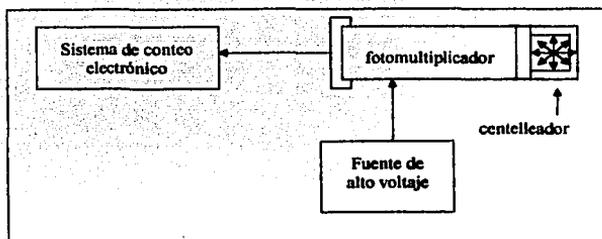


Figura 5.6

A) Tamaño. Aunque reduciendo el tamaño del fototubo se reduce su área transversal, permite un tamaño compacto y resistente.

B) Requerimiento de voltaje. En diferentes modelos se aplica un voltaje de 900 a 2400 V, para ello se requiere una fuente de voltaje de gran estabilidad.

C) Ganancia lineal. El promedio de ganancia de la cadena de dinodos es independiente del número de electrones incidentes, por lo tanto el tamaño de la señal de salida es proporcional al número de los electrones incidentes al fotomultiplicador.

D) Dependencia de la temperatura. Los fototubos poseen una característica que limita la sensibilidad, debido a que el fotocátodo emite electrones por efecto de agitación térmica, aún estando en la oscuridad. A ésta corriente se le denomina *corriente de oscuridad* y aunado a la presencia del ruido inherente a cualquier circuito electrónico, altera la señal de salida.

E) Efectos magnéticos. En presencia de campos magnéticos la interacción entre éstos y los formados con el flujo de electrones generan fuerzas que afectan la trayectoria de los electrones. La solución para estos efectos consiste en revestir los fototubos con material que sirva de blindaje magnético.

5.3.4 Acoplamiento de los detectores de centelleo

La figura 5.6 muestra esquemáticamente un detector de centelleo. Consiste de una zona en donde está el centelleador, acoplado a un tubo fotomultiplicador, que es regulado por una fuente de poder de alto voltaje. A la salida de la señal se coloca un sistema electrónico de conteo para analizar la señal de salida.

5.3.5 Eficiencia intrínseca del detector de centelleo

La eficiencia intrínseca depende del coeficiente de absorción del material del detector, suponiendo que los efectos fotoeléctrico, Compton y producción de pares den lugar a impulsos a la salida de amplitud suficiente.

La probabilidad $n(x)$ de que un fotón atraviese un espesor x de centelleador sin lograr interacción es

$$n(x) = n_0 e^{-\mu x} \quad (5.3)$$

En donde n_0 representa los fotones incidentes, μ el coeficiente de absorción del material centelleador y x el espesor del centelleador.

La fracción total de fotones que interactúa y son detectados está dada por la expresión:

$$1 - n(x)/n_0 = 1 - e^{-\mu x} \quad (5.4)$$

Desarrollando en series de Taylor el segundo término del miembro de la derecha se obtiene:

$$1 - n(x)/n_0 = 1 - [1 - \mu x + \theta(\mu x)] \quad (5.5)$$

de donde el término $\theta(\mu x)$ representa un polinomio de orden superior a uno. De ésta expresión se tiene que para un valor determinado de μ , la eficiencia intrínseca es directamente proporcional al espesor del material.

6. Requisitos legales para la certificación de un laboratorio

Existen diversos órganos oficiales que regulan y norman los procedimientos a seguir para lograr la certificación de un laboratorio. En el caso de radiaciones ionizantes se debe cumplir con ciertos lineamientos dictados por la SECRETARIA DE ENERGIA, por medio de la COMISIÓN NACIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR Y SALVAGUARDAS y por la SECRETARIA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL, por medio de la SUBDIRECCION DE METROLOGIA.

El presente capitulo expone los requerimientos dados por éstas dependencias con el fin de lograr la certificación del laboratorio de radiotrazado del IMP.

Extracto de la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-024-NUCL-1995, REQUERIMIENTOS Y CALIBRACIÓN DE DOSÍMETROS DE LECTURA DIRECTA PARA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA, DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION, Martes 5 de agosto de 1997.

“4. Definiciones

Para efectos de la presente Norma se entiende por:

Calibración

Ajustar la respuesta de un dosímetro de lectura directa, dentro de su intervalo de operación, a valores conocidos de rapidez y exposición.

Campo de radiación

Región en el espacio en donde se localiza la radiación.

Cargador

Instrumento que se emplea para administrar carga electrostática a los dosímetros de lectura directa.

Certificado de calibración

Documento emitido por un prestador de servicios autorizado por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, en el que se asienta el resultado de la calibración realizada al dosímetro de lectura directa.

Dosímetro

Instrumento o dispositivo para medir el equivalente de dosis, la dosis absorbida o la exposición personal acumulada en un intervalo de tiempo. Puede ser de lectura directa o de lectura indirecta.

Dosímetro de lectura directa

Dosímetro que se sujeta a la ropa o al cuerpo de una persona, que tiene integrado un sistema de medición el cual marca el valor acumulado, desde que se carga eléctricamente hasta el momento en que se hace la lectura del equivalente de dosis, la dosis absorbida o la exposición a la radiación.

Errores

Variaciones en los valores obtenidos con el dosímetro de lectura directa, debidas a las variaciones asociadas con la fuente de calibración, el posicionamiento del dosímetro y la lectura.

HEBIS CON
FALLA DE ORIGEN

Error global

El resultante al considerar todas las contribuciones de los errores relativos asociados con las magnitudes que intervienen en el proceso de calibración.

Error relativo

Relación entre el error de la magnitud y el valor de ésta

Escala

Curva o eje en donde se marca una serie de puntos o rayas que corresponde a un conjunto de números colocados según la magnitud.

Exactitud

Es el grado de concordancia entre el valor medido y el valor real del parámetro a medir.

Factor de calibración

Factor obtenido como la razón entre el valor esperado de una rapidez de exposición y la lectura promedio proporcionada por un dosímetro de lectura directa para una condición dada.

Fecha de calibración

Fecha en que se efectúa la calibración.

Fecha de certificación

Fecha en que se firma el certificado de calibración

Fuente de calibración

Fuente radioactiva certificada con trazabilidad a un laboratorio primario o secundario, nacional o internacional.

5. Símbolos y abreviaturas

Cs-137: Radio núcleo de Cesio con número de masa atómica 137.

Co-60: Radio núcleo de Cobalto con número de masa atómica 60.

- A_a: Actividad actual, es la actividad de la fuente de calibración a la fecha de calibración del dosímetro, Bq (o mCi).
- A_c: Actividad de la fuente de calibración a la fecha de certificación, Bq (o mCi).
- d: Distancia Fuente-Dosímetro, m (o cm).
- d_i: Distancia de calibración, m (o cm).
- d_a: Distancia a la que se obtiene la exposición X_a, m (o cm).
- FC: Factor de calibración.
- L: Lectura de la rapidez de exposición.
- L_v: Valor esperado de la rapidez de exposición, obtenido por cálculo.
- L_p: Valor promedio de varias lecturas obtenidas en las mismas condiciones con un dosímetro.
- T: Vida media del radioisótopo de la fuente de calibración (años o días).
- t: Tiempo transcurrido de la fecha de certificación de la fuente de calibración a la fecha de calibración del dosímetro (años o días).
- X_i: Exposición correspondiente a 1/3 y 2/3 de la escala del dosímetro (mR).
- X̄_a: Rapidez de exposición actual, es la rapidez a la fecha de calibración, a una distancia especificada fuente- dosímetro (mR/h).
- X̄_c: Rapidez de exposición a la fecha de certificación de la fuente de calibración, a una distancia especificada fuente- dosímetro (mR/h).

- \dot{X}_i : Rapidez de exposición correspondiente a 1/3 y 2/3 de la escala del dosímetro (mR/h).
- \dot{X}_{max} : Rapidez de exposición máxima de la escala del dosímetro (mR/h).
- $\delta \dot{X}$: Error asociado con la rapidez de exposición de las fuentes de calibración, que estén contenidas en su blindaje. En caso de fuentes de calibración desnudas [sin blindaje], se considera el error asociado con la actividad.
- δ_d : Error asociado con el posicionamiento fuente-dosímetro.
- δ_L : Error en la lectura.
- δ_t : Error asociado con la medición del tiempo.
- λ : Constante de decaimiento, $\lambda=0.693/T(\text{años}^{-1} \text{ o días}^{-1})$.
- Γ : Constante de exposición específica del radioisótopo (Rm^2/hCi).

6. Requerimientos para la calibración

La calibración de dosímetros de lectura directa requiere personal calificado, local, instalaciones y procedimientos adecuados, y al menos una fuente de calibración.

7. Requerimientos de los dosímetros

Previo a la calibración, los dosímetros de lectura directa no deben presentar anomalías físicas y de tipo funcional.

7.1 Consideraciones físicas

Para la calibración, los dosímetros no deben presentar ninguna de las siguientes condiciones:

- Señales de golpes sufridos en el cuerpo del dosímetro;
- Presencia de humedad en el interior del dosímetro;
- Inestabilidad del electrodo indicador, y
- El indicador debe estar en forma vertical para la lectura.

7.2 Requerimientos funcionales

Las anomalías de tipo funcional pueden determinarse observando la rapidez con que se descarga el dosímetro, en ausencia de radiación, o la capacidad que tiene éste para retener la carga.

La descarga de un dosímetro totalmente cargado, cuya escala tenga un intervalo de lectura de 100 mR o más, no debe exceder del 2 % de la escala total en 24 horas si este dosímetro se coloca en un medio ambiente donde la rapidez de exposición sea menor o igual a 0.02 mR/h y en las condiciones ambientales siguientes:

- Temperaturas entre -10 y $+50$ °C y humedades relativas entre 0 y 90 %;
- Presión atmosférica entre $6.08 \times 10^4 \text{ Pa}$ (456 mm de Hg) y $12.16 \times 10^4 \text{ Pa}$ (912 mm de Hg).

El movimiento transitorio del indicador que ocurre al momento en que el dosímetro se desconecta del cargador, no debe exceder del 5 % de la escala total para dosímetros con escalas de 500 mR o menores, y del 2 % para dosímetros con escalas mayores de 500 mR.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

8. Calibración

8.1 Para llevar a cabo la calibración de los dosímetros de lectura directa, se deben cumplir con los siguientes requisitos:

8.1.1 El dosímetro debe contar con su manual completo de servicio, que incluye la respuesta del dosímetro en función de la energía;

8.1.2 El dosímetro debe estar libre de contaminación radiactiva.

8.1.3 El electrómetro debe estar ajustado a cero o al valor indicado por el fabricante, de acuerdo a las instrucciones del manual de servicio.

8.2 La calibración de los dosímetros de lectura directa debe efectuarse al menos una vez al año y después de haberse reparado o ajustado.

8.3 La calibración del dosímetro de lectura directa debe efectuarse observando las precauciones siguientes:

8.3.1 Durante la calibración debe estar presente, exclusivamente, la fuente de calibración en el área de trabajo.

8.3.2 La temperatura ambiente del área de trabajo debe estar en el intervalo de temperatura normal de operación del dosímetro, especificado por el fabricante. Para casos especiales, la calibración se debe realizar en las condiciones ambientales que predominen en su uso normal.

8.3.3 El efecto de la dispersión causada por los materiales de construcción del área donde se realice la calibración, se debe reducir de manera tal, que su influencia en las lecturas del dosímetro se pueda considerar despreciable, para ello es necesario asegurar que la distancia de la fuente de calibración y del dosímetro al piso, techo y paredes, sea por lo menos de 1 m.

8.4 Fuente de calibración

8.4.1 Para efectuar la calibración de los dosímetros de lectura directa es necesario contar con una fuente de calibración, cuya actividad se encuentre dentro de un 5 % de exactitud respecto a los patrones radiactivos de un laboratorio primario o secundario, nacional o internacional.

8.4.2 Las fuentes radiactivas de Cs -137 y Co-60 se consideran apropiadas para efectuar calibraciones, ya que sus energías están dentro del intervalo de interés y la respuesta a estas energías es semejante en la mayoría de los dosímetros. Sin embargo, se debe conocer la respuesta de cada dosímetro específico en el intervalo de energía mencionado, para aplicar el factor de corrección correspondiente al usar un dosímetro en campos de radiación con energías diferentes a la calibración.

8.5 Posicionamiento relativo fuente de calibración-dosímetro

Para lograr la repetibilidad en las lecturas obtenidas con diferentes posicionamientos relativos fuente de calibración-dosímetro, se debe contar con instrumentos calibrados para medir distancias lineales dentro de un 1% de exactitud y con una escala máxima que incluya todas las distancias elegidas entre la fuente de calibración y el dosímetro. La distancia mínima que se utilice debe ser tal que la fuente de calibración y el dosímetro se puedan considerar puntuales, para lo cual, se requiere que la dimensión máxima de la fuente y del dosímetro sean menores al 10% de la distancia entre ellos.

8.6 Duración de la lectura

Para lograr repetibilidad en las lecturas obtenidas con diferentes tiempos de medición, se debe contar con instrumentos calibrados para medir tiempos con una escala máxima que incluya todos los tiempos elegidos para las diferentes pruebas. El tiempo mínimo que se utilice debe ser tal que el tiempo requerido para iniciar y terminar una lectura pueda considerarse "nulo". Para esto se requiere cronometrar la tarea de iniciar una lectura, así como la de terminar la tarea, las cuales sumadas deben ser menores al 10% del tiempo mínimo.

8.7 Medición de la lectura

Se debe emplear como error en la lectura del dosímetro la mitad del valor de la medición mínima de la escala del mismo.

8.8 Métodos de calibración

Para efectuar la calibración de los dosímetros de lectura directa se puede utilizar alguno de los métodos que se describen a continuación:

8.8.1 Calibración en función de la distancia fuente-dosímetro.

8.8.1.1 Calcular la actividad actual de la fuente de calibración en función del tiempo de decaimiento, contando desde la fecha de "certificación", empleando la relación:

$$A_a = A_c e^{-\lambda t} \quad (6.1)$$

Con este valor de A_a , calcular con la relación

$$d_i = \left(\frac{\Gamma A_a}{X_i} \right)^{1/2} \quad (6.2)$$

dos distancias de calibración d_i , para la escala del dosímetro, en las cuales la fuente de calibración produzca una rapidez de exposición que corresponda, respectivamente, a 1/3 y 2/3 del valor máximo de cada escala.

Si el certificado de calibración de la fuente incluye la rapidez de exposición para una distancia específica o una gráfica que relacione la rapidez de exposición en función de la distancia, entonces la rapidez de exposición actual a la distancia especificada, se calcula con la relación:

$$\dot{X}_a = \dot{X}_c e^{-\lambda t} \quad (6.3)$$

8.8.1.2 Calcular con la expresión

$$d_i = d_c \left(\frac{\dot{X}_a}{X_i} \right)^{1/2} \quad (6.4)$$

dos distancias de calibración d_i , para la escala del dosímetro, en las cuales la fuente de calibración produzca una rapidez de exposición que corresponda, respectivamente, a 1/3 y 2/3 del valor máximo de la escala.

8.8.1.3 Para calibrar, se coloca el dosímetro perpendicularmente al flujo de la fuente de calibración a una de las dos distancias calculadas y se obtienen por lo menos tres lecturas de la rapidez de exposición correspondiente, con los cuales se obtiene un valor promedio representativo de la rapidez de exposición para la distancia seleccionada. Se repite esta

operación para la segunda distancia calculada y a los valores promedios obtenidos se les aplica el factor de calibración, FC, que se calcula de la siguiente manera:

$$FC = L_p/L_q \quad (6.5)$$

Si los factores de calibración en los dos puntos de la escala, no están dentro del 20% del valor especificado por el fabricante para el dosímetro y la energía de la fuente de calibración empleada, el dosímetro debe regresarse a reparación.

8.8.2 Calibración en función del tiempo de exposición.

8.8.2.1 Calcular con la expresión

$$d_t = d_a \left(\frac{\dot{X}_a}{\dot{X}_{max}} \right)^{1/2} \quad (6.6)$$

la distancia en la cual se obtiene la rapidez de exposición máxima de la escala del dosímetro.

8.8.2.2 Calcular con la expresión

$$t = \left(\frac{X_t}{\dot{X}_{max}} \right) \quad (6.7)$$

el tiempo necesario para tener una exposición entre 1/3 y 2/3 de la escala del dosímetro, a una distancia fija (determinada en el punto 8.8.2.1).

8.8.2.3 Para calibrar, se coloca el dosímetro perpendicularmente al flujo de la fuente de calibración a una distancia fija durante el tiempo de exposición calculado y se obtienen por lo menos tres lecturas de la rapidez de exposición correspondiente, con las cuales se obtiene un valor promedio de la rapidez de exposición para el tiempo de exposición seleccionado. Se repite esta operación para un segundo tiempo calculado y a los valores obtenidos se les aplica el factor de calibración.

8.9 Errores

Es importante minimizar los errores asociados con la calibración de un dosímetro de lectura directa. Las fuentes principales de error están asociados con: la rapidez de exposición de la fuente de calibración, $\delta \dot{X}$, para las fuentes de calibración que estén contenidas en su blindaje, y la actividad para aquellas que estén desnudas; el posicionamiento relativo fuente-dosímetro, d ; las lecturas del dosímetro, L ; y la medición del tiempo, t .

El error global del dosímetro (%) se determina por la relación:

$$\delta = \left[\left(\frac{\delta \dot{X}}{\dot{X}} \right)^2 + 4 \left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\delta t}{t} \right)^2 \right]^{1/2} * 100 \quad (6.8)$$

8.10 Registro de los resultados de la calibración

8.10.1 Los resultados de las mediciones deben registrarse en un cuaderno de reporte o registro con la indicaciones siguientes:

- Marca, modelo y número de serie del dosímetro calibrado;
- Fecha de calibración, actividad y rapidez de exposición a una distancia dada de la fuente de calibración;
- Responsable de calibración.
- Factor de calibración obtenido, y su fecha de calibración;
- Procedimiento empleado."

7. Centro efectivo de detectores

En el laboratorio de radiotrazado del IMP se tienen diversos tipos de detectores de radiación, ellos se pueden dividir en dos grupos:

- Los detectores de dosimetría cuyo uso es para protección radiológica o dosimetría, entre los que están los detectores de lectura directa y los detectores de película.
- Los detectores para medición de radiaciones gamma, inherentes al funcionamiento del laboratorio, entre los que se encuentran detectores de NaI(Tl).

En el presente capítulo se presentan los experimentos realizados para determinar el centro efectivo de los detectores de lectura directa, los dispositivos creados para ello, los procedimientos y algunas sugerencias para localizar el centro efectivo de algún otro tipo de detector con simetría cilíndrica.

7.1 Características generales de los detectores de lectura directa

Detectores de lectura directa (dosímetros de pluma). En el laboratorio existen dosímetros con apariencia externa de tres tipos, las características de ellos se dan a continuación:

Características	Primer tipo	Segundo tipo	tercer tipo
Marca	Dosimeter	Dosimeter	Sthepen
Modelo	862	862	
Altura del detector	104 mm	104 mm	104 mm
Escala	0-200 mR	0-200 mR	0-200 mR
Mínima escala	10 mR	10 mR	10 mR
Radio del detector	12 mm (uniforme)	12 mm / 10 mm	10 mm/12 mm

El detector del primer tipo tiene una forma cilíndrica y su radio varía debido a que el cilindro no siempre es uniforme. El detector del segundo tipo tiene una especie de cintura y en el del tercer tipo el radio aumenta hacia el centro del cilindro volviendo a disminuir en los extremos.

En el laboratorio de radiotrazado se tiene un detector de centelleo de NaI(Tl), en la pantalla de este monitor se pueden leer espectros de energía, actividad de la fuente, rapidez de exposición y rapidez de equivalente de dosis.

7.2 Experimentos para encontrar el centro efectivo para detectores en donde el elemento detector tiene una geometría cilíndrica.

De acuerdo a la norma NOM-012-NUCL-1995, el centro efectivo es el "punto ideal dentro del detector que produce en el monitor la misma respuesta que se produciría si el detector completo fuese colocado en el mismo punto" (DOF, 13 de septiembre de 1995, pag. 7). Los siguientes experimentos se hicieron con la finalidad de encontrar el centro efectivo de un detector usando el mínimo número de medidas.

Debido a la facilidad con que se puede manipular el detector de centelleo se realizaron con él dos experimentos para encontrar la zona donde está el centelleador, después se comparó el resultado obtenido con el que marca el manual de éste detector. Estos experimentos marcaron un procedimiento a seguir para encontrar el centro efectivo de

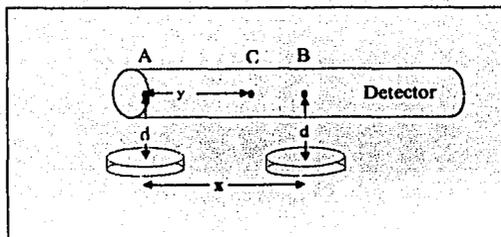


Figura 7.1

Geometría del experimento para encontrar el centro efectivo de un detector en forma cilíndrica.

detectores de lectura directa. El procedimiento encontrado fue probado en el tercer experimento.

7.2.1 Geometría del experimento

El experimento consiste en tomar dos medidas con la geometría indicada en la figura 7.1. En ella se muestran dos distancias y y $x-y$ que distan del punto C a los puntos A y B respectivamente.

Se coloca primero la fuente debajo del punto A, a una distancia d (esta distancia se mide desde el eje del cilindro hasta el centro de la pastilla de la fuente). Después se coloca debajo del punto B a la misma distancia d y durante el mismo tiempo. A la rapidez de exposición tomada en el primer caso le llamamos \dot{X}_1 y \dot{X}_2 para el segundo caso.

De acuerdo a esta geometría y a la relación que hay entre la rapidez de exposición y la distancia se tiene:

$$\dot{X}_1 \propto 1 / (d^2 + y^2) \quad (7.1)$$

$$\dot{X}_2 \propto 1 / (d^2 + (x-y)^2) \quad (7.2)$$

La razón entre ambas expresiones se puede expresar:

$$\dot{X}_1 (d^2 + y^2) = \dot{X}_2 (d^2 + (x-y)^2) \quad (7.3)$$

Observación: si $\dot{X}_1 = \dot{X}_2$ entonces $y = x-y$ y por (7.3) $y = x/2$. En caso de que \dot{X}_1 y \dot{X}_2 no sean iguales, se puede despejar y en términos de x y de las dosis. Usando (7.3) se llega a:

$$y = \frac{-x\dot{X}_2 + \sqrt{x^2\dot{X}_1\dot{X}_2 - (\dot{X}_1 - \dot{X}_2)^2 d^2}}{\dot{X}_1 - \dot{X}_2}, \text{ con } \dot{X}_1 \neq \dot{X}_2$$

Sustituyendo $\Phi = \frac{X_1}{X_2}$, se tiene:

$$y = \frac{-x + \sqrt{x^2 \Phi - (\Phi - 1)^2 d^2}}{\Phi - 1}, \quad \text{con } \Phi \neq 1 \quad (7.4)$$

7.2.1.1 Análisis del discriminante

Existe una restricción más. Ya que el discriminante no puede ser negativo:

$$\begin{aligned} \delta &= x^2 \Phi - (\Phi - 1)^2 d^2 \geq 0 \\ x^2 \Phi - \Phi^2 d^2 + 2\Phi d^2 - d^2 &\geq 0 \\ -d^2 \left(\Phi^2 - (x^2 + 2d^2) \frac{\Phi}{d^2} + 1 \right) &\geq 0 \end{aligned} \quad (7.5)$$

La expresión entre paréntesis de 7.5 es un polinomio de segundo grado, como función de Φ , que tiene como raíces:

$$\frac{x^2 + 2d^2 + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \quad \text{y} \quad \frac{x^2 + 2d^2 - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2}$$

por lo tanto la expresión 7.5 se puede escribir:

$$\Phi^2 - (x^2 + 2d^2) \frac{\Phi}{d^2} + 1 = \left(\frac{x^2 + 2d^2 + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right) \left(\frac{x^2 + 2d^2 - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right)$$

Sustituyendo esta expresión en 7.5, se obtiene:

$$-d^2 \left[\Phi - \frac{(x^2 + 2d^2) + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right] \left[\Phi - \frac{(x^2 + 2d^2) - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right] \geq 0 \quad (7.6)$$

$$\delta(\Phi) = -d^2 \left[\Phi - \frac{(x^2 + 2d^2) + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right] \left[\Phi - \frac{(x^2 + 2d^2) - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right] \geq 0$$

El discriminante, como función de la razón Φ , $\delta(\Phi)$, representa una parábola cóncava hacia abajo cuyos ceros se pueden deducir de la última expresión, por lo tanto sólo es positiva si se cumple la condición

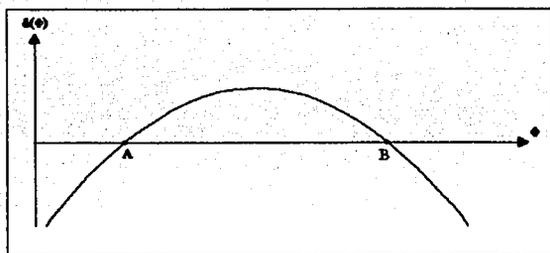


Figura 7.2

Gráfica del discriminante de la ecuación 7.4

El discriminante, como función de la razón Φ , $\delta(\Phi)$, representa una parábola cóncava hacia abajo cuyos ceros se pueden deducir de la última expresión, por lo tanto sólo es positiva si se cumple la condición:

$$\left[\Phi \leq \frac{(x^2 + 2d^2) + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right] \wedge \left[\Phi \geq \frac{(x^2 + 2d^2) - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right]$$

La figura 7.2 muestra dicha parábola; de ahí

$$A = \left(0, \frac{(x^2 + 2d^2) - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right) \text{ y } B = \left(0, \frac{(x^2 + 2d^2) + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right)$$

Por lo tanto para que el discriminante sea positivo se requiere que Φ esté dentro del intervalo marcado, es decir:

$$\Phi \in \left[\frac{(x^2 + 2d^2) - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2}, \frac{(x^2 + 2d^2) + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right] \quad (7.7)$$

7.3 Primer experimento

Como se expone en el capítulo 5 (5.3.4) un detector de centelleo tiene en su parte principal una zona en donde está el material centelleador acoplado a un tubo fotomultiplicador, todo dentro de un cilindro metálico. En la figura 7.1, el material centelleador está en el punto C cuya profundidad y debe ser encontrada.

7.3.1 Material

- Una fuente de Cs-137 con una actividad de 9.19×10^5 Bq calibrada al 18 de octubre de 1995, con una incertidumbre de $\pm 2.2\%$. De acuerdo a los cálculos correspondientes la actividad al momento del experimento fue de 81.7 kBq.
- Un detector de centelleo de NaI (TI) modelo "EasySpec" marca, "Canberra" con número de serie 11982244 y número de inventario del IMP 0003219.
- Un Vernier y un cronómetro.

7.3.2 Cálculo del equivalente de dosis recibida durante el experimento

El límite propuesto por el laboratorio de radiotrazado del IMP es de 20 mSv promedio anual en 5 años para un POE y para el público de 2 mSv promedio anual.

A) Para el POE.

La rapidez de exposición se puede calcular con la expresión:

$$\dot{X} = \frac{\Gamma A_0}{d^2} \quad (7.8)$$

Suponiendo que la distancia promedio del operador a la fuente es de 0.1m durante una hora y con la actividad de 81.7 kBq se obtiene:

$$\dot{X} = 0.073 \frac{mR}{h}$$

Un Roengen [R] equivale a 34 J/3876 kg (de aire en condiciones estándar), y un Sievert es, suponiendo que el equivalente de dosis que recibe el tejido u órgano del cuerpo humano es similar al del aire, equivalente a 1J/kg.¹

La rapidez equivalente de dosis es

$$\dot{D} = 0.638 \mu\text{Sv/h}$$

Éste es un valor que satisface los límites propuestos por el laboratorio de radiotrazado del IMP (ver sección 4.7).

B) Para el público.

La distancia promedio con la que se trabajó en el experimento fue de 3m a lo largo de una hora (suponiendo que alguien pudiera estar todo ese tiempo en la puerta del laboratorio o al otro lado de alguna pared). Realizando los cálculos se obtiene:

$$\dot{X} = 0.081 \frac{\mu R}{h}$$

¹ Ver Ramírez García, Pablo y Cortés Islas, María Eugenia. Manual de seguridad radiológica, IMP, México 1992

Usando el mismo argumento anterior, la dosis absorbida es:

$$\dot{D} = 0.709 \text{ nSv/h}$$

Este es un valor que satisface con holgura los límites propuestos por el laboratorio de radiotrazado del IMP, para el público.

7.3.3 Desarrollo

Se coloca sobre la superficie curva del cilindro del detector una cinta que permita marcar el punto A. A una distancia de 10cm a la derecha de A se marca un punto B (Figura 7.2).

Se coloca la fuente frente al detector a una distancia $d=2.8 \text{ cm}$ (medida desde el eje del cilindro al centro geométrico de la pastilla) frente al punto A y se toma una lectura \dot{X}_1 .

Se repite el procedimiento para el punto B, tomando la lectura \dot{X}_2 . Ambas lecturas se repiten 5 veces y durante 600 segundos cada uno.

7.3.4 Resultados

Rapidez de exposición (mR/h)		
	\dot{X}_1	\dot{X}_2
	0.445	0.106
	0.444	0.109
	0.406	0.108
	0.483	0.112
	0.493	0.113
Promedio	0.4542	0.1096

Sustituyendo los promedios en la ecuación 7.4, con $x = 10\text{cm}$ y $d = 2.8\text{cm}$, se tiene:

$$y = 2.657\text{cm} \pm 0.178\text{cm}$$

7.3.5 Incertidumbres

La incertidumbre se asoció con la siguiente expresión:

$$S_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 S_x^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \dot{X}_1}\right)^2 S_{\dot{X}_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \dot{X}_2}\right)^2 S_{\dot{X}_2}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial d}\right)^2 S_d^2 + \frac{S_A^2}{A^2}$$

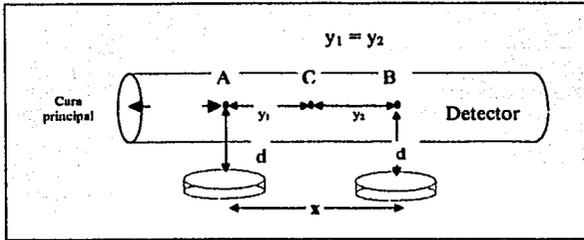


Figura 7.3

Geometría del segundo experimento para encontrar el centro efectivo del detector.

7.3.6 Comprobación

Para verificar que el valor encontrado es el correcto, se repite el experimento pero ahora con los puntos A y B, de la figura 7.3, tales que $y_1 = y_2 = 1$ cm; la distancia de la cara principal al punto A es de 1.657 cm.

Tomando una lectura de 10 minutos para cada dosis, los resultados son los siguientes:

\dot{X}_1' (mR/h)	\dot{X}_2' (mR/h)
0.880	0.771

Aplicando nuevamente la expresión 7.4 para $x = 2$ cm y $d = 2.8$ cm, se llega al resultado:
 $y' = 1.029$ cm.

Por lo que el centro efectivo está a 1.029 cm a la derecha de A, o bien a 2.679 cm de la cara principal obteniendo una diferencia de 0.013 cm, con respecto al resultado anterior. Este valor entra dentro de los límites de la incertidumbre

7.3.7 Conclusiones

Midiendo la distancia del centro efectivo encontrado a la base del detector se tiene una distancia de $y = 2.657$ cm \pm 0.178 cm. Consultando el manual del detector la zona del centelleo está a una pulgada (2.54 cm) de la cara principal, valor que queda dentro de la incertidumbre.

7.4 Segundo experimento (Discriminante negativo)

El siguiente experimento tiene como finalidad encontrar el discriminante negativo. Entre los experimentos realizados se siguió un procedimiento como el mostrado en la figura 7.3, con los siguientes datos: $y_1 = y_2 = 1$ cm, la distancia de la cara principal al punto A es de 5 cm.

7.4.1 Resultados

$x = 4\text{cm}$, $d = 2.8\text{cm}$ y la distancia de la cara principal al punto A de 5cm. Tomando nuevamente 5 valores para cada dosis durante 600 segundos se llegó a los siguientes resultados:

Rapidez de exposición (mR/h)		
	\dot{X}_1	\dot{X}_2
	0.842	0.197
	0.914	0.198
	0.880	0.201
	0.985	0.209
	0.928	0.216
Promedio	0.9098	0.2042

Sustituyendo en el discriminante de la ecuación 7.4 se tiene:

$$\delta = -1.124$$

De acuerdo al análisis del discriminante (sección 7.4.1.1), δ está fuera del intervalo [1.582, 2.121].

7.5 Tercer experimento

Objetivo: Trasladar las conclusiones de los dos primeros experimentos de centro efectivo realizados con el detector de centelleo NaI(Tl) al dosímetro de pluma.

Los detectores de lectura directa descritos al inicio de éste capítulo tienen una escala mínima de 5 mR. Para que el detector marque ese valor a una distancia de al menos la mitad de la altura (5cm) y para la fuente de 81.7 kBq, es necesario un tiempo de aproximadamente 7 horas. Por esta razón se utilizó una fuente de 3.56 MBq.

7.5.1 Material:

- Dosímetro de lectura directa número de serie: 0121399
- Fuente de Cs-137 con una actividad de 3.56 MBq (96.22 μCi) y número de serie DV 660
- Vernier y cronómetro.

7.5.2 Cálculo del equivalente de dosis recibida durante el experimento

A) Para el POE

Suponiendo que la distancia promedio entre la fuente y el operador es de 0.5 m, se tiene la exposición:

$$\dot{X} = 0.127 \frac{mR}{h}$$

El equivalente de dosis será

$$\dot{D} = 1.114 \frac{\mu Sv}{h}$$

B) Para el público

La distancia promedio es de 3m, suponiendo que alguien pudiera estar en la puerta del laboratorio o al otro lado de alguna pared del laboratorio. La rapidez de exposición es:

$$\dot{X} = 3.52 \frac{\mu R}{h}$$

La rapidez del equivalente de dosis es:

$$\dot{D} = 30.8 \frac{nSv}{h}$$

Ambos valores están dentro de los límites propuestos por el laboratorio de radiotrazado.

7.5.3 Desarrollo

Se coloca sobre la parte curva del dosímetro una cinta que permita marcar el punto A sobre la superficie del cilindro. A una distancia de 6.1 cm a la derecha de A se marca un punto B (Figura 7.2).

Se coloca la fuente frente al detector a una distancia $d = 0.985$ cm (medida desde el eje del cilindro al centro geométrico de la pastilla) frente al punto A y se toma una lectura X_1 .

Se repite el procedimiento para el punto B, tomando la lectura X_2 . Ambas lecturas se repiten 5 veces y durante 1800 segundos cada una.

Se repite todo el experimento cambiando el tiempo por 3600 segundos.

7.5.4 Resultados

Tiempo = 30 minutos		Tiempo = 1 hora	
X_1 (mR)	X_2 (mR)	X_1 (mR)	X_2 (mR)
10	20	20	40
10	20	20	35
10	25	20	40

7.5.5 Análisis

Para $t = 30'$

Sustituyendo los promedios en la ecuación 7.4, con $x = 6.1$ cm y $d = 0.985$ cm, se tiene:

$$y = 3.696 \text{ cm}$$

Para $t = 1$ hora

$$y = 3.594 \text{ cm}$$

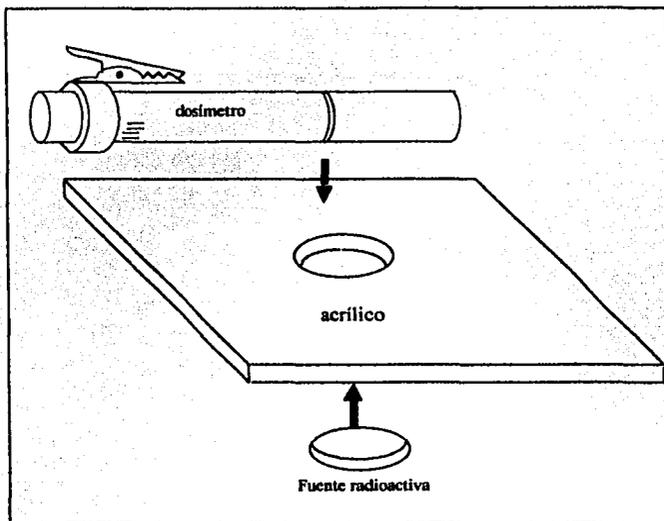


Figura 7.4

Dispositivo creado con el fin de realizar un procedimiento para encontrar el centro efectivo de un detector de lectura directa.

7.5.6 Conclusiones

El detector tiene una línea roja indicando el centro efectivo. En este caso el centro será, en teoría de

$$y = 3.75\text{cm.}$$

7.6 Conclusiones generales sobre el centro efectivo

- El primer experimento es confiable y necesita un menor número de medidas, por lo que se considera un procedimiento óptimo.
- En el primer experimento, la segunda lectura indica qué tan cerca se está de la zona del centelleador y representa una diferencia de medio milímetro, con respecto a esa zona.
- Para aplicar estos resultados se diseña un dispositivo que permite realizar un procedimiento con detectores de lectura directa, obteniendo el dispositivo que se muestra en la figura 7.4.
- El dispositivo de la figura 7.4 fue probado al realizar el tercer experimento.

- **Conclusiones sobre el equivalente de dosis:** En ambos casos se satisfacen los límites de dosis impuestos por el laboratorio de radiotrazado del IMP.
- **Como una sugerencia:** es útil colocar el punto A (figura 7.2), justamente en la arista que se forma entre la cara principal y la superficie curva del cilindro.
- **Es necesario perfeccionar el dispositivo de la figura 7.4 para tener un mejor control de la distancia x de la figura 7.2.**

8. Experimentos de calibración de dosímetros

Para llegar a la calibración de los detectores de lectura directa se realizaron dos experimentos, que son:

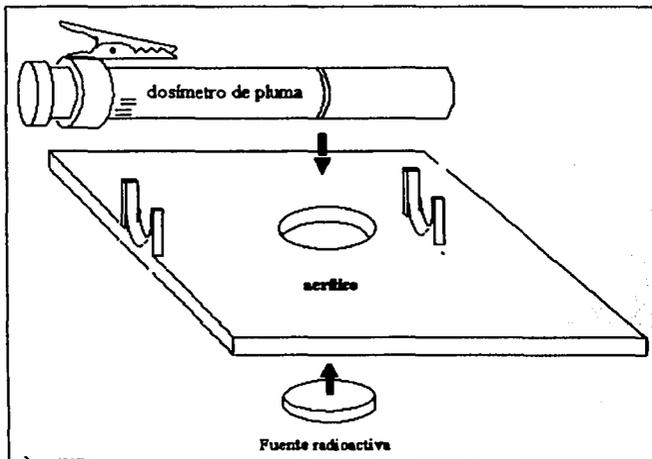


Figura 8.1

Dispositivo para calibración, durante el desarrollo del primer experimento.

8.1 Primer experimento de calibración

Usando el dispositivo de la figura 8.1 se realizó la calibración de los detectores cuyos números de serie se dan en 8.1.2.

8.1.1 Objetivo

Realizar la calibración de los dosímetros de pluma, usando la fuente de Cs-137 de una actividad de 3.56 MBq (96.22 μ Ci).

8.1.2 Material

A) Vernier

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

B) Dosímetros de pluma con los siguientes números de serie y modelos:

Número de serie	Modelo	Marca
480170		Sthepen
0121402	862	Dosimeter
7050135	862L	Dosimeter
7050132	862L	Dosimeter

C) Molde de acrílico para colocar la fuente y el detector, manteniendo la geometría de la figura 8.1.

D) Fuente de ^{137}Cs con una actividad certificada de $356\text{MBq} \pm 4\%$ ($96.22\ \mu\text{Ci}$), con fecha 1 de marzo de 1994.

Número de serie: DV 660.

Características físicas. Dentro de una cápsula de acrílico cilíndrica de 2.5cm. de diámetro y 0.3cm de altura.

8.1.3 Desarrollo

De acuerdo a la expresión (1) de la NOM-024-NUCL-1995 (ver capítulo VI de ésta tesis, ecuación 6.1).

$$A_a = A_e e^{-\lambda t} \quad (8.1)$$

Se calcula la actividad actual (A_a) obteniendo como resultado:

$$A_a = 3.111\ \text{MBq}$$

Ahora, usando la expresión (2) de la NOM-024-NUCL-1995 (ver capítulo VI de ésta tesis, ecuación 6.2).

$$d_t = \sqrt{\frac{\Gamma A_a}{\dot{X}_t}} \quad (8.2)$$

Con \dot{X}_t = Razón de dosis

La exposición total en el intervalo de tiempo de 0 a t está dada por:

$$\dot{X}_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta X}{\Delta t} \right) \quad (8.3)$$

O bien podemos expresarla como

$$\dot{X}_t \approx \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (8.4)$$

Por el teorema del valor medio, se tiene: $\int_0^t \dot{X}_t dt = \dot{X}t = X$. Usando este resultado y sustituyendo 8.4 en 8.2 se tiene:

$$d_t = \sqrt{\frac{\Gamma A_a}{\dot{X}_t}} \quad (8.5)$$

O bien:

$$t = \frac{d_t^2 \dot{X}_t}{\Gamma A_a} \quad (8.6)$$

Empleando la norma NOM-024-NUCL-1995, se calcula el tiempo necesario para que el detector marque 1/3 y 2/3, del total de la escala del dosímetro. El dispositivo de la figura 8.1 y el diámetro del detector fijan la distancia, el tiempo es el que varía en función de esa distancia.

8.1.4 Resultados:

Tabla 8.1

Características del dosímetro	Marca	Sthepen	Dosimeter	Dosimeter	Dosimeter
	Modelo	X	862	862L	862L
	Número de serie	480170	0121402	7050135	7050132
Distancia centro del detector a centro de la fuente		0.905 cm	0.825 cm	0.830 cm	0.830 cm
Tiempo 1/3		11'32.19"	9'35.22"	9'42.22"	9'42.22"
Dosis esperada		66.6 mR	66.6 mR	66.6 mR	66.6 mR
L _{1/3}	1ª lectura	50 mR	50 mR	55 mR	55 mR
	2ª lectura	50 mR	55 mR	50 mR	60 mR
	3ª lectura	50 mR	55 mR	50 mR	65 mR
L _{1/3} (Promedio)		50mR	53.333mR	51.667mR	60mR
Desviación estándar		0	2.88675135	2.88675135	5
Factor de calibración (FC _{1/3})		1.333	1.250	1.290	1.111
Tiempo 2/3		23'04.38"	19'10.44"	19'42.22"	19'42.22"
Dosis esperada		133.3mR	133.3mR	133.3mR	133.3mR
L _{2/3}	1ª lectura	105 mR	110 mR	110 mR	110 mR
	2ª lectura	100 mR	100 mR	95 mR	115 mR
	3ª lectura	100 mR	100 mR	110 mR	115 mR
L _{2/3} (Promedio)		101.667mR	103.333mR	105mR	113.333mR
Desviación estándar		2.887	5.774	8.660	2.887
Factor de calibración (FC _{2/3})		1.311	1.290	1.270	1.176
Factor de calibración FC=0.5(FC _{1/3} +FC _{2/3})					
Incertidumbre*(%)		10.78	10.23	10.69	9.23
Condición (FC _{1/3} -FC _{2/3})/FC<0.2		0.017	-0.032	0.016	-0.057

Nota:

* Las incertidumbres no son iguales para todos los casos porque la expresión para ellas es función de la distancia e incluso del tiempo. Sin embargo, para poder aplicar la fórmula 6.8 para las incertidumbres hay que calcular un gran número de datos.

8.1.5 Observaciones

1. Con 1 mm. de variación en la distancia la lectura cambia hasta 10 mR
2. Cuando se ajustan a cero los dosímetros de pluma, dejando el cargador en la misma escala, estos se ponen a cero casi automáticamente o bien hay una leve variación fácilmente controlable (no se pierde la aguja). Esto se aprecia principalmente en los dosímetros del mismo modelo, aunque en diferente modelo la variación es muy poca y se puede localizar la aguja fácilmente también, pues esta se mueve levemente a la izquierda.
3. La incertidumbre asociada a la lectura es la mitad del intervalo más pequeño en que está dividida la escala y su contribución en la incertidumbre de la medición es considerable, por lo que se usará en adelante como mínima escala 5 mR y su incertidumbre de $\pm 3\text{mR}$.
4. La fuente con la que se calibró tiene una actividad que limita a calibrar dos detectores con los tiempos marcados en la tabla 8.1 y con la geometría del experimento diseñado, además hay que tener mucho cuidado con los tiempos medidos. Para lograr una cantidad mayor de dosímetros calibrados en menor tiempo es necesario usar una fuente de mayor actividad y otro procedimiento.
5. De acuerdo a la norma un detector con más del 20% de desviación no se puede usar, el factor de calibración menor a 0.8 o mayor a 1.2 implica un incumplimiento de la norma.

8.2 Segundo experimento de calibración

De acuerdo a la norma *NOM-024-NUCL-1995*, si la fuente de calibración incluye la rapidez de exposición para una distancia específica entonces se puede calcular la rapidez de exposición actual con la expresión:

$$\dot{X}_a = \dot{X}_c e^{-\lambda t} \quad (8.7)$$

Empleando la expresión 8.2, se tiene: $\left(\frac{d_m}{d_a}\right)^2 = \frac{X_a}{X_m}$, con lo que se calcula d_m

$$d_m = d_a \left(\frac{X_a}{X_m} \right)^{1/2} \quad (8.8)$$

d_m es la distancia en la cual se obtiene la rapidez de exposición máxima de la escala del dosímetro.

Aplicando la expresión (8.6), para un detector en la misma posición d_m , entonces:

$$t_m = \frac{d_m^2 X_m}{\Gamma A_a} \text{ y } t_{1/3} = \frac{d_m^2 X_{1/3}}{\Gamma A_a}, \text{ con la razón entre ambos se obtiene } t_{1/3} = \frac{X_{1/3}}{X_m} t_m.$$

Generalizando:

$$\frac{t_i}{t_{\text{max}}} = \frac{X_i}{X_{\text{max}}} t = \left(\frac{X_i}{X_{\text{max}}} \right) \quad (8.9)$$

TEMS CON
 FALLA DE ORIGEN

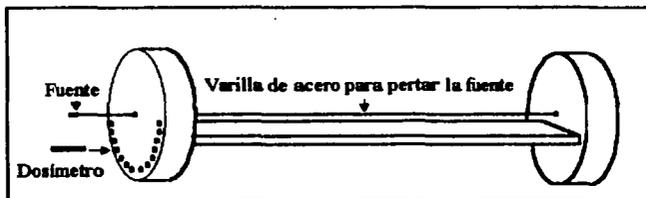


figura 8.2
Dispositivo para calibración, durante el desarrollo del segundo experimento

el tiempo necesario para tener una exposición entre $1/3$ y $2/3$ de la escala del dosímetro, a una distancia fija.

La fuente utilizada para el segundo experimento de calibración es una fuente ^{137}Cs , cuyo certificado de calibración para rapidez de exposición es $\dot{X}_c = 3.26\text{mR/h}$.

Actualizando el valor de la rapidez de exposición al momento de efectuar la calibración ($\dot{X}_a = 0.00218\text{ R/h} = 2.18\text{ mR/h}$), se encuentran los tiempos $t_{1/3}$ y $t_{2/3}$.

El tiempo t_1 para el cual se tiene un tercio de la escala (66.67mR) es $t_{1/3}$. Y para obtener dos tercios de la escala (133.33 mR) el tiempo t_2 es $t_{2/3}$. Sus valores son:

$$t_{1/3} = 20 \text{ minutos} \quad \text{y} \quad t_{2/3} = 40 \text{ minutos}$$

Se calcula la distancia d para la cual el dosímetro marcaría en su escala máxima; en una hora es: $d = 0.10435\text{ m} = 104.35\text{ mm}$

Para calibrar el mayor número de dosímetros posible, tomando en cuenta la distancia encontrada, se construye el dispositivo de la figura 8.2.

8.2.1 Descripción del dispositivo para calibrar

El dispositivo consta de dos cilindros de madera de 26.5 cm de diámetro y 7.5 cm de altura unidos por un travesaño de 10 cm de ancho, 1 cm de angosto y 140 cm de largo, formando una *haltera*. Uno de los cilindros tiene un orificio central que atraviesa al cilindro y 14 orificios radiales con centro en el primer orificio y que no atraviesan al cilindro, este cilindro se denominó *cilindro principal*. El segundo cilindro sólo tiene un orificio y se denominó *cilindro secundario*.

Las piezas están empotradas sin usar clavos ni material metálico alguno.

La *haltera* se coloca sobre un banco de madera a una altura de 1.30 cm sobre el nivel del suelo para cumplir con la norma mencionada. El banco de madera tampoco tiene elementos metálicos.

La selección del material (madera), se realizó en base a su bajo coeficiente de atenuación para la energía de 661 keV, propia de la fuente de ^{137}Cs , que decae a ^{137}Ba , la cual tiene una emisión monocromática (ver figura 1.1)

8.2.2 Material

- Fuente de ^{137}Cs marca "Technical", *serial No. : CS1533, NEN order No. :784837*. Certificado de calibración con fecha marzo 13 de 1985. El certificado de esta fuente es de razón de exposición en función de la distancia.
- Dispositivo para calibrar (figura 8.2).
- Banco para sostener el dispositivo para calibrar, hecho con las mismas características del dispositivo
- Cronómetro
- Dosímetros de pluma con las siguientes características:

Número de serie	Modelo	Marca
8100098	862L	Dosimeter
7050146	862L	Dosimeter
0121400	862	Dosimeter
0121402*	862	Dosimeter
7050132*	862L	Dosimeter
7050149	862L	Dosimeter

Observación: Durante la realización de los experimentos algunos dosímetros estaban en uso, por lo que sólo los marcados con * se usaron en los dos experimentos de calibración, mencionados en éste capítulo, los demás se usaron sólo en este experimento.

8.2.3 Desarrollo para la calibración

Para calibrar dosímetros de lectura directa (o de pluma), se sigue el procedimiento que se da a continuación:

1. Se coloca la fuente cerrada sobre un banco de madera a una distancia de 1 m, ajustando la altura (que sobrepase un metro), de modo que la varilla pueda penetrar en el orificio del blindaje de la fuente. Cuando la varilla esté posicionada en los orificios de los dos cilindros de la *halter*.
2. Se colocan los dosímetros a cero con el cargador especial y se colocan en los orificios del cilindro principal.
3. Se calcula la distancia que debe sobresalir el extremo del mango de la varilla para que la fuente quede perpendicular a los dosímetros y lo más cerca posible al centro efectivo de éstos.
4. Se coloca el cronómetro a cero
5. Se abre el blindaje de la fuente y se enrosca la varilla en la fuente.
6. Se saca la varilla a la distancia calculada y se acciona el cronómetro.
7. Después de 20 minutos se mete la varilla con la fuente al blindaje y se retiran los dosímetros.
8. Se anota la primer lectura de los dosímetros y sin regresarlos a cero se repiten los pasos 6 y 7.
9. Se realiza la lectura de los dosímetros y se anota.
10. Se repiten los pasos 6 hasta el 9, iniciando con el cronómetro a cero, hasta completar tres lecturas de 20 minutos y tres de 40 minutos.

8.2.4 Resultados:

Al calibrar los 6 detectores de lectura directa se obtienen los resultados de la tabla 8.2

Tabla 8.2

Características del dosímetro	Marca	Dosímetro	Dosímetro	Dosímetro	Dosímetro	Dosímetro	Dosímetro
	Modelo	862L	862L	862	862	862L	862L
	Número de serie	8100098	7050146	0121400	0121402	7050132	7050149
Distancia centro del detector a centro de la fuente*		10.435 cm	10.435 cm	10.435 cm	10.435 cm	10.435 cm	10.435 cm
Tiempo 1/3 (minutos)		20	20	20	20	20	20
Dosis esperada		66.66 mR	66.66 mR	66.66 mR	66.6 mR	66.6 mR	0.0666 R
L _{1/3}	1ª lectura	60 mR	70 mR	65 mR	60 mR	65 mR	70 mR
	2ª lectura	55 mR	65 mR	60 mR	55 mR	65 mR	070 mR
	3ª lectura	60 mR	70 mR	65 mR	Saturado - 60 mR	60 mR	075 mR
L _{1/3} (Promedio)		58.33 mR	68.33 mR	63.33 mR	58.33 mR	63.33 mR	71.67 mR
Desviación estándar		2.357	2.357	2.357	2.357	2.357	2.357
Factor de calibración (FC _{1/3})		1.143	0.976	1.053	1.143	1.053	0.930
Tiempo 2/3 (minutos)		40	40	40	40	40	40
Dosis esperada (mR)		133.33	133.33	133.33	133.33	133.33	133.33
L _{2/3}	1ª lectura	110 mR	130 mR	125 mR	110 mR	120 mR	150 mR
	2ª lectura	105 mR	130 mR	120 mR	110 mR	120 mR	140 mR
	3ª lectura	115 mR	140 mR	125 mR	110 mR	120 mR	145 mR
L _{2/3} (Promedio)		110 mR	133.33 mR	123 mR	110 mR	120 mR	145 mR
Desviación estándar		4.082	4.710	2.357	0	0	4.082
Factor de calibración (FC _{2/3})		1.212	1	1.084	1.333	1.111	0.920
Factor de calibración FC=0.5(FC _{1/3} +FC _{2/3})							
Incertidumbre*(%)		9.999	9.999	9.999	9.999	9.999	9.999
Condición (FC _{1/3} -FC _{2/3})/FC<0.2		0.058	0.025	0.029	0.154	0.054	0.011

* Las incertidumbres son iguales para todos los casos porque la expresión para ellas es prácticamente una constante, de acuerdo a la expresión 8.7 y a que la distancia y el tiempo no varían.

8.3 Equivalente de dosis absorbida

A) Para un POE

Para encontrar el equivalente de dosis que recibe el experimentador durante la calibración en función del tiempo, dividimos el problema en los diferentes procesos que se llevan a cabo para la calibración:

- H₁ Sacar el contenedor de la fuente del pozo, acarrearlo hasta el lugar donde se realiza la calibración y colocarlo en la posición adecuada para que pueda sacarse la fuente.
- H₂ Ajustar el contenedor para que entre la varilla *portafuente* y atornillarla con la fuente.
- H₃ Colocar los dosímetros de pluma en sus bases, sacar la fuente y colocarla en la posición adecuada, esperar 20 minutos, meter la fuente al contenedor y retirar los dosímetros.
- H₄ Poner a cero los dosímetros, colocarlos en sus bases.
- H₅ Introducir al contenedor la fuente y atornillarla, cerrar el contenedor, llevarlo al pozo y cerrar el pozo.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 8.3

Equivalente de dosis	Equivalente de dosis por hora ($\mu\text{Sv/h}$)	Tiempo de exposición (segundos)	Equivalente de dosis (μSv)
Fondo.	0.132	300	0.011
H ₁	0.126	540	0.019
H ₂	0.040	233	0.003
H ₃	0.243	1290	0.087
H ₄	0.170	247	0.012
H ₅	0.116	199	0.006

En una jornada de ocho horas se realizan a lo mas 17 medidas (de veinte minutos), recibiendo en cada medida un equivalente de dosis H₃ y H₄, en toda la jornada se recibirán una vez los equivalentes de dosis de H₁, H₂ y H₅. De donde la dosis equivalente es:

$$T_{\text{total}} = H_1 + H_2 + n \times (H_3 + H_4) + H_5$$

en donde n representa el número de medidas que se realizan ($n=17$ máximo en una jornada).

De los valores encontrados:

$$T_{\text{total}} = 1.706 \mu\text{Sv}$$

El promedio es de $0.213 \mu\text{Sv/h}$. Si el año tiene 250 días laborables, el usuario recibe una dosis anual de $426.62 \mu\text{Sv}$, mismo que cumple con los límites mencionados para el IMP, es decir:

$$426.62 \mu\text{Sv} < 20 \text{ mSv}$$

8.4 Conclusiones

El segundo experimento es más preciso para efectos de calibración y cumple con los límites de dosis efectiva para un POE.

Debido a que se pueden calibrar más detectores con el mínimo de tiempo invertido, es el método óptimo. Para este diseño de experimento se elaboró un procedimiento de calibración (ver apéndice).

Aunque la norma marca una expresión para calcular la incertidumbre (6.8) del factor de calibración, para aplicarla sería conveniente tener alrededor de 50 lecturas y no tres.

Falta determinar cómo afectan posibles variaciones indeseadas, como las que se describen en el siguiente capítulo.

9. Valoración de los efectos no deseados en el proceso de calibrado

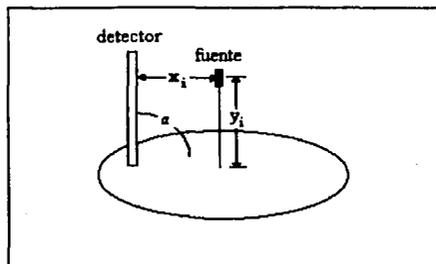


Figura 9.1

Esquema de la cara principal del dispositivo para calibración (figura 8.2), en donde se muestran dos variables: $x_i(a)$ y y_i .

Una vez probado el dispositivo de la figura 8.2, se plantea determinar el efecto que pueden tener las siguientes variables:

1. Posición vertical del detector (PVD); se usarán tres posiciones: -2 cm, 0 cm y +2 cm (en la figura 9.1 x_i -2cm, x_i y x_i -2cm).
2. Posición de la fuente (PF), se usarán tres posiciones: -2 cm, 0 cm y +2 cm (en la figura 9.1 y_i -2cm, y_i y y_i -2cm).
3. Permutación de la base del detector (PD); se seleccionarán tres posiciones en la base de madera para colocar los detectores, a, b y c.
4. Tiempo de exposición; se tomarán tres valores con referencia al tiempo establecido de exposición, siendo éstos: -120 seg, 0 seg y +120 seg.
5. Variación de la lectura de acuerdo al detector mismo.
6. Variación de la lectura de acuerdo a experimentos en diferentes días

Para ello se realizaron dos experimentos, con el diseño de experimento estadístico llamado latino cuadrado¹, que se describen en el presente capítulo.

9.1 El diseño latino cuadrado

Es un diseño experimental basado en el principio de bloques, variando tres factores de acuerdo a una matriz cuadrada (ver figura 9.2), y es usado para eliminar fuentes externas de variación o bien para ver que tanto influyen esas fuentes indeseadas en un experimento¹.

¹ Douglas C. Montgomery. Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons. N Y 1976.

	A	B	C
a	α	β	γ
b	β	γ	α
c	γ	α	β

Figura 9.2
Matriz del diseño latino cuadrado

El cálculo para el análisis de varianza se muestra en la tabla 9.1:

Tabla 9.1

Fuente de varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Mínimos cuadrados	F_0
Tratamiento	$SS_T = \sum_{j=1}^p \frac{y_{.j}^2}{p} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$p-1$	$\frac{SS_T}{p-1}$	$F_0 = \frac{MS_T}{MS_E}$
Renglones	$SS_R = \sum_{i=1}^p \frac{y_{i.}^2}{p} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$p-1$	$\frac{SS_R}{p-1}$	
Columnas	$SS_C = \sum_{k=1}^p \frac{y_{.k}^2}{p} - \frac{y_{..}^2}{N}$	$p-1$	$\frac{SS_C}{p-1}$	
Error	SS_E (por sustracción)	$(p^2-1)-p(p-1)$	$\frac{SS_E}{(p-1)(p-2)}$	
Total	$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - \frac{y_{..}^2}{N}$	(p^2-1)		

En donde p es el número de columnas o renglones, N el número de celdas ($p \times p$).

9.2 Primer experimento

En el primer experimento sólo se estudiará cómo afecta a la calibración la permutación de los detectores (etiquetado con "PD"), la variación entre un experimento y otro, realizado en diferentes días (etiquetado con "experimento") y la variación entre un dosímetro a otro (etiquetado con "dosímetro").

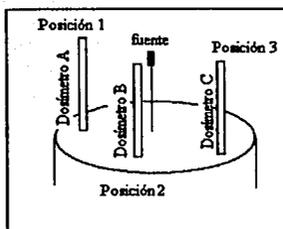


Figura 9.3

Posición inicial de los dosímetros para estudiar su comportamiento de acuerdo a su permutación

9.2.1 Material

- Dosímetros.
- Fuente de Cs-137 de 10 mCi con las siguientes características: *serial No. : CS1533* y *NEN order No:784837*. Certificado de calibración de technical data, con fecha: marzo 13 de 1985.
- "Haltera"
- Cronómetro
- "Cargador" de dosímetros.
- Extensiones de acrílico para lograr las inclinaciones de los detectores y las diferentes alturas.

9.2.2 Desarrollo experimental

De acuerdo a la figura 9.3 se escogieron tres posiciones para colocar cada detector y se permutaron. Se realizaron los experimentos dos veces durante 6 días (del 31 de enero del 2001 al 7 de febrero).

El tiempo durante la realización del experimento fue constante, los detectores se colocaron a 90° con respecto a la base y la posición de la fuente fue también constante.

9.2.3 Resultados

Tabla 9.2

Experimento	Dosímetro	PD	Resultados			
			Fecha	y_1 (mR)	Fecha	y_1 (mR)
1	A	1		70		70
1	B	2	31/01/01	70	5/02/01	65
1	C	3		70		65
2	A	3		60		70
2	B	1	3/02/01	70	6/02/01	65
2	C	2		70		70
3	A	2		65		70
3	B	3	4/02/01	65	7/02/01	60
3	C	1		70		70

9.2.4 Análisis de datos

Los resultados los podemos agrupar en la siguientes tablas:

Tabla 9.3

		Experimento			y _{i...}
		1	2	3	
Dosímetros	A	70 (a)	60 (c)	65 (b)	195
	B	70 (b)	60 (a)	65 (c)	205
	C	70 (c)	70 (b)	70 (a)	210
y _{..k}		210	200	200	
y _{..i}		y _{..1} = 210	y _{..2} = 205	y _{..3} = 195	y _{...}} = 610

De acuerdo a la tabla 9.1, la tabla de varianza queda:

Tabla 9.4

Fuente de error	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados promedio	F ₀	F _{2,2,5%}
Dosímetro	38.8891	2	19.44455	7.0006	19
Lecturas	38.8891	2	19.44455	7.0006	19
PD	22.2223	2	11.11115	4.0003	19
Error	5.5551	2	2.77755		
Total	105.5556				

Para la repetición del experimento:

Tabla 9.5

		Experimento			y _{i...}
		1	2	3	
Dosímetros	A	70 (a)	70 (c)	70 (b)	210
	B	65 (b)	65 (a)	60 (c)	190
	C	65 (c)	70 (b)	70 (a)	205
y _{..k}		200	205	200	
y _{..i}		y _{..1} = 205	y _{..2} = 205	y _{..3} = 195	y _{...}} = 605

De acuerdo a la tabla 9.1, la tabla de varianza queda:

Tabla 9.6

Fuente de error	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados promedio	F ₀	F _{2,2,5%}
Dosímetro	72.2223	2	36.11115	13.0004	19
Lecturas	22.2223	2	11.11115	4.0001	19
PD	5.5556	2	2.7778	1	19
Error	5.5554	2	2.7777		
Total	105.5556				

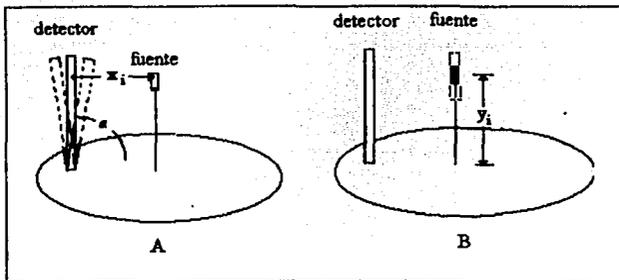


Figura 9.4

Representación de las variables PVD y PF del segundo experimento

9.2.5 Conclusiones

Ninguna de las tres variables seleccionadas, al cambiarlas, muestran diferencias estadísticamente significativas mayor al 5%.

9.3 Segundo experimento

En este experimento lo que se busca es saber qué tanto afectan las variables:

En la figura 9.4-A se esquematiza la variación del ángulo del detector con respecto a la base. A esta variable se le llamará PVD.

Asimismo en la figura 9.4-B se esquematiza la variación de la distancia de la fuente a la base del detector, variable que se etiquetará con PF.

La tercer variable a tomar en cuenta es el tiempo.

9.3.1 Material

El mismo que se menciona en 9.2.1

9.3.2 Desarrollo experimental

La variable PVD tiene tres valores sumados a y , (figura 9.4-B), que son +2 cm, -2 cm y 0 cm.

La variable PF tiene tres valores sumados a xi (Figura 9.4-B), que son +2 cm, -2 cm y 0 cm.

Cada experimento se desarrolló de modo que la variable que corresponde al tiempo fuera de 20 minutos sumándole un incremento de +2, -2 y 0 minutos.

9.3.3 Resultados

Tabla 9.7

PVD (cm)	PF (cm)	Tiempo (segundos)	Resultados (mR)	
			Y ₁	Y ₂
-2	-2	-120	60	60
0	0	0	75	70
2	2	120	65	65
0	-2	120	70	65
2	0	-120	65	60
-2	2	0	75	75
2	-2	0	60	60
-2	0	120	95	90
0	2	-120	60	65

9.3.4 Análisis

Tabla 9.8

		PF			Y _{1..}
		-2 cm	0 cm	2 cm	
PVD	-2 cm	60 mR (a)	95 mR (c)	75 mR (b)	230
	0 cm	70 mR (c)	75 mR (b)	60 mR (a)	205
	2 cm	60 mR (b)	65 mR (a)	65 mR (c)	190
Y _{..k}		190	235	200	
Y _{.j.}		Y _{.1.} = 185	Y _{.2.} = 210	Y _{.3.} = 230	Y _{...} = 625

De acuerdo a la tabla 9.1, la tabla de varianza queda:

Tabla 9.9

Fuente de error	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados promedio	F ₀	F _{2,3%}
PF	372.2222	2	186.1111	9.57	19
PVD	272.2222	2	136.1111	7.00	19
Tiempo	338.8889	2	169.44445	8.71	19
Error	38.8889	2	19.44445		
Total	1022.2222				

Tabla 9.10

		PF			Y _{1..}
		-2 cm	0 cm	2 cm	
PVD	-2 cm	60 mR (a)	90 mR (c)	75 mR (b)	225
	0 cm	65 mR (c)	70 mR (b)	65 mR (a)	200
	2 cm	60 mR (b)	60 mR (a)	65 mR (c)	185
Y _{..k}		185	220	205	
Y _{.j.}		Y _{.1.} = 185	Y _{.2.} = 205	Y _{.3.} = 220	Y _{...} = 610

De acuerdo a la tabla 9.1, la tabla de varianza queda:

Tabla 9.11

Fuente de error	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados promedio	F ₀	F _{2,2,5%}
PF	205.5556	2	102.7778	2.85	19
PVD	272.2223	2	136.11115	3.77	19
Tiempo	205.5556	2	102.7778	2.85	19
Error	72.2221	2	36.11105		
Total	755.5556				

9.3.5 Conclusiones

Ninguna de las tres variables seleccionadas, al cambiarlas, muestran diferencias estadísticamente significativas al 5%. Por lo que se concluye que el equipo (dosímetros) no es lo suficientemente sensible a estas variaciones.

9.4 Conclusiones generales

El primer experimento muestra las variables "experimento" (variación entre un experimento y otro), "PD" (permutación de la posición de los detectores), y "dosímetro" (La variación en la lectura de un dosímetro a otro). Las tres variables no muestran diferencias estadísticamente significativas al 5%. La variable "dosímetro" contribuye en mayor proporción a la varianza, sin ser estadísticamente significativa (tabla 9.6). Estas tres variables tienen el mismo orden de magnitud en su contribución a la incertidumbre.

El segundo experimento muestra las variables "PVD" (variación entre la posición vertical del detector con respecto a la base de la fuente), "PF" (variación en la posición de la fuente), y "tiempo" (una variación en la lectura del tiempo). Las tres variables no muestran diferencias estadísticamente significativas al 5%.

- A) Con respecto al tiempo, el tiempo total medido es de 20 minutos con una variación del 10% (2 minutos).
 - B) Con respecto a la variación entre la posición de la fuente (PF) la distancia a la fuente es de 10cm y la variación fue de 2 cm y - 2 cm perpendiculares a la distancia del detector a la fuente, usando el teorema de Pitágoras, se encuentra que la variación en la distancia es de 0.198 cm, es decir del 1.98%.
 - C) En relación a la variación entre la posición vertical del detector con respecto a la base de la fuente (PVD), la distancia a la fuente es de 10 cm \pm 2 cm, el 20%
- Las tres variables no muestran diferencias estadísticamente significativas al 5%, y las tres tienen el mismo orden de magnitud en su contribución a la incertidumbre.

10. Conclusiones

Para lograr la certificación del laboratorio se necesita una fuente calibrada de ^{60}Co con certificado de calibración para rapidez de exposición sea de aproximadamente 3 mR/h. Además es necesario tomar en cuenta los siguientes aspectos:

10.1 Condiciones del laboratorio

El laboratorio debe estar lejos de material que pueda producir ondas electromagnéticas, como cableado, cajas de conexiones eléctricas, etc.

De acuerdo a la fuente que se sugiere utilizar para el calibrado, el espacio de calibración debe estar aislado del público en al menos 5 metros a la redonda, con la fuente en el centro. El operador debe seguir todas las recomendaciones de seguridad y tomar en cuenta las distancias con respecto a las fuentes, como se menciona en los capítulos 8 y 9.

10.2 Centro efectivo

Para encontrar el centro efectivo de un detector de lectura directa (dosímetro), se creó el procedimiento 5 (apéndice).

10.3 Procedimiento de calibración

Para calibrar dosímetros de lectura directa (o de pluma), se crearon los procedimientos 1,2,3 y 4 del apéndice y el instructivo que aparece en él mismo. Estos procedimientos se pueden crear en forma similar con la fuente de ^{60}Co , ya que la norma también la pide.

10.4 Dosis

Las dosis calculadas para las diferentes actividades de los procedimientos de calibración están dentro de los límites establecidos por la norma mexicana y de los establecidos por el IMP.

10.5 Variables críticas en la calibración de dosímetros de lectura directa

Se manejaron seis variables críticas para la calibración de dosímetros.

1. Variación entre un experimento de calibración y otro.
 2. Permutación de la posición de los detectores.
 3. La variación en la lectura de un dosímetro a otro.
- Aunque estas tres variables no muestran diferencias estadísticamente significativas al 5%, el valor para "dosímetro" es mayor en su contribución al error (tabla 9.6). Las siguientes variables tienen el mismo orden de magnitud en su contribución a la incertidumbre.
4. Variación en el tiempo de exposición. El tiempo total medido es de 20 minutos con una variación del 10% (2 minutos).
 5. Variación entre la posición de la fuente perpendicularmente con respecto a distancia a la fuente (10cm, la variación que se manejó fue del 1.98%).
 6. Variación entre la posición vertical del detector con respecto a la base de la fuente la distancia a la fuente (del 20%).

10.6 Importancia del certificado de calibración

Algunas fuentes están calibradas en razón de dosis como función del tiempo y otras como función de la distancia. En el presente trabajo se concluye que es más útil la primera.

10.7 Necesidad de instrumentos calibrados para la calibración de dosímetros de lectura directa.

De acuerdo al capítulo 9, no son necesarios un reloj calibrado, ni una regla calibrada para este procedimiento ya que, al usar la fuente cuya rapidez de exposición es de 3.26 mR/h (de una actividad aproximada de 10 mCi), la variación en el tiempo en un 10% y la de la distancia en un 20% no son estadísticamente significativas al 5%.

10.8 Tiempo de calibrado

Con el dispositivo creado se pueden calibrar una máximo 15 dosímetros simultáneamente. Suponiendo que en el mejor de los casos se repita alguna medida, el mínimo número de medidas sería de cuatro, de acuerdo a la norma. El tiempo total para realizar éstas medidas es de dos horas.

Suponiendo que con la fuente de ^{60}Co , se invierta un tiempo de dos horas más, se requieren de al menos cuatro horas para calibrar 15 detectores.

Si se desea encontrar el centro efectivo de un detector, es necesario invertir al menos tres horas en ello.

10.9 Incertidumbres

Para calcular las incertidumbres como lo marca la norma, es necesario tomar mucho más de tres lecturas. El tiempo para calibrar un detector es mayor y el costo para hacerlo es muy alto.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Apéndice

**Procedimientos
para calibrar
dosímetros de lectura directa**

**PROCEDIMIENTO 1
CALIBRACIÓN DE MONITORES DE RADIACIÓN IONIZANTE**

Al revisar cuidadosamente el monitor se encontraron las siguientes anomalías físicas:

- Golpes en el detector
- Rotura de la ventana del detector
- Golpes en el cuerpo del monitor
- Carátula dañada
- Cable defectuoso del detector
- Baterías con fuga de electrólito
- Oxido en los bornes de contacto de las baterías
- Interruptor de encendido o de selección de escala golpeado
- Perillas faltantes
- Ninguna de las anteriores

SI

NO

Al revisar cuidadosamente el monitor se encontraron las siguientes anomalías eléctricas :

- Baterías agotadas
- Falsos contactos en los controles del instrumento
- Aguja de la carátula oscilando, obstruida o doblada
- Respuesta intermitente del monitor
- Ninguna de las anteriores

SI

NO

Supervisó : _____

Visto Bueno : _____

PROCEDIMIENTO 2
chequeo periódico

(mínimo una vez al año)

Con el objeto de cumplir con las especificaciones técnicas del fabricante anotar con una X el requisito que se cumple y anotar la fecha en el lugar indicado.

	Si	No	Fecha
Manual completo de servicio.			
Sin contaminación radioactiva.			
Cursor ajustado a cero o al valor propuesto por el fabricante.			
Establecidos los parámetros eléctricos del monitor			
Firma :			
Fecha :			

Supervisó : _____

Visto Bueno : _____

PROCEDIMIENTO 3**(Condiciones para la calibración)**

Marque con una X si se cumplen las siguientes condiciones.

Únicamente hay presencia de la fuente de calibración.

Temperatura de operación del monitor especificado por el fabricante.

Temperatura del ambiente.

Persona que calibró

Fecha.

Supervisó: _____

Visto Bueno: _____

PROCEDIMIENTO 4

(Una vez al año)

Corrección de la distancia del calibrador

De acuerdo a la norma *NOM-024-NUCL-1995*, si la fuente de calibración incluye la rapidez de exposición para una distancia específica entonces se puede calcular la rapidez de exposición actual con la expresión:

$$\dot{X}_a = \dot{X}_c e^{-\lambda t}$$

Calcular con la expresión

$$d_1 = d_a \left(\frac{\dot{X}_a}{\dot{X}_{max}} \right)^{1/2} \quad (a)$$

la distancia en la cual se obtiene la rapidez de exposición máxima de la escala del dosímetro.

Calcular con la expresión

$$t = \left(\frac{X_t}{\dot{X}_{max}} \right) \quad (b)$$

el tiempo necesario para tener una exposición entre 1/3 y 2/3 de la escala del dosímetro, a una distancia fija.

Los cálculos llevan a lo siguiente:

$\dot{X}_c = 3.26 \text{ mR/h}$, según el certificado de calibración de Technical Data a la fuente con los siguientes datos: *serial No. : CS1533* y *NEN order No. : 784837*. Realizado en marzo 13 de 1985.

$\lambda = 6.3247 \times 10^{-5} \text{ días}^{-1}$, tomando en consideración el valor de vida media recomendada por el certificado de 30.1 años

$\dot{X}_a = 0.00218 \text{ R/h} = 2.18 \text{ mR/h}$ Tomada al día 30 de noviembre de 1999.

Con estos valores encontrar la distancia d para la cual el dosímetro marcaría en su escala máxima:

$d =$

los tiempos para los cuales se tiene un tercio de la escala $t_{1/3}$ y dos tercios de la escala $t_{2/3}$ son:

$t_{1/3} = 20$ minutos

$t_{2/3} = 40$ minutos

Verificar la distancia en el calibrador.

Supervisó: _____

Visto Bueno: _____

PROCEDIMIENTO 5 (Centro efectivo)

Objetivo: Encontrar el centro efectivo de un detector.

Material

- Una fuente de Cs-137 con una actividad de 91.9kBq calibrada al 18 de octubre de 1995 (el experimento se realizó los últimos días de octubre de 2000), con una incertidumbre de $\pm 2.2\%$. De acuerdo a los cálculos correspondientes la actividad al momento del experimento fue de 81.7 kBq.
- Un monitor "EasySpec" marca "Canberra" con número de serie 11982244 y número de inventario del IPM 0003219.
- Un Vernier.

Desarrollo

El experimento consiste en tomar dos medidas con la geometría indicada en la figura A (ayudándose con el instrumento de la figura B), en ella se muestran dos distancias y_1 y y_2 que distan del hipotético centro efectivo C a los puntos A y B respectivamente.

Se coloca primero la fuente debajo del punto A a una distancia d de la fuente (ésta distancia se puede suponer desde el eje del cilindro hasta el centro de la pastilla de la fuente). Después se coloca debajo del punto B a la misma distancia d y durante el mismo tiempo. A la dosis tomada en el primer caso le llamamos D_1 y D_2 para el segundo caso.

Sugerencia: El valor de x debe ser mas del doble que el de d

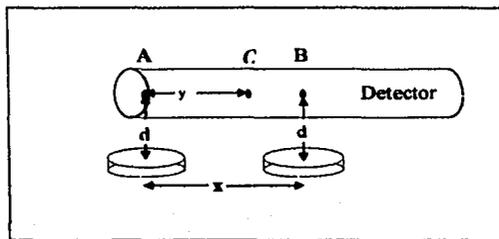


Figura A

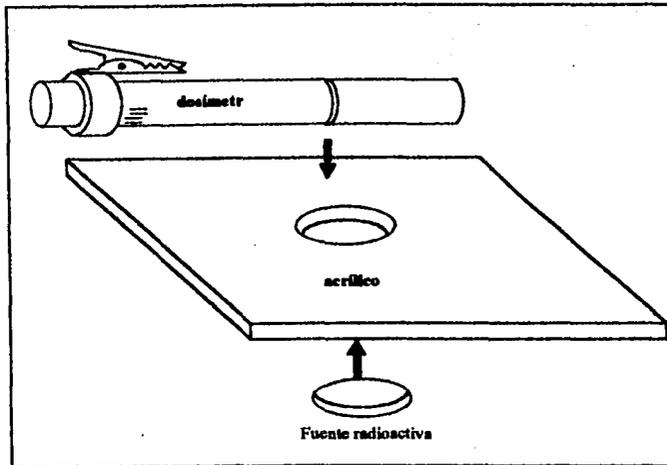


Figura B

1.- Medir las distancias x y d .
Valores obtenidos:

$d =$	
$x =$	

Con estos valores calcular

$\left[\frac{(x^2 + 2d^2) - x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right]$	= Valor m	
$\left[\frac{(x^2 + 2d^2) + x\sqrt{x^2 + 4d^2}}{2d^2} \right]$	= Valor M	

Medir D_1 y D_2 una vez. Con los valores encontrados calcular la razón $\gamma = D_2/D_1$

$\gamma =$	
------------	--

La razón encontrada debe ser un valor que esté entre valor m y valor M . En caso de no cumplirse la condición, debe aumentar el valor de x y repetir todo el proceso.

Medir tres veces D_1 y D_2 para que con el promedio se obtenga una γ , sustituir este valor en la expresión:

$$y = \frac{-x + \sqrt{x^2 \gamma - (\gamma - 1)^2 d^2}}{\gamma - 1}, \text{ con } \gamma \neq 1$$

$y =$	
-------	--

Llene una opción:

- Si y es positivo el centro efectivo está a $y =$ _____ cm a la derecha del punta A (ver esquema)
- Si y es negativo el centro efectivo está a $y =$ _____ cm a la izquierda del punto A

Supervisó : _____

Visto Bueno : _____

INSTRUCCIONES DE CALIBRADO

Se diseña un dispositivo para la calibración del mayor número de dosímetros posible, que se muestra en la figura C.

Descripción:

El dispositivo consta de dos cilindros de madera de 26.5 cm de diámetro y 7.5 cm de altura unidos por un travesaño de 10 cm de ancho, 1 cm de angosto y 140 cm de largo, formando una *haltera*. Uno de los cilindros tiene un orificio central que atraviesa al cilindro y 14 orificios radiales con centro en el primer orificio y que no atraviesan al cilindro, este cilindro se denominó *cilindro principal*. El segundo cilindro sólo tiene un orificio y se denominó *cilindro secundario*.

Las piezas están empotradas sin usar clavos ni material metálico alguno.

La *haltera* se coloca sobre un banco de madera a una altura de 1.30 cm sobre el nivel del suelo para cumplir con la norma mencionada. El banco de madera tampoco tiene elementos metálicos.

La selección del material (madera), se realizó en base a su bajo coeficiente de atenuación para la energía de 661 keV, propia de la fuente de cesio-137 que decae a Ba-137, la cual tiene una emisión monocromática (ver figura 1.1).

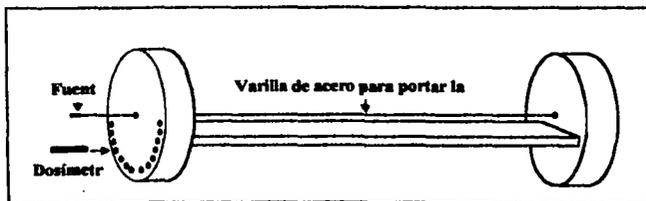


Figura C

Dispositivo de calibrado

Procedimiento de calibración:

Para calibrar dosímetros de lectura directa (o de pluma), se sigue el procedimiento que se da a continuación:

1. Se coloca la fuente cerrada sobre un banco de madera a una distancia de 1 m, ajustando la altura (que sobrepase un metro), de modo que la varilla pueda penetrar en el orificio del blindaje de la fuente. Cuando la varilla esté posicionada en los orificios de los dos cilindros de la *haltera*.
2. Se colocan los dosímetros a cero con el cargador especial y se colocan en los orificios del cilindro principal.
3. Se calcula la distancia que debe sobresalir el extremo del mango de la varilla para que la fuente quede perpendicular a los dosímetros y lo más cerca posible al centro efectivo de éstos.
4. Se coloca el cronómetro a cero.

5. Se abre el blindaje de la fuente y se enrosca la varilla en la fuente.
6. Se saca la varilla a la distancia calculada y se acciona el cronómetro.
7. Después de 20 minutos se mete la varilla con la fuente al blindaje y se retiran los dosímetros.
8. Se anota la primera lectura de los dosímetros, y sin regresarlos a cero se repiten los pasos 6 y 7.
9. Se realiza la lectura de los dosímetros y se anota.
10. Se repiten los pasos 6 hasta el 9, iniciando con el cronómetro a cero, hasta completar tres lecturas de 20 minutos y tres de 40 minutos.
11. Después de tres ciclos se obtienen seis lecturas una al equivalente a un tercio de la escala total del detector y otra a dos tercios. Con estas lecturas se realizan los cálculos para obtener la calibración
12. Se llena el certificado de calibración que se muestra en la siguiente página.

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

folio: 0000

Empresa:

Domicilio:

Teléfono:

Encargado de Protección Radiológica: M. en C. Francisco Pablo Ramírez García

Equipo:

--

Marca:

--

Modelo:

--

Serie:

--

Escala:

Factor de calibración

Incertidumbre
asociada

Primera:

--

--

--

Segunda:

--

--

--

Tercera:

--

--

--

Datos de la fuente radiactiva utilizada:

Isótopo:

Cs-137

Actividad:

3.56 MBq ± 4%

Fecha de calibración:

1 marzo de 1994

Número de serie:

DV 660

Forma física:

Sólida

Recomendaciones:

Prestador de servicios:

Responsable de la calibración:

M. en C. Francisco Pablo Ramírez García

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

folio: 0001

Empresa: Instituto Mexicano del Petróleo

Domicilio: Eje Central Lázaro Cárdenas 152, colonia Santa María Astahuacán C.P.07730
México, Distrito Federal.

Teléfono: 30 03 60 00

Encargado de Protección Radiológica: M. en C. Francisco Pablo Ramírez García

Equipo:

Dosímetro de pluma

Marca:	Modelo:	Serie:
Dosímetro		7050146
Escala:	Factor de calibración	Incertidumbre asociada
Primera: 0-200 mR	0.964	11.39
Segunda: Xx	Xx	xx
Tercera: Xx	Xx	xx

Datos de la fuente radioactiva utilizada:

Isótopo:	Cs-137
Actividad:	3.56 MBq ± 4%
Fecha de calibración:	1 marzo de 1994
Número de serie:	DV 660
Forma física:	Sólida

Observaciones: Se mantuvo cargado el dosímetro durante más de 72 horas, sin observar desviación apreciable de la lectura

Recomendaciones: ninguna.

Prestador de servicios:

Responsable de la calibración:

M. en C. Francisco Pablo Ramírez García

Jorge Olguín García

Bibliografía:

1. **Knoll, G. F. Radiation. Detection and Measurement, Wiley, New York, 1985.**
2. **Kaplan, Irving. Nuclear Physics. 2a. edition. Addison & Wesley Publication Co. Mass. 1964**
3. **Attix, Frank H. Introduction to Radiological Physics & radiation dosimetry. A-Wiley-Interscience Publication. N.Y. 1986**
4. **[4] NCRP report No. 82 "S. I. Units in Radiation Protection & Measurements" Issued August 13, 1985.**
5. **[5] Diario Oficial de la Federación 6 de febrero de 1996, Norma Oficial Mexicana NOM-001-NUCL-1994**
6. **Ramírez García, Francisco Pablo y Cortés Islas, Ma. Eugenia. Notas del curso de seguridad radiológica para POE STI-IMP, julio de 2000.**
7. **Ramírez García, Francisco Pablo. Cortés Islas, Ma. Eugenia y Velasco Ayala, Heana. Manual de seguridad radiológica. IMP México 1992.**
8. **I.V. Savéliev. Curso de Física General (Tom III). Mir. 1a. edición. 1984, Moscú.**
9. **Notas de curso de maestría en seguridad radiológica, 1985, Buenos Aires.**

Obras consultadas:

10. **Acosta Virgilio, Cowan Clyde L. y Graham B. J. Curso de Física moderna.. México. 1973**
11. **Henri de Choudens, Gilbert Troesch. Radioprotection dans les installations nucleaires. Edit. Lavoisier TCC & DOC. 1997. [dosimetro de pluma]**
12. **Porh, Rith, Scholz & Zetsche. Particles & Nuclei. An introduction to the physical concepts, Springer, 1999 2' edition. (diquarks).**
13. **The Encyclopedia of Physics edited by Robert M. Beascon. Reinold Publishing Corporation, N.Y. 1966 pag. 466. (gráfica del comportamiento de las cámaras de niebla -también Kaplan).**
14. **R. S. Gilmore Single particle detection and measurement. Ed. Taylor & Figus, London, Washington DC, 1992**

15. **Eyvind H. Wichman.** Física cuántica, Berkeley Physics Course volumen IV. España 1992. Edit Reverté.
16. **Douglas C. Montgomery.** Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons. N Y 1976. (Diseño de latino cuadrado).
17. **Kreyszig, Erwin.** Introducción a la estadística matemática, principios y métodos. Limusa Noriega Editores 1992, México. (incertidumbres y tablas).