



# **Estandarización del irradiador de Co -60 de la UPTC para radiografía industrial en la técnica pared sencilla y doble pared.**

Trabajo para optar al grado de:

**Físico**

por:

**Héctor Isidro Galindo Mozo**

Director:

**Dr. S. Agustín Martínez Ovalle**

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Física

Tunja (Boyaca), Colombia

2014

*La vida no es fácil, para ninguno de nosotros pero... ¡Que importa! Hay que perseverar y, sobre todo, tener confianza en uno mismo. Hay que sentirse dotado para realizar alguna cosa y que esa cosa hay que alcanzarla, cueste lo que cueste.*

*Marie Curie*

# Dedicatoria

Este trabajo está dedicado en primer lugar y el más importante a Dios quien desde el momento de mi nacimiento ha guiado mi vida colocando en mi camino oportunidades y personas de las cuales he podido aprender lo suficiente para ser un hombre de valores y retos, ya que él me brinda las herramientas para superarlos día a día.

A mi madre Flor ya que con su cariño, amor y comprensión me enseñó que las cosas fáciles no duran ni se valoran tanto como las que cuestan sacrificio y trabajo.

A mi esposa Sandra a quien adoro por su sacrificio el cual me permitió que yo lograra estudiar y obtener un título profesional además por su paciencia en tantos días de ausencia y descuido en mi hogar.

A mi hijo Alejandro ya que en la etapa final de mi carrera se convirtió en el motor que me levanto cuando sentí desfallecer en las extenuantes jornadas académicas en espacial en los cortes de cada cincuenta.

Un inmenso agradecimiento a todos ellos por su colaboración.

# Agradecimientos

Este trabajo representa en sí mismo, la culminación de un ciclo más en mi vida lleno de derrotas que trajeron a mi vida fortaleza y crecimiento personal, así como un sin número de satisfacciones cada vez que terminaba un semestre, pasaba un parcial o simplemente luego de varias noches sin descanso resolvía algún ejercicio de los que se planteaban en clase y a su vez el comienzo de nuevos ciclos guiados por los proyectos que en mi mente se resguardan esperando ser puestos en marcha. En primer lugar debo agradecerle a Dios el cual me ha puesto en el camino ideas y personas que me colaboraron y aconsejaron cuando la carga se hizo tan pesada que no creí poder lidiar con ella, gracias inmensamente. A mi esposa y mis hijos que soportaron semanas y meses sin poder dedicarles el tiempo que se merecían ya que si no estaba estudiando tenía que trabajar. A mi mamita por hacer de mi una persona luchadora decente, honorable, responsable por dejar de lado tu propia felicidad para que a nosotros tus hijos no nos faltase nada, por colaborarme cuidando a mi pequeño bebe así yo pude estudiar sin pensar en como estaba. En general a toda mi familia que colocaron su grano de arena para que yo alcanzase llegar a la meta en especial a Jaime y Yasmith, la cual se convirtió en un motor propulsor en las derrotas. Agradezco a mi director Ph.D Segundo Agustín Martínez Ovalle por su colaboración apoyo y sugerencias para poder hacer las cosas bien, por enseñarme a escribir ya que cada vez que me realizaba correcciones pude darme cuenta de lo mucho que me faltaba en mi redacción. A mi grupo de investigación por permitirme vivir y disfrutar del conocimiento desconocido hasta el momento en especial a tres de sus integrantes Jairo, Oscar y Sebastián los cuales le aportaron a mi trabajo notables mejoras. Por ultimo a todos aquellos que de una u otra forma me aportaron cosas para terminar mi trabajo en verdad Gracias...

# Índice General

<b>Dedicatoria</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Introducción</b>	<b>XI</b>
<b>1. Radiación ionizante</b>	<b>1</b>
1.1. Radiación ionizante . . . . .	1
1.2. Radioisótopos . . . . .	2
1.2.1. Número atómico (Z) y el número másico (A) . . . . .	3
1.2.2. Isótopos . . . . .	3
1.2.3. Isótopos naturales . . . . .	4
1.2.4. Isótopos artificiales . . . . .	4
1.2.5. Concepto radioisótopo . . . . .	4
1.3. Tipos de radiación ionizante . . . . .	5
1.3.1. Partículas alfa . . . . .	5
1.3.2. Partículas beta . . . . .	6
1.3.3. Radiación gamma . . . . .	7
<b>2. Radiografía industrial</b>	<b>10</b>
2.1. Gammagrafía industrial . . . . .	10
2.2. Decaimiento radioactivo . . . . .	10
2.3. Fotones gamma . . . . .	11
2.4. Interacción de la radiación con la materia . . . . .	11
2.4.1. Efecto fotoeléctrico . . . . .	12

2.4.2.	Efecto Compton . . . . .	13
2.5.	Isótopos más utilizados en gammagrafía industrial . . . . .	14
2.5.1.	Iridio-192 ( $^{192}\text{Ir}$ ) . . . . .	15
2.5.2.	Cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) . . . . .	20
2.5.3.	Cobalto-60 $^{60}\text{Co}$ . . . . .	22
<b>3.</b>	<b>Coefficientes de atenuación</b>	<b>26</b>
3.1.	Atenuación exponencial modelo simple . . . . .	28
3.1.1.	Atenuación exponencial HVL y TVL . . . . .	30
3.1.2.	Atenuación exponencial modelo compuesto . . . . .	31
3.1.3.	Atenuación exponencial de un haz ancho . . . . .	32
3.1.4.	Coefficiente de absorción de energía . . . . .	33
<b>4.</b>	<b>Técnicas de radiografía industrial</b>	<b>36</b>
4.1.	Técnica de pared sencilla . . . . .	36
4.1.1.	Procedimiento 1 y 2 . . . . .	37
4.1.2.	Procedimiento 3 . . . . .	43
4.2.	Técnica de doble pared . . . . .	44
4.3.	Propiedades de la Película radiográfica . . . . .	45
4.3.1.	Variables que inciden en la calidad de una radiografía . . . . .	46
4.3.2.	Radiografía de uniones soldadas. . . . .	47
4.4.	Tipos de defectologías en soldaduras . . . . .	48
4.4.1.	Grietas . . . . .	48
4.4.2.	Porosidades . . . . .	48
4.4.3.	Inclusiones de escoria. . . . .	48
4.4.4.	Falta de penetración o penetración incompleta de la junta. . . . .	49
<b>5.</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>50</b>
5.1.	Procedimiento 1 . . . . .	50
5.2.	Procedimiento 2 . . . . .	52
5.3.	Procedimiento 3 . . . . .	54
5.3.1.	Patrón 2.0 cm de espesor . . . . .	58

---

5.3.2. Patrón 1.5 cm de espesor . . . . .	61
5.4. Técnica de doble pared . . . . .	64
<b>6. Conclusiones</b>	<b>71</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>72</b>

# Índice de Figuras

1-1. Representación esquemática de la forma como el ( $^{99}\text{Mo}$ ) decae a ( $^{99}\text{Tc}$ ) mediante emisiones $\beta^-$ ; Robert <i>et al.</i> , (2010). . . . .	8
2-1. Esquema del efecto fotoeléctrico. . . . .	12
2-2. Esquema del efecto Compton. . . . .	13
2-3. Esquema de decaimiento por captura electrón del $^{192}\text{Ir}$ . . . . .	18
2-4. Esquema de decaimiento del $^{192}\text{Ir}$ , mediante decaimientos beta negativos. . .	19
2-5. Esquema de decaimiento del $^{137}\text{Cs}$ , mediante decaimientos beta menos. . . .	21
2-6. Esquema de decaimiento del $^{60}\text{Co}$ . . . . .	25
3-1. Esquema de un detector esférico. Evan R.D. . . . .	34
3-2. Forma de mantener el equilibrio entre los fotones disparados y los fotones que cambia su trayectoria hacia el detector. Evan R.D. . . . .	35
4-1. Montaje prueba con fuente de $^{60}\text{Co}$ para pared sencilla. . . . .	37
4-2. Geometría de la fuente. . . . .	38
4-3. Óptica mediante la cual se presenta la penumbra. . . . .	39
4-4. Curva característica para el cálculo del factor A, Tarres <i>et al.</i> , (1984) . . . .	41
4-5. Técnica de doble pared. . . . .	44
5-1. Panel izquierdo Radiografía espesor de 2.5 cm. Panel derecho placa radiográfica espesor de 2.0 cm, distancia por código ASME sección V. . . . .	52
5-2. Placa radiográfica patrón de espesor 1.5 cm distancia por código de 15.33 cm. .	52
5-3. Panel izquierdo placa radiográfica espesor 2.5 cm. Panel derecho Placa radiográfica espesor 2.0 cm. . . . .	53
5-4. Placa radiográfica espesor 1.5 cm. . . . .	54



---

5-5. Panel izquierdo 25.4 cm, Panel derecho 10 cm, distancia fuente película . . .	55
5-6. Panel izquierdo 88.9 cm Panel derecho 101.6 cm, distancia fuente película. .	55
5-7. Curva experimental característica para un espesor de 2.5 cm. . . . .	56
5-8. Linealización de la curva característica experimental para el patrón de 2.5 cm de espesor con $^{60}\text{Co}$ . . . . .	57
5-9. Placa espesor 2.0 c distancia de irradiación 10 cm. . . . .	59
5-10.Placa espesor 2.0 cm distancia de irradiación 88.9 cm. . . . .	59
5-11.Curva linealizada espesor 2.0 cm datos experimentales. . . . .	60
5-12.Panel izquierdo placa prueba espesor 2.0 cm distancia de irradiación 23.45 cm. Panel derecho placa prueba espesor 2.0 cm distancia de irradiación 76.2 cm. . . . .	61
5-13.Linealización de la curva experimental espesor 1.5 cm. . . . .	62
5-14.Panel izquierdo distancia de irradiación 10 cm. Panel derecho distancia de irradiación 76.2, patrón 1.5 cm. . . . .	63
5-15.Distance e irradiación 127 cm, espesor 1.5 cm. . . . .	63
5-16.Panel izquierdo y Panel derecho Patrón 1.5 cm placas prueba. . . . .	64
5-17.PDVS tubo 1.1 cm, un solo espesor. . . . .	65
5-18.PDVS tubo 1.1 cm, dos espesores (2.2 cm). . . . .	65
5-19.PDVS tubo 2.2 cm, DFP 127 cm. . . . .	67
5-20.PDVS tubo 2.2 cm DFP 101.6 cm . . . . .	67
5-21.PDVS tubo 2.2 cm DFP 76.2 cm. . . . .	67
5-22.PDVS tubo 2.2 cm DFP 50.8 cm. . . . .	68
5-23.PDVS tubo 2.2 cm DFP 25.4 cm. . . . .	68
5-24.Curva experimental tubo 2.2 cm. . . . .	69
5-25.Placa prueba tubo 2.2 cm DFP 21.58 cm. . . . .	69
5-26.Placa prueba tubo 2.2 cm DFP 36.4 cm. . . . .	70

# Índice de Tablas

2-1. Transiciones beta del $^{192}\text{Ir}$ . . . . .	16
2-2. Transiciones por captura electrónica. . . . .	16
2-3. Transiciones gamma. . . . .	17
2-4. Transiciones beta del $^{137}\text{Cs}$ . . . . .	20
2-5. Transiciones gamma. . . . .	21
2-6. Transiciones $\beta^-$ del $^{60}\text{Co}$ . . . . .	22
2-7. Transiciones gamma del $^{60}\text{Co}$ . . . . .	23
2-8. Fotones X producidos por el $^{60}\text{Co}$ . . . . .	23
2-9. Electrones Auger producidos por el $^{60}\text{Co}$ . . . . .	24
4-1. Factor de absorción para el $^{60}\text{Co}$ en Fe. . . . .	41
4-2. Factor de absorción de los diferentes patrones utilizados. . . . .	42
4-3. Características de las Películas . . . . .	46
5-1. Distancia y tiempos de exposición utilizando exclusivamente el código ASME sección V. . . . .	51
5-2. Distancia y tiempos de exposición utilizando ocho veces el espesor. . . . .	53
5-3. Distancias y tiempos de exposición experimentales para un espesor de 2.5 cm. . . . .	54
5-4. Distancias y tiempo de exposición para espesor de 2.0 cm. . . . .	58
5-5. Distancia y tiempos de exposición espesor 1.5 cm. . . . .	62
5-6. Datos Experimentales Tubo 2.2 cm de Espesor. . . . .	66

# Introducción

La gammagrafía industrial es una técnica de ensayo no destructivo (END) usada para examinar piezas sólidas de cualquier tipo de material. Los isótopos más utilizados en gammagrafía industrial son el  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ . De éstos radioisótopos, el que emite fotones de más alta energía es el  $^{60}\text{Co}$  (1.17 y 1.33 MeV), por esta razón, es utilizado en la inspección de materiales con espesores de acero que van desde los 20 a 300 mm usando tiempos de exposición cortos, variable de gran relevancia en protección radiológica y seguridad nuclear, Bavendiek *et al.*, (2006); Ewert *et al.*, (2013).

La gammagrafía es una técnica muy eficaz económica y versátil de utilizar debido a las grandes ventajas que ofrece como ensayo no destructivo, en especial utilizando como radioisótopo el  $^{60}\text{Co}$  debido al poder de penetración que alcanzan los fotones emitidos. ASTM A36M-04; ASTM A36M-04. Sin embargo, además de la distancia de irradiación independientemente del tipo de irradiador utilizado, la calidad en la imagen de una placa radiográfica depende además de otros factores: la falta de nitidez, contraste y ruido, que se cuantifican a través de medidas de impacto sobre la placa radiográfica. Estas variables fueron simuladas Edalati *et al.*, (2007), mediante el código de simulación Monte Carlo, se determina de una manera probabilística y usando indicadores tipo alambre la calidad de la imagen.

Existen diferentes laboratorios en todo el mundo dedicados a prestar el servicio de gammagrafía industrial. Aunque aparentemente están estandarizadas las ecuaciones analíticas para el cálculo de la distancia y el tiempo de exposición son adoptadas por la norma, ASTM E142-92, y ASTM A36/A36M-04. Se encuentra que estas relaciones matemáticas varían dependiendo de diversos factores como (temperatura, material, espesor, penumbra, etc.), estas variables influyen drásticamente en el resultado y calidad de la película radiográfica, convirtiéndose la técnica en un legado de la experiencia del técnico profesional, sin que exista una estandarización genérica para cada irradiador, Zahran *et al.*, (2013); Kasban *et al.*, (2011).

En la práctica industrial es imprescindible que exista un control de calidad sobre la fabricación de diferentes tipos de piezas, particularmente cuando son fabricadas en serie y se pueden encontrar defectos inherentes a las mismas que redundan en la vida útil de las mismas según su uso. Es aquí, donde la radiografía industrial toma importancia, permitiendo asegurar la calidad y la integridad de diversas estructuras, soldaduras y equipos, con una diversidad que incluye: soldaduras automáticas importantes para la seguridad en los vehículos, partes vitales de los sistemas de frenos de los mismos, soldaduras de recipientes a presión, calderas o soldaduras en tuberías en las cuales serán aplicadas altas presiones, en el transporte de líquidos o gases, Wang *et al.*, (2002); Zahran *et al.*, (2013); Bavendiek *et al.*, (2007).

Una placa radiográfica se puede tomar básicamente mediante tres tipos de radiación ionizante: en primer lugar la tomada con rayos X, en segundo lugar con una fuente gamma, en nuestro caso particular el  $^{60}\text{Co}$ . Por último, están las fuentes de neutrones producidos generalmente en reactores de investigación, todas capaces de producir placas radiográficas con características muy semejantes pero con aplicaciones particulares para cada uno. Es aquí, donde cobra importancia poder caracterizar cada uno de los métodos de radiografía industrial.

Se han publicado investigaciones donde se realizaron estudios en los cuales se muestra la efectividad, ventajas y desventajas de utilizar uno u otro método dependiendo del tipo de material su espesor y hasta el lugar donde se tomara la placa. Panaitescu (1971); Barnea & Dick (1998). En un estudio reciente, Melgarejo *et al.*: (2014) se realizó un comparativo entre las técnicas de radiografía industrial haciendo uso de rayos X y una fuente gamma de  $^{60}\text{Co}$ . En el estudio se tomaron diferentes patrones estandarizados de acero. Los autores tomaron ocho patrones de los cuales 4 tenían un espesor de 12 mm y los restantes de 20 mm, fueron irradiados con los dos tipos de fuentes. Cada patrón fue irradiado con la distancia que se estandariza en las normas internacionales para cada técnica, es decir, se usó una distancia fija de irradiación, llegando a la conclusión que para espesores inferiores a 20 mm la gammagrafía con  $^{60}\text{Co}$ , no es una técnica viable por los cortos tiempos de exposición lo que condujo a obtener una mala calidad de imagen, este aspecto es considerado de importancia en el presente trabajo dado que una de los principales objetivos es obtener imágenes de calidad variando distancias y tiempos de exposición.

El grado de oscurecimiento (densidad óptica) en cada punto de una imagen radiográfica se da como una función del número total de fotones que llegan a ese punto, los cuales se deben a la suma de dos contribuciones distintas: el número de fotones que no interactúan con la materia es decir que atraviesan el objeto sin ningún tipo de interacción y los fotones dispersados que atraviesan el objeto después de la interacción con los átomos que lo componen, Ewert *et al.*, (2012).

Los fotones no colisionados proporcionan la imagen y los fotones dispersados dan como resultado un aumento la distorsión en la imagen, falta de nitidez y la disminución en el contraste de la imagen, sin tener en cuenta que, además de los parámetros relacionados se tendrá que incluir el proceso de revelado, el cual resulta determinante en la calidad de la imagen debido a las tres etapas del proceso; la primera etapa que se conoce como revelado tal vez la más importante debido a la precisión en el tiempo, pues pequeñas variaciones conducen a una mala imagen. La siguiente etapa la de fijado es un poco más manejable ya que se puede manipular debido a que se puede ir viendo en un negatoscopio la evolución del fijado. La etapa de enjuague fácil ya que se realiza con agua, el secreto es poder quitar la mayor parte del exceso de fijador para que no afecte el fijado.

Este tipo de ensayo no destructivo ha tomado un amplio campo de aplicación, por esa razón, en este trabajo se pretende irradiar piezas desde diferentes distancias y a diferentes tiempos, para intentar encontrar relaciones matemáticas que permitan establecer con buena precisión los cálculos de distancia tiempo para cualquier tipo de pieza. Melgarejo *et al.*, (2014).



# 1 Radiación ionizante

Podemos entender como propagación de la radiación el proceso mediante el cual ocurre una transmisión de ondas o partículas a través de un medio material.

## 1.1. Radiación ionizante

La radiación ionizante consiste en partículas, que causan la separación de electrones en átomos o moléculas, algunos tipos de radiación de energía relativamente baja, como la luz ultravioleta, sólo puede originar ionización en determinadas circunstancias. Para distinguir entre la radiación que causa ionización y la que no, se establece un límite de energía inferior arbitrario, en torno a 10 keV.

La radiación ionizante directa consta de los rayos X y rayos gamma, partículas cargadas, como los electrones, los positrones, los protones, las partículas alfa, las partículas beta los mesones cargados, los muones y los iones pesados (átomos ionizados). Este tipo de radiación ionizante interactúa con la materia mediante la fuerza de Coulomb, que les hace repeler o atraer electrones de átomos y moléculas en función de sus cargas. La radiación se puede encontrar en cualquier lugar del espacio, la fuente puede variar ya sea que llegue desde el espacio exterior gracias a los rayos cósmicos, los cuales al interactuar con la atmósfera crean una cascada de reacciones, produciendo un gran número de partículas cargadas secundarias como: alfas, betas, neutrones, muones, neutrinos, electrones libres y fotones de varias energías. También está presente en la atmósfera y el aire en forma de emisiones del radón radiactivo y sus isótopos producidos luego de interactuar con algún átomo del mismo. Los isótopos radiactivos que se originan de forma natural pueden entrar y depositarse en todos los seres vivos. Esto es inevitable. De hecho, todas las especies de nuestro planeta han evolucionado en presencia o ayudados por la radiación ionizante. Es claro que los seres humanos expuestos a dosis pe-

queñas de radiación pueden no presentar ningún efecto biológico determinista, sin embargo, no hay duda de que la radiación ionizante, cuando se administra en cantidades de altas dosis, puede causar daños. El tipo y el grado de estos efectos son bien conocidos y catastróficos, llegando a ser letales en cortos tiempos, Robert *et al.*, (2010). Es cierto que la radiación ionizante puede ser perjudicial, pero también tiene aplicaciones benéficas. Por ejemplo: El uranio radiactivo genera electricidad en centrales nucleares en muchos países; En medicina, los rayos X permiten obtener imágenes para el diagnóstico de lesiones y enfermedades internas. Los profesionales especializados en medicina nuclear utilizan material radiactivo como trazadores para formar imágenes detalladas y estudiar el cuerpo en su estructura interna, los radiofármacos terapéuticos son utilizados para tratar trastornos como el hipertiroidismo. Rayos gamma, haces de piones, haces de electrones, neutrones y otros tipos de radiación son usados para tratar controlar y destruir tumores cancerígenos. En la industria se emplea material radiactivo en operaciones de registro de pozos petrolíferos y para medir la densidad de la humedad en los suelos. Los radiólogos industriales se valen de rayos X o gamma en el control de calidad para observar las estructuras internas de materiales fabricados en serie. Las señales de las salidas de edificios y aviones contienen tritio radiactivo para que brillen en la oscuridad en caso de fallo de la energía eléctrica. Muchos detectores de humos en viviendas y edificios comerciales contienen americio radiactivo, son muchas las aplicaciones en las cuales se utiliza la radiación ionizante, se puede deducir que son más los beneficios que los daños de la radiación ionizante y que las consecuencias se disminuyen al máximo gracias a los protocolos de manejo, manipulación y transporte de fuentes radioactivas, Cherry., (2010).

## 1.2. Radioisótopos

Un elemento atómico se define por dos números enteros: el número de protones que hay en el núcleo (llamado número atómico,  $Z$ ) y el total de protones más neutrones (llamado número másico,  $A$ ). Un isótopo se define como átomos de un elemento con el mismo número atómico pero con distinta masa atómica, es decir, con el mismo número de protones, con las mismas propiedades químicas pero distinto número de neutrones, lo cual provoca que haya diferencia en las propiedades físicas. Los isótopos pueden ser estables e inestables o técnicamente llamados radioisótopos, los núcleos de éstos últimos poseen la propiedad de



emitir energía en forma de radiación ionizante a medida que buscan una configuración más estable.

### 1.2.1. Número atómico (Z) y el número másico (A)

El número atómico define a que elemento químico pertenece el átomo, independientemente del número de neutrones que posea, para dar un ejemplo todos los átomos cuyos núcleos tienen un protón son átomos de hidrógeno, todos los que tienen ocho protones son átomos de oxígeno, etc. El número másico es considerado el número entero más próximo a la masa (expresada en unidades de masa atómica) del átomo que se tiene, es decir, todos los átomos con  $A = 2$  tienen una masa de, aproximadamente, dos unidades másicas; los que tienen  $A = 235$ , tienen una masa de unas 235 unidades de masa atómica, Robert *et al.*, (2010). La notación que se utiliza comúnmente para identificar fácilmente en una tabla periódica o de isótopos es como sigue:



(Siendo X el átomo del elemento).

### 1.2.2. Isótopos

Desglosando la palabra y buscando sus orígenes la palabra isótopo proviene del griego (esos = mismo y topos = lugar) denominando así a los átomos de un mismo elemento, cuyos núcleos tienen una cantidad diferente de neutrones, y por lo tanto, difieren en masa atómica, es decir, tienen igual número atómico (Z) pero distinto número másico (A). Por ejemplo, en la naturaleza el carbono presenta tres isótopos con números de masa 12, 13 y 14:  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{C}$  y  ${}^{14}\text{C}$ . La cantidad global de carbono en cada uno son respectivamente: 98.89 %, 1.11 % y trazas. La mayoría de los elementos químicos poseen más de un isótopo, como por ejemplo el estaño que es el elemento con más isótopos estables y solamente 21 elementos (como por ejemplo el berilio y sodio) poseen un solo isótopo natural.

### 1.2.3. Isótopos naturales

Se encuentran de manera natural. Ejemplos: el hidrógeno tiene tres isótopos naturales: el propio hidrógeno que no tiene neutrones, el deuterio con un neutrón, y el tritio que contiene dos neutrones. Otro elemento que contiene isótopos muy importantes es el carbono, está el carbono 12, que es la base referencial del peso atómico de cualquier elemento, el carbono 13 que es el único carbono con propiedades magnéticas y el carbono 14 radioactivo, muy importante debido que su tiempo de vida media es de 5.730 años y es muy usado en la arqueología para determinar la edad de los fósiles orgánicos.

### 1.2.4. Isótopos artificiales

Se fabrican en reactores nucleares, de investigación o industriales, los cuales son bombardeados por neutrones. Los isótopos se subdividen en isótopos estables (existen menos de 300) y no estables o isótopos radiactivos (existen alrededor de 1.200). El concepto de estabilidad no es exacto, ya que existen isótopos casi estables, es decir, durante un tiempo son inestables y decaen en elementos estables o se transforman en otros isótopos estables obedeciendo a la ley de mínima energía, Daniel., (2010).

### 1.2.5. Concepto radioisótopo

Son isótopos radiactivos debido a que su núcleo es inestable (por el balance entre neutrones y protones) y emiten energía y partículas secundarias cuando decae a un elemento estable. Cada radioisótopo tiene un período de desintegración o semivida propio. La energía puede ser liberada principalmente en forma de: partículas alfa (núcleos de helio doblemente ionizados), beta (electrones o positrones) y rayos  $\gamma$  (fotones).

Varios isótopos radiactivos inestables y artificiales tienen usos en medicina. Por ejemplo, un isótopo del tecnecio ( $^{99}\text{Tc}$ ) puede usarse para identificar vasos sanguíneos bloqueados. Varios isótopos radiactivos naturales se usan para determinar cronologías, por ejemplo, en arqueología se usa para poder determinar la edad aproximada de un fósil o cualquier material que haya podido absorber o ingerir átomos de carbono ( $^{14}\text{C}$ ).

### Aplicaciones de los radioisótopos

- Medicina: Diagnóstico y tratamiento de enfermedades, esterilización de productos de uso frecuente en clínicas y en cirugías, etc.
- Industria y tecnología: Comprobación de materiales y soldaduras en la construcción, control de procesos productivos, investigación, control de calidad, etc.
- Agricultura: Control de plagas, conservación de los alimentos, etc.
- Arte: Restauración de objetos artísticos, verificación de objetos artísticos o históricos, etc.
- Arqueología: Fechar eventos geológicos, etc.
- Investigación: Universo, industria, medicina, etc.
- Farmacología: Estudiar el metabolismo de los fármacos antes de autorizar su uso público.

## 1.3. Tipos de radiación ionizante

### 1.3.1. Partículas alfa

Una partícula alfa se define como dos protones y dos neutrones estrechamente ligados. Es idéntica a un núcleo de He cuatro ( ${}^4\text{He}$ ). Luego de haber perdido la mayor parte de su energía cinética, captura dos electrones para poderse convertir en un átomo de He estable. Los radionúclidos emisores de partículas alfa, son en general núcleos relativamente pesados. La mayoría de los isotopos emisores alfa tienen números atómicos iguales o superiores al del plomo ( ${}^{82}\text{Pb}$ ). Cuando un núcleo se desintegra y emite una partícula alfa, su número atómico (el número de protones y su número de neutrones), disminuye en dos, mientras que su número másico se reduce en cuatro. Por ejemplo, la desintegración alfa del  ${}^{238}\text{U}$  a  ${}^{234}\text{Th}$  se representa por:



Donde

$$\alpha = {}^4_2\text{He}_2$$

El superíndice de la izquierda da cuenta del número másico (número de protones más neutrones), el subíndice de la izquierda es el número atómico del isótopo (número de protones) y el subíndice de la derecha es el número de neutrones. Los emisores alfa corrientes emiten partículas alfa con energías cinéticas entre unos 4 y 5.5 MeV. El alcance de estas partículas alfa en el aire no sobrepasa los 5 cm. Para que una partícula alfa penetre la epidermis (capa protectora de la piel), con 0.07 mm de espesor, se necesita una energía de 7.5 Me por esta razón los emisores alfa no representan ningún peligro de radiación externa.

Sin embargo, la peligrosidad de este tipo de radiación aparece cuando es ingerida por el organismo por cualquier medio

### 1.3.2. Partículas beta

Una partícula beta puede ser un electrón o un positrón. (El positrón es la antipartícula del electrón, tiene la misma masa y la mayoría de las propiedades del electrón, salvo su carga, cuya magnitud es exactamente la misma, pero de signo positivo.) Los radionúclidos emisores de partículas beta pueden ser de peso atómico alto o bajo. Los radionúclidos que tienen exceso de protones en comparación con el número de neutrones se desintegra debido a que un protón del núcleo se convierte en neutrón. Cuando esto sucede, el núcleo emite un positrón y una partícula extraordinariamente ligera y que muy rara vez interactúa llamada neutrino. (El neutrino y su antipartícula carecen de interés en protección radiológica.) Cuando ha cedido la mayoría de su energía cinética, el positrón termina por colisionar con un electrón, produciendo aniquilación. La radiación de aniquilación produce siempre dos fotones de 511 keV, que se desplazan en sentidos contrarios (180°). La desintegración con emisión de un positrón se representa por:



En el esquema, el positrón es representado por  $\beta^+$  y el neutrino por  $\nu$ . en este tipo de desintegración el nucleído resultante tiene el mismo número másico pero un protón menos

y en cambio tiene un exceso de un neutrón. En la desintegración, por captura electrónica de alguna manera compite con la pérdida de un positrón. En dicha desintegración, el núcleo absorbe un electrón del orbital más cercano y emite un neutrino. Una desintegración típica por captura electrónica se muestra en el siguiente esquema:



La desintegración por captura electrónica es posible siempre que el núcleo resultante tenga una energía total menor que la del núcleo inicial. Por el contrario, la desintegración beta positiva exige que la energía total del átomo inicial sea mayor que la del átomo resultante en una cantidad de 1.02 MeV (dos veces la energía másica residual del positrón). La desintegración con positrón y por captura electrónica, la desintegración con negatrón ( $\beta^-$ ) ocurre en núcleos que tengan exceso de neutrones en comparación con núcleos estables del mismo número másico. En este caso, el núcleo emite un electrón y un antineutrino. El esquema correspondiente es como sigue:



Donde el electrón se representa por ( $\beta^-$ ) y el antineutrino por  $\nu'$ . En este proceso, el núcleo resultante gana un protón pero pierde un neutrón sin cambiar su número másico.

Las energías beta máximas típicas oscilan desde 18.6 keV para el tritio ( ${}^3\text{H}$ ) a 1.71 MeV para el fósforo-32 ( ${}^{32}\text{P}$ ). El alcance de las partículas beta en el aire es de unos 3,65 m por MeV de energía cinética. Se necesitan partículas beta de 70 keV de energía como mínimo para atravesar la epidermis. Las partículas beta son radiación de baja transferencia lineal de energía, Robert *et al.*, (2010).

### 1.3.3. Radiación gamma

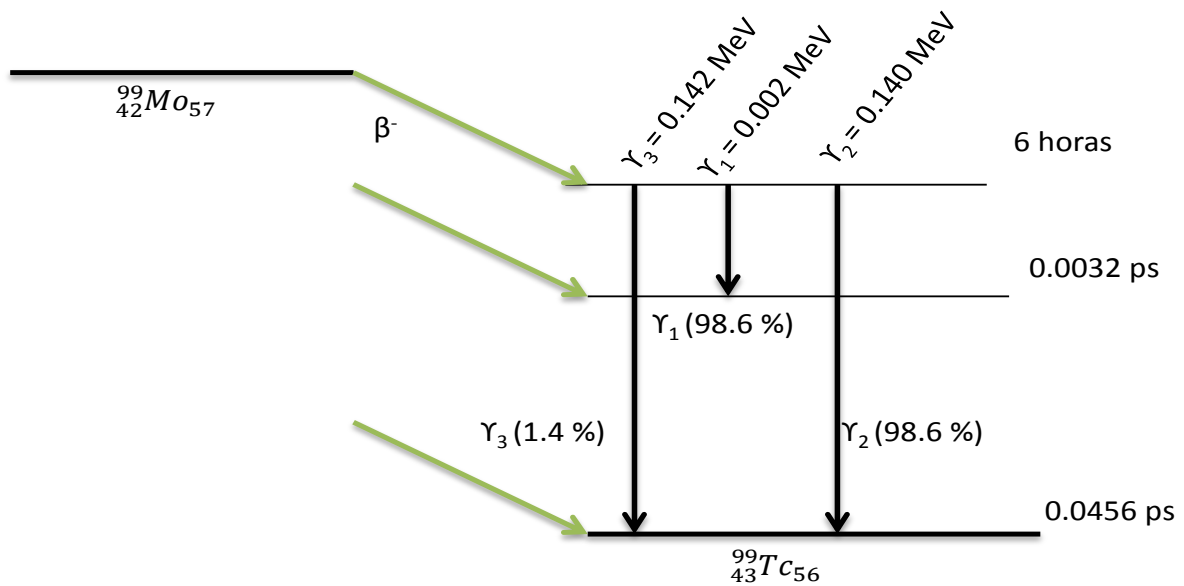
La radiación gamma es radiación electromagnética emitida por un núcleo cuando experimenta una transición de un estado de energía más energético a un estado de menor energía. El número de protones y neutrones del núcleo no varía en estas transiciones. El núcleo luego de haber experimentado una desintegración alfa o beta se encuentra excitado. Es por esto que los rayos gamma se emiten inmediatamente luego de ocurrir una desintegración alfa o

beta.

Estos pueden ser el resultado de la captura de un electrón y de la dispersión inelástica de partículas subatómicas por núcleos. Los rayos gamma más energéticos se han observado en los rayos cósmicos.

Para poder ver de una forma gráfica, se realizó un esquema descriptivo del  $^{99}\text{Mo}$  Figura 1-1, en el se observan los principales fotones que emite junto con sus respectiva probabilidad por cada cien desintegraciones.

**Esquema de desintegración del  $^{99}\text{Mo}$ :**



**Figura 1-1:** Representación esquemática de la forma como el ( $^{99}\text{Mo}$ ) decae a ( $^{99}\text{Tc}$ ) mediante emisiones  $\beta^-$ ; Robert *et al.*, (2010).

Obsérvese que el núcleo de  $^{99}\text{Tc}$  resultante tiene un estado excitado que dura un tiempo excepcionalmente prolongado ( $T_{1/2} = 6 \text{ h}$ ). Un núcleo excitado de este tipo se denomina isómero. La mayoría de los estados nucleares excitados tienen períodos de semidesintegración comprendidos entre algunos picosegundos (ps) y 1 ( $\mu\text{s}$ ).

En este trabajo será estudiado en detalle el radioisótopo de  $^{60}\text{Co}$  usado en radiografía industrial por tener la característica particular de emitir entre otros dos fotones de 1.17 MeV y

---

1.33 MeV respectivamente, capaces de penetrar hasta espesores de 400 mm en acero. Además del acero, los fotones gamma del  $^{60}\text{Co}$  penetran grandes espesores en concreto y en cualquier material. Su poder de penetración dependerá del Z del material.

## 2 Radiografía industrial

### 2.1. Gammagrafía industrial

La gammagrafía industrial es una técnica de ensayo no destructivo (END) mediante el cual se puede inspeccionar una pieza de cualquier material sin importar su composición, debido a que la interacción de la radiación con la materia es inherente a dicha propiedad. La densidad del material define la mayor o menor intensidad del flujo de radiación que lo atraviesa. Realiza una comparación de la densidad de una zona con la densidad de las zonas circunvecinas esta diferencia la podemos visualizar en una placa radiográfica. Si la pieza presenta alguna diferencia de densidades, la tonalidad en la placa será distinta.

Se puede afirmar que las placas radiográficas usadas tanto en la medicina como en la industria, son reveladas por fotones X o gamma, presentan el mismo fenómeno de interacción radiación materia, resultando de interés particular conocer los mecanismos de pérdida de energía que suceden en los materiales.

### 2.2. Decaimiento radioactivo

Dada la masa que contenga una muestra de material radioactivo se pueden verificar dos características importantes, una que la actividad es directamente proporcional a la cantidad másica del material y dos, que la intensidad de radiación emitida por dicho material decrece con el transcurrir del tiempo, cabe mencionar que este proceso es propio de cada nucleído.

La forma como se determina cuantitativamente la intensidad de radiación emitida se conoce como actividad  $A$ , denotada como cantidad de desintegraciones por unidad de tiempo  $t$ , la ecuación matemática que la relaciona:



$$A = -\frac{dN}{dt}, \quad (2-1)$$

$N$  es el número de átomos presentes en la muestra. La actividad es directamente proporcional al número de núcleos por lo que:

$$A = \lambda N,$$

donde  $\lambda$  es la constante de desintegración radioactiva propia de cada nucleídocuyas unidades son  $s^{-1}$ , una ecuación más general de la actividad se denota como:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (2-2)$$

$A_0$  es la actividad inicial de la fuente. Esta ecuación se conoce como ley temporal de la transformación radioactiva, donde la actividad tiene unidades de Curios.

## 2.3. Fotonos gamma

Son ondas electromagnéticas que se emiten espontáneamente desde un nucleído cuando un electrón pasa de un nivel de energía más alto a uno de más baja energía o cuando ocurre aniquilación positrón-electrón. Los fotonos dada su característica particular de no poseer carga se convierten en el tipo de radiación ionizante con un gran poder de penetración, al no ser desviados por campos eléctricos o magnéticos, capaces de viajar con velocidades cercanas a la velocidad de la luz ( $C = 3 \cdot 10^8$  m/s). La emisión de fotonos gamma en su mayoría son precedidas por decaimientos beta más o menos.

## 2.4. Interacción de la radiación con la materia

Los tres mecanismos principales de interacción de fotonos con la materia son: efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. En este trabajo, dada la energía de los fotonos emitidos, la probabilidad de producción de pares es muy baja, por lo que se hará una

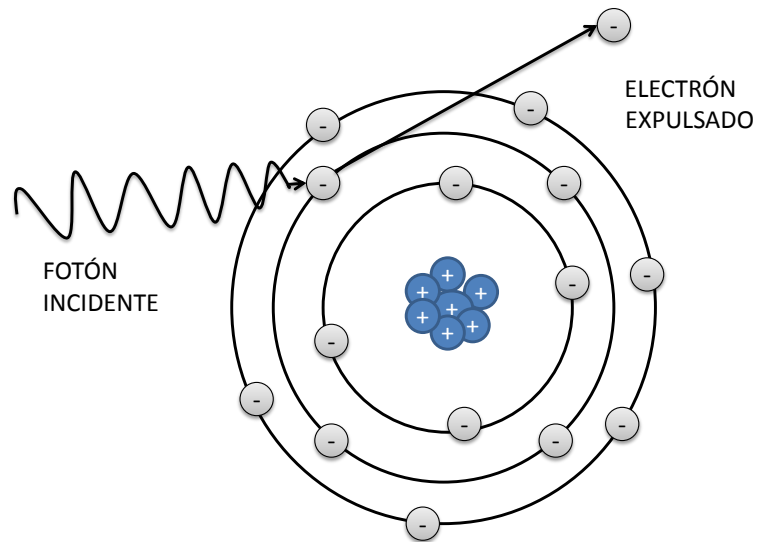
descripción de los dos primeros efectos.

### 2.4.1. Efecto fotoeléctrico

Es considerado como el proceso mediante el cual un fotón impacta un electrón y este a su vez absorbe por completo la energía del fotón y es expulsado del átomo, con la consecuente desaparición del fotón incidente. La expresión que modela este efecto:

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{1}{2}mv^2, \quad (2-3)$$

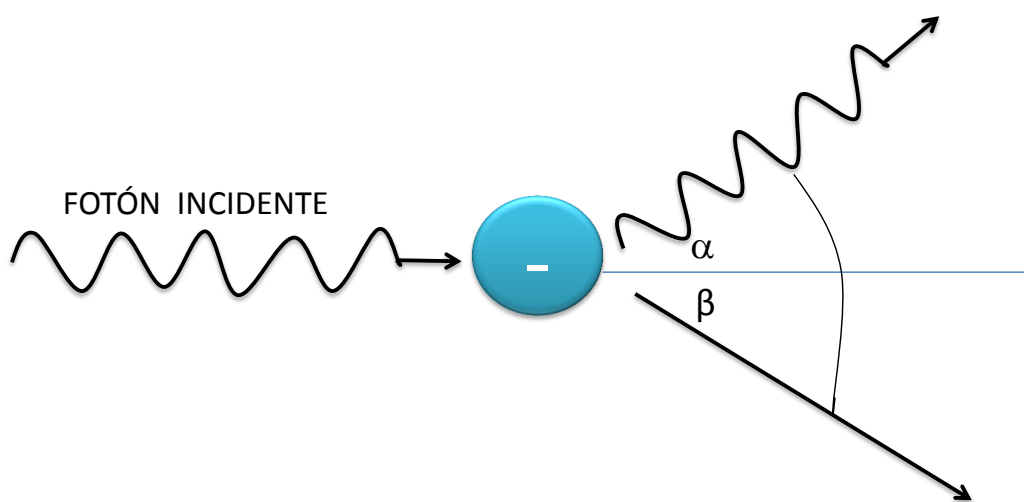
donde  $h\nu$  es la energía del fotón incidente,  $h\nu_0$  la energía necesaria para arrancar el electrón de su orbital y la energía de absorción  $E_a = \frac{1}{2}mv^2$ . De forma gráfica podemos ver en la Figura 2-1 el proceso mediante el cual un fotón interactúa con un electrón depositando el total de su energía cinética, expulsándolo del átomo.



**Figura 2-1:** Esquema del efecto fotoeléctrico.

### 2.4.2. Efecto Compton

En la interacción Compton, un fotón de energía  $E = h\nu$  interactúa con un electrón en reposo de las capas externas del átomo, luego de la colisión el fotón tendrá una energía  $E' = h\nu'$  y su trayectoria forma un ángulo  $\alpha$  con respecto a la horizontal, de la misma forma el electrón tendrá entonces una cantidad de movimiento  $p_e$  formando un ángulo  $\beta$  con la horizontal, Figura 2-2.



**Figura 2-2:** Esquema del efecto Compton.

Aplicando los principios de conservación y considerando la colisión entre el fotón y el electrón como elástica, por conservación del momentum  $P$  podemos afirmar que::

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos\alpha + p_e \sin\beta \quad (2-4)$$

$$\frac{h\nu'}{c} \cdot \sin\alpha = p_e \cdot \sin\beta.$$

por la conservación de energía:

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}. \quad (2-5)$$

donde  $m_e$  es la masa del electrón,  $h$  la constante de Planck. Con el desarrollo de las ecuaciones (2-4) y (2-5) se podrá llegar a la función utilizada por Compton para justificar el corrimiento en la longitud de onda encontrada experimentalmente que es:

$$\lambda - \lambda' = \frac{hc}{m_e c^2} (1 - \cos\alpha), \quad (2-6)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda del fotón incidente y  $\lambda'$  la longitud de onda del fotón dispersado.

Con esta ecuación se puede medir la diferencia entre la longitud de onda de la radiación incidente y la dispersada. Para ver de una forma más gráfica se construyó el esquema que representa el fenómeno en la Figura 2-2 se muestra como un fotón luego de interactuar con algún electrón del átomo puede expulsar este electrón y seguir interactuando con otros electrones.

## 2.5. Isótopos más utilizados en gammagrafía industrial

En teoría son muchos los radioisótopos que se pueden utilizar para gammagrafía industrial pero en la práctica hay cuatro principales ya que por sus características, costos de producción y accesibilidad se convierten en los más utilizados. A continuación se hará una breve descripción de cada uno, estableciendo sus principales características como tiempo de vida media, energía máxima y mínima de interacción, tablas donde están sus formas de desintegración y finalmente su esquema de decaimiento, para el caso del  $^{60}\text{Co}$  se hace una descripción más detallada dado que es el radioisótopo utilizado en el trabajo.

### 2.5.1. Iridio-192 ( $^{192}\text{Ir}$ )

El  $^{192}\text{Ir}$  es un radioisótopo (elemento radiactivo) que durante su proceso de desintegración son emitidos fotones gamma. Se emplea en radiografía industrial (gammagrafía) para detectar fallas en soldaduras de estructuras metálicas de espesores de baja dimensionalidad.

La vida media (tiempo de desintegración) del  $^{192}\text{Ir}$  es de 74 días, es decir que cada 74 días su actividad se reduce a la mitad. La actividad de las fuentes de  $^{192}\text{Ir}$  usadas en la práctica oscilan 50 y 100 Curíes, es decir que deben pasar alrededor de 4.7 años para que una fuente de este tipo deba ser gestionada cuando su actividad es cercana a el 3% por no ser útil para esta practica por su baja actividad .

El  $^{192}\text{Ir}$  decae mediante emisiones beta menos en un 95.13%, a átomos estables de platino ( $^{192}\text{Pt}$ ) y mediante captura electrónica en un 4.87% decae a átomos de Osmio ( $^{192}\text{Os}$ ).

Los datos contenidos en las tablas: 2-1, 2-2 y 2-3 y figuras 2-3 y 2-4 son referenciados y tomados de Browne.,(2008).

Datos nucleares.

$T_{1/2}$  : ( $^{192}\text{Ir}$ ) : 73.827 días.

#### 2.5.1.1. Transiciones $\beta^-$

En la Tabla **2-1** se muestran los decaimientos betas menos a que tiene lugar el isótopo radioactivo de  $^{192}\text{Ir}$ , la energía con la cual se produce el decaimiento en KeV, su probabilidad de ser emitida tomada por cada 100 desintegraciones que acurran en la muestra de la fuente, la naturaleza del estado y la longitud que alcanza la partícula antes de perder la totalidad de su energía tomada en pies.

**Tabla 2-1:** Transiciones beta del  $^{192}\text{Ir}$ .

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones	Natural	lg ft
$\beta_{0,8}^-$	53.5	0.0033	Permitido	9.2
$\beta_{0,7}^-$	75.7	0.0039	1 st prohibido	9.6
$\beta_{0,6}^-$	81.7	0.1026	1 st prohibido	8.3
$\beta_{0,5}^-$	258.7	5.59	Permitido	8.1
$\beta_{0,4}^-$	538.8	41.4	Permitido	8.3
$\beta_{0,3}^-$	675.1	47.9	Permitido	8.5

### 2.5.1.2. Transiciones del $^{192}\text{Ir}$ mediante captura electronica

En la Tabla **2-2**. Son mostrados los decaimientos por captura electronica que presenta el radioisótopo de  $^{192}\text{Ir}$ , denotando la energía con la cual son capturados los electrones en KeV, la probabilidad de que ocurra por cada cien eventos, longitud alcanzada en pies y la probabilidad normalizada que un foton sea emitido desde una capa en particular.

**Tabla 2-2:** Transiciones por captura electrónica.

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones	Natural	lg ft	$P_k$	$P_L$	$P_M^+$
$\epsilon_{0,5}$	136.6	0.095	Permitido	9.5	0.537	0.339	0.124
$\epsilon_{0,4}$	355.8	3.97	Permitido	8.5	0.758	0.182	0.060
$\epsilon_{0,3}$	465.9	0.686	Permitido	9.5	0.777	0.168	0.055

### 2.5.1.3. Transiciones gamma y coeficientes internos de conversión.

Los decaimientos beta del iridio producen gran cantidad de fotones gamma, Figura **2-3** los cuales serán propios del Osmio o del Platino mostrando la energía con la cual es emitido el foton en KeV, la probabilidad por cada cien desintegraciones y la capa y orbital desde el cual son emitidos.

**Tabla 2-3:** Transiciones gamma.

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones	Multipolaridad	$\alpha_K$	$\alpha_L$	$\alpha_M$	$\alpha_T$
$\gamma_{4,3}(Os)$	110.4	0.057	E2+ 45 % M1	2,03	1.22	0.306	0.65
$\gamma_{4,3}(Pt)$	136.3426	0.051	E2+7.5 % M1	0.57	0.747	0.192	1.56
$\gamma_{6,5}(Pt)$	176.98	0.0047	E1 0.0786	0.0137	0.0021	0.0971	
$\gamma_{4,2}(Os)$	201.371	0.657	E2+ 12 % M1	0.228	0.120	0.0301	0.387
$\gamma_{1,0}(Os)$	205.794	4.47	E2	0.157	0.111	0.0281	0.305
$\gamma_{1,1}(Pt)$	214.7						
$\gamma_{6,6}(Pt)$	280.27	0.010	E2+ 15 % M1	0.11	0.039	0.0098	0.0016
$\gamma_{2,1}(Os)$	283.266	0.299	E2+ 6.5 % M1	0.081	0.0318	0.0078	0.123
$\gamma_{2,1}(Pt)$	295.956	31.76	E2+ 1 % M1	0.0654	0.0305	0.0076	0.106
$\gamma_{4,2}(Pt)$	308.455	32.53	E2+ 1.9 % M1	0.0608	0.0262	0.0065	0.096
$\gamma_{2,1}(Pt)$	314.8						
$\gamma_{4,2}(Pt)$	316.506	89.78	E2	0.0537	0.0236	0.0059	0.0846
$\gamma_{5,3}(Os)$	329.17	0.0190	E2+ 17 % M1	0.069	0.0195	0.0047	0.094
$\gamma_{3,1}(Os)$	374.485	0.762	E2	0.0341	0.0113	0.0027	0.049
$\gamma_{1,3}(Pt)$	415.4						
$\gamma_{5,3}(Pt)$	416.468	0.702	E2+ 11 % M1	0.037	0.0099	0.00242	0.050
$\gamma_{5,2}(Os)$	420.52	0.071	E2	0.0258	0.0076	0.0018	0.0358
$\gamma_{3,1}(Pt)$	468.0688	49.22	E2	0.0213	0.00617	0.00151	0.0295
$\gamma_{4,1}(Os)$	484.5751	0.0190	E2+ 2,8 % M1	0.0198	0.00499	0.0012	0.0263
$\gamma_{2,0}(Os)$	489.06	0.449	E2	0.0182	0.00471	0.00114	0.0243
$\gamma_{5,2}(Pt)$	588.5820	4.594	E2	0.019	0.00311	0.00075	0.0170
$\gamma_{6,3}(Pt)$	593.49	0.042	E1+0,5 % M2	0.0055	0.00087	0.00032	0.0067
$\gamma_{7,3}(Pt)$	599.41	0.0039	E1	0.0048	0.00075	0.00028	0.0059
$\gamma_{4,1}(Pt)$	604.4121	8.42	E2+31 % M1	0.0048	0.00075	0.00028	0.0059
$\gamma_{2,0}(Pt)$	612.4601	5.42	E2	0.0119	0.00278	0.00066	0.0155
$\gamma_{1,4}(Pt)$	73	6					
$\gamma_{6,2}(Pt)$	765.8	0.0013	E1+2,5 % M2	0.0043	0.0070	0.00014	0.0052
$\gamma_{5,1}(Pt)$	884.538	0.293	E2	0.0056	0.0010	0.00025	0.00707
$\gamma_{6,1}(Pt)$	1061.48	0.053	E1+0,2 % M2	0.0016	0.00024	0.00005	0.00197
$\gamma_{8,1}(Pt)$	1061.48	0.0012	E2+26 % M1	0.0052	0.00052	0.00020	0.0063
$\gamma_{6,2}(Pt)$	1378.20	0.0012	E3	0.0049	0.00098	0.00023	0.0652

#### 2.5.1.4. Esquema de decaimiento por captura electronica del $^{192}\text{Ir}$

En la Figura 2-3, se muestra las capturas electrónicas presenta el radioisótopo de  $^{192}\text{Ir}$ , al elemento que decae luego de estabilizarse ( $^{192}\text{Os}$ ), el tiempo que tarda la captura, la energía con la cual se captura el electrón.

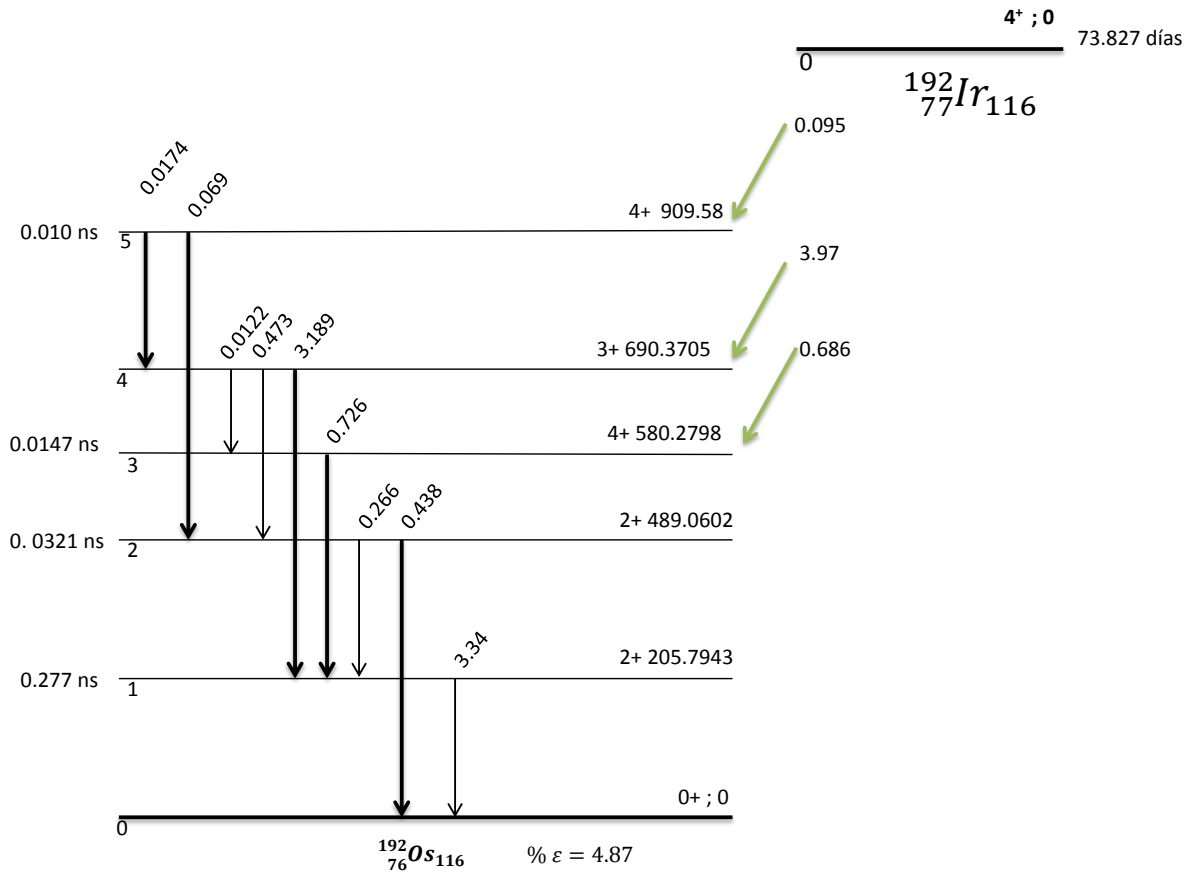


Figura 2-3: Esquema de decaimiento por captura electrón del  $^{192}\text{Ir}$ .

### 2.5.1.5. Esquema de decaimiento del $^{192}\text{Ir}$

En la Figura 2-4, se puede identificar los decaimientos beta negativos que ocurren en un radioisótopo de Ir-192, los fotones gamma emitidos el nivel de energía de donde se desprenden y el tiempo que tarda cada emisión se puede considerar como un resumen grafico de las anteriores tablas.



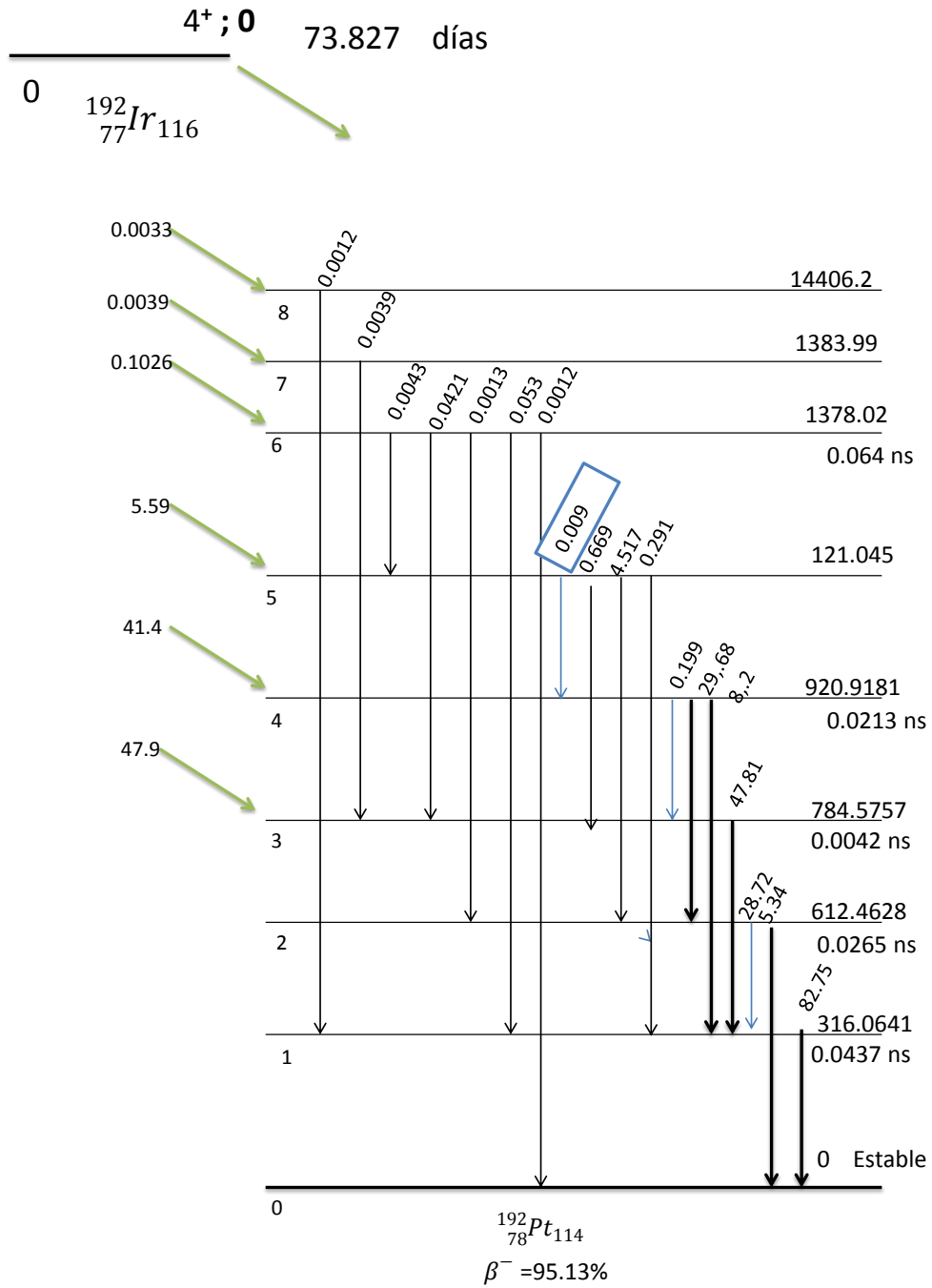


Figura 2-4: Esquema de decaimiento del  $^{192}\text{Ir}$ , mediante decaimientos beta negativos.

## 2.5.2. Cesio-137 ( $^{137}\text{Cs}$ )

El  $^{137}\text{Cs}$ ), se desintegra mediante decaimientos beta menos, decae a  $^{137}\text{Ba}$  estable (5.6 %) y por una emisión de un fotón con una energía de 661 keV de un nivel isomérico de bario  $^{137}\text{Ba}$  (94.4 %) el cual tiene una vida media de 2.55 minutos siendo uno de las transiciones más largas de los radioisótopos.

Los datos contenidos en las Tablas 2-4, 2-5 y la Figura 2-5, son referenciados y tomados de Helmer RG & Chechev VP.,(2007).

Datos Nucleares:

$T_{1/2}(^{137}\text{Cs})$  : 30.05 años

$Q^-(^{137}\text{Cs})$  : 1175.68 keV

### 2.5.2.1. Transiciones $\beta^-$

En la Tabla 2-4 se muestran los decaimientos betas menos a que tiene lugar el isotopo radioactivo de  $^{137}\text{Cs}$ , la energía con la cual se produce el decaimiento en KeV, la probabilidad tomada por cada 100 desintegraciones que acurran, la naturaleza de la emisión y el alcance maximo de la particula tomada en pies (ft).

**Tabla 2-4:** Transiciones beta del  $^{137}\text{Cs}$ .

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones	Natural	lg ft
$\beta_{0,2}^-$	513.97	94.36	1 st Prohibido	9.63
$\beta_{0,1}^-$	892.1	0.00061	2 st Prohibido	15.64
$\beta_{0,0}^-$	1175.63	5.64	2nd Prohibido	12.06

### 2.5.2.2. Transiciones gamma y esquema de desintegración del $^{137}\text{Cs}$ .

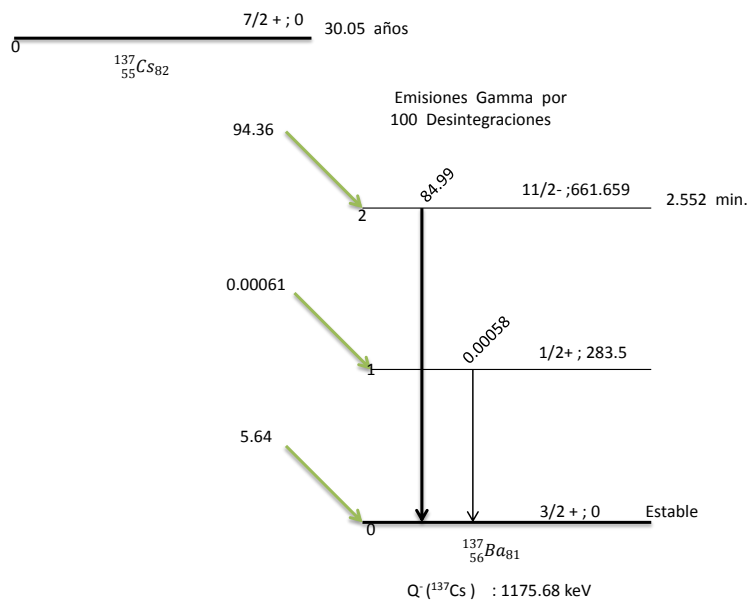
En el radioisótopo de  $^{137}\text{Cs}$  presentan a consecuencia de las transiciones beta neagativas, la emisión de fotones gamma las cuales seran tabuladas en la Tabla 2-5, el isótopo estable

al cual decae, la energía con la cual es emitido en KeV, la probabilidad de que el fotón sea emitido por cada cien desintegraciones del radioisótopo y el orbital al cual tiene la mayor probabilidad normalizada de ser emitido

**Tabla 2-5:** Transiciones gamma.

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones	Multipolaridad	$\alpha_K$	$\alpha_L$	$\alpha_M$	$\alpha_T$
$\gamma_{1,0}(Ba)$	513.97	0.00061	[M1,E2]	0.046	0.0073	0.001	0.0557
$\gamma_{1,0}(Yb)$	661.659	94.36	E2	0.0896	0.0165	0.00352	0.1102

En la Figura 2-5 se identifican los decaimientos beta menos que ocurren en un radioisótopo de  $^{137}\text{Cs}$ , los fotones gamma emitidos el nivel de energía de donde se desprenden y el tiempo que tarda cada emisión se puede considerar como un resumen grafico de las anteriores tablas.



**Figura 2-5:** Esquema de decaimiento del  $^{137}\text{Cs}$ , mediante decaimientos beta menos.

### 2.5.3. Cobalto-60 $^{60}\text{Co}$

Los siguientes datos contenidos en las Tablas 2-6, 2-7, 2-8 y 2-9 y Figura 2-6, fueron tomadas de Helmer RG., (1998).

#### Descripción del isótopo radioactivo del $^{60}\text{Co}$ .



El  $^{60}\text{Co}$  se desintegra mediante emisiones beta menos, emitiendo partículas secundarias y fotones gamma hasta decaer finalmente en un isótopo estable de níquel  $^{60}\text{Ni}$ , (ver figura Figura 2-6).

Datos Nucleares del Isótopo:

$T_{1/2}({}^{60}\text{Co})$  : 5.2711 años

$Q^{-}({}^{60}\text{Co})$  : 2823.07 KeV

#### 2.5.3.1. Transiciones $\beta^{-}$

En la Tabla 2-6, son referenciadas las transiciones  $\beta^{-}$  que ocurren el  $^{60}\text{Co}$ , se incluye: la energía con la cual es emitida la partícula en KeV, la probabilidad de emisión por cada cien desintegraciones, el alcance máximo en pies de dicha partícula.

**Tabla 2-6:** Transiciones  $\beta^{-}$  del  $^{60}\text{Co}$ .

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones	Natural	lg ft
$\beta_{0,3}^{-}$	317.32	99.88	Permitido	7.51
$\beta_{0,2}^{-}$	664.46	0.002	Único 2° prohibido	
$\beta_{0,1}^{-}$	1490.56	0.12	Único 2° prohibido	14.7

### 2.5.3.2. Transiciones gamma y coeficientes de conversión internos

Si verificamos en la Tabla 2-6 el isótopo de  $^{60}\text{Co}$  presenta tres desintegraciones  $\beta^-$ , de las cuales son emitidos seis fotones gamma, los mas probables son de 1.17 y 1.33 MeV de energía, en la Tabla 2-7 se referencian los fotones gamma emitidos con datos tales como: energía en KeV, probabilidad por cada cien desintegraciones del radioisótopo, la polaridad y la probabilidad del orbital del cual sera emitido.

**Tabla 2-7:** Transiciones gamma del  $^{60}\text{Co}$ .

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones	Multipolaridad	$\alpha_K$	$\alpha_L$	$\alpha_T$	$\alpha_{II}$
$\gamma_{3,2}(\text{Ni})$	3.4714	0.0075	[E2]	49.9	5.03	55.7	
$\gamma_{2,1}(\text{Ni})$	826-10	0.007	M1+45 % E2	3.0	0.291	3.4	
$\gamma_{3,1}(\text{Ni})$	117.240	99.85	E2(+m3)	1.51	0.148	1.68	0.62
$\gamma_{1,0}(\text{Ni})$	1332.508	99.9988	E2	1.15	0.113	1.28	3.4
$\gamma_{2,0}(\text{Ni})$	2158.61	0.0012	E2	0.445	0.043	0.495	
$\gamma_{3,0}(\text{Ni})$	2500.748	0.000002	E4	0.780	0.076	0.86	

### 2.5.3.3. Radiación X

En la Tabla 2-8 se presentan los fotones X producidos desde las capas K y L desde este radioisótopo, el orbital, la energía en KeV y la probabilidad para cada orbital por cada cien desintegraciones.

**Tabla 2-8:** Fotones X producidos por el  $^{60}\text{Co}$ .

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones
$X_k$		
$K_{\alpha 2}$	7.46097	51.24
$K_{\alpha 1}$	7.47824	100

$K_{\beta 3}$	8.2647	20.84
$K_{\beta 5}$	8.3287	20.84
$K_L$		
$L_I$	0.74	
$L_{\gamma}$	- 0.94	

#### 2.5.3.4. Electrones Auger

Tabla 2-9 los electrones Auger producidos por segundas ionizaciones, la capa desde la cual se desprende, el rango energía en KeV necesario para su expulsión y la probabilidad por cada cien desintegraciones de ser emitido.

**Tabla 2-9:** Electrones Auger producidos por el  $^{60}\text{Co}$ .

	Energía KeV	Probabilidad X 100 desintegraciones
Auger K		
KLL	6.26 - 6.54	100
KLX	7.20 - 7.47	27.6
KXY	8.10 - 8.32	1.9
Auger L		
	0.7 - 0.9	329

En la Figura 2-6, se ilustra la forma como un átomo de  $^{60}\text{Co}$  decae a un átomo estable de  $^{60}\text{Ni}$  las líneas inclinadas hacia la derecha son los decaimientos beta menos experimentados por el radioisótopo de cobalto, las flechas verticales representan los fotones  $\gamma$  y las líneas horizontales representan los niveles de energía, además en el extremo derecho de cada nivel esta, el tiempo que dura cada emisión en ps.

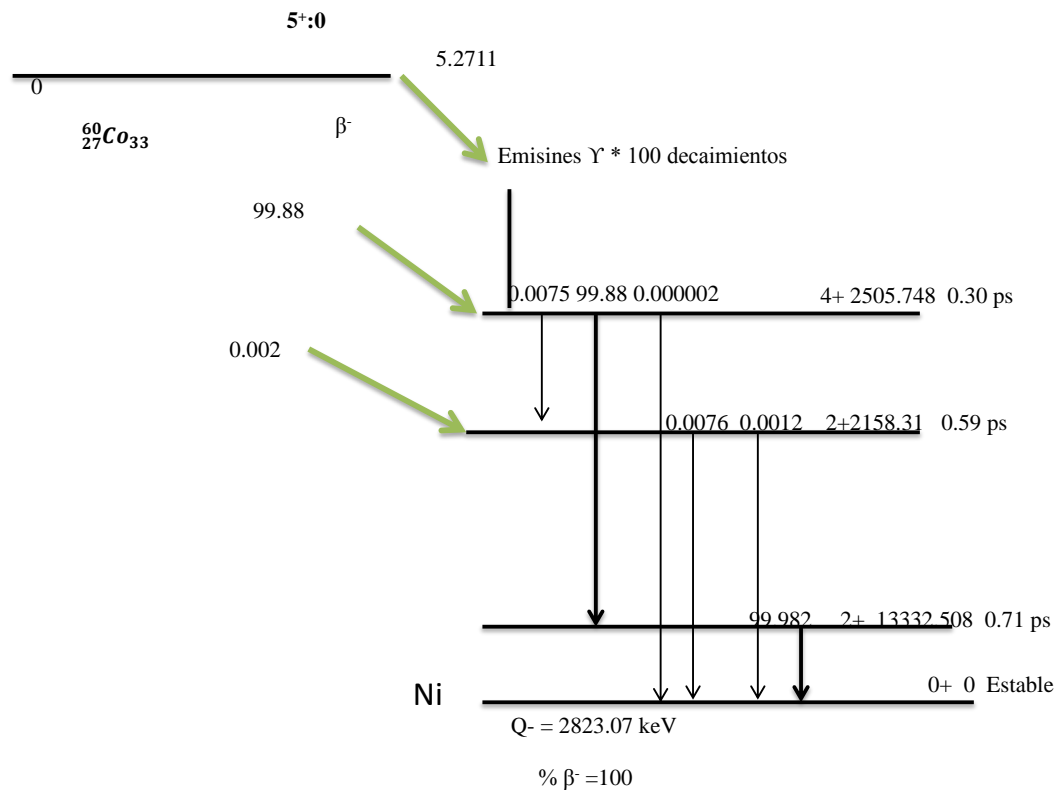


Figura 2-6: Esquema de decaimiento del  $^{60}\text{Co}$

### 3 Coeficientes de atenuación

La radiación gamma luego de ser emitida interactúa con el medio donde se propaga, dependiendo del material que se interponga, la radiación inicial va perdiendo energía debido a las diferentes colisiones con electrones de átomos presentes en el material, este proceso se conoce como atenuación de la radiación.

Se puede definir la interacción entre un fotón y un electrón como un choque mecánico directo. Este hecho puede explicar una de las características más importantes de la radiación electromagnética: el poder de penetración a través de la materia, el cual es muy superior al de las partículas cargadas como ya se mencionó en el capítulo uno, Hernandez *et al.*, (2008). La expresión analítica de la ley de atenuación se puede explicar fácilmente si consideramos un espesor de material compuesto por placas paralelas, de un espesor "l" sobre la cual incide perpendicularmente un haz colimado de fotones. Llamemos  $N_0$  el número de fotones incidentes al material en el instante  $t_0$ . Al atravesar el espesor  $dl$ ,  $N$  será el número de fotones que consiguen atravesar el material, donde una proporción  $dN$  serán absorbidos por el medio material entre el espesor  $dl$ , por tanto, la expresión matemática que modela este sistema será:

$$dN = -\mu \cdot N \cdot dl, \tag{3-1}$$

donde  $\mu$  se considera como la probabilidad individual que una interactúe por unidad de espesor y tiene unidades de  $\text{cm}^{-1}$ . Para obtener el total de fotones absorbidos, realizamos una integral sobre todo el espesor de la lámina.

$$\int dN = \int -\mu \cdot N \cdot dl. \tag{3-2}$$



Realizando separación de variables.

$$\int \frac{dN}{N} = \int \mu \cdot dl. \quad (3-3)$$

Desarrollando la integral propuesta:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\mu \cdot l. \quad (3-4)$$

Aplicando exponencial a ambos lados de la igualdad.

$$N = N_0 \cdot e^{-\mu l}. \quad (3-5)$$

La ecuación es válida solamente si:

- 1) La radiación que incide es monoenergética.
- 2) El haz incidente es colimado, es decir las trayectorias de los fotones son paralelas y normales a la superficie absorbente.
- 3) El espesor absorbente es pequeño .

La tercera condición es ambigua puesto que depende de la energía de la radiación y de la naturaleza del absorbente. Un absorbente se puede considerar como delgado cuando la probabilidad que un fotón sufra una dispersión Compton doble es menor al 1 %.

Como se puede deducir de la expresión anterior, la atenuación depende del valor de  $\mu$  y del espesor del absorbente, es aquí donde se puede apreciar la diferencia de comportamiento de la radiación frente al de las partículas cargadas; en éstas basta interponer un absorbente de espesor ligeramente superior al alcance de las partículas más energéticas presentes en el haz, para absorberlo completamente, mientras en el caso de la radiación electromagnética se requiere un gran espesor para alcanzar el mismo efecto.

El coeficiente de atenuación depende funcionalmente de la energía de los fotones y del número atómico del absorbente. Por la forma de la ecuación anterior el producto  $\mu \cdot l$  tendrá que ser adimensional, por tanto  $\mu$  ha de tener dimensiones de inverso de la longitud expresada en  $\text{cm}^{-1}$ . Por esa razón  $\mu$  se denomina (coeficiente de atenuación lineal), Didactic L.D., (2006).

### 3.1. Atenuación exponencial modelo simple

Se había abordado el concepto de atenuación, para el caso del modelo simple tendremos en cuenta las tres condiciones anteriores que se resume en considerar que todas las partículas del haz poseen el mismo momento lineal.

Sea  $\mu$  la probabilidad individual de que una partícula interactúe por una unidad de espesor, el número de partículas absorbido en el material de espesor  $dl$  es:

$$dN = -\mu \cdot N \cdot dl \quad (3-6)$$

$\mu$  por tanto tiene unidades de  $\text{cm}^{-1}$ . Si analizamos la fracción de partículas absorbidas por cada porción de material atravesado será entonces:

$$\frac{dN}{N} = -\mu \cdot dl \quad (3-7)$$

Integrando sobre el todo el espesor y definiendo  $N_s$  como el número de fotones que atraviesan el espesor  $l$ , se obtendrá mediante un método similar al utilizado anteriormente se obtiene.

$$\int_{N_0}^{N_s} \frac{dN}{N} = \int_0^L -\mu \cdot dl \quad (3-8)$$

$$\frac{dN}{N} = -\mu \cdot dl \quad (3-9)$$

$$N_s = N_0 \cdot e^{-\mu L}, \quad (3-10)$$

la anterior expresión se conoce como la ley de atenuación exponencial.

Los coeficientes de atenuación lineal  $\mu$  varía con la densidad del absorbente. Para evitar esta

dificultad recurrimos a un truco matemático multiplicando y dividiendo por la densidad del absorbente  $\rho$ , con lo cual la ecuación anterior toma la forma:

$$N_s = N_0 \cdot e^{-\frac{\mu\rho}{\rho} \cdot L}, \quad (3-11)$$

al cociente de  $\frac{\mu}{\rho}$  se le denomina coeficiente másico de atenuación que tiene unidades de  $\frac{m^2}{Kg}$ . Este proceso solo se presenta para partículas no cargadas (fotones y neutrones), por tanto no es una constante que depende del material, el tipo de radiación y su energía.

El producto de  $\rho \cdot L$  cuyas unidades son  $\frac{g}{m^2}$  representa la masa por unidad de superficie que debe atravesar el haz. De esta manera podemos decir que  $\frac{\mu}{\rho}$  indica la cantidad de partículas que interactúan con el material por unidad de masa superficial. Esta ley de atenuación tiene ciertas restricciones tales como considerar que el haz es mono energético y estrecho es decir que solo una fracción de fotones dispersos es capaz de alcanzar el detector y por tanto ser contados.

Al desarrollar en series de Taylor la ecuación 3-11 obtendremos:

$$N_s = N_0 \left( 1 - \mu L + \frac{\mu L^2}{2!} - \frac{\mu L^3}{3!} + \frac{\mu L^4}{4!} - \dots \right), \quad (3-12)$$

para cuando  $\mu \cdot L \ll 1$  es decir del orden 0.01, es una buena aproximación considerar que:

$$N_s \simeq N_0 \cdot (1 - \mu L). \quad (3-13)$$

La magnitud de  $\frac{1}{\mu}$  se define como recorrido libre medio de las partículas incidentes en el medio del blanco. Es la distancia media que puede recorrer una partícula antes de interactuar. Esta atenuación nos permite caracterizar el grado de atenuación del medio dependiendo del porcentaje que el material logre absorber entre mayor sea este porcentaje menor será el número de fotones que logren atravesarlo.

$\frac{1}{\mu} \rightarrow \frac{1}{e}$  factor de reducción de fluencia (37%)

$\frac{3}{\mu} \rightarrow 5\%$

$\frac{5}{\mu} \rightarrow$  menos del 1%

$\frac{7}{\mu} \rightarrow$  menos del 0,1%

### 3.1.1. Atenuación exponencial HVL y TVL

En la caracterización y blindaje de un haz de radiación suele con frecuencia utilizarse la llamada capa hermirreductora o HVL (Half Value Layer) y también la TVL capa decimo reductora (Tenth Value Layer). La capa hermirreductora HVL se considera como el espesor necesario del material para reducir la intensidad de la radiación a la mitad, llamaremos  $d_{HVL}$  el espesor necesario para reducir el numero de fotones a la mitad es decir que:

$$\frac{dN}{dL_{HVL}} = -\mu \cdot N, \quad (3-14)$$

como en casos anteriores al integrar:

$$N = N_0 e^{-\mu L_{HVL}}, \quad (3-15)$$

como N en este caso es igual a  $\frac{N_0}{2}$  remplazándolo en la ecuación anterior y remplazando  $L_{HVL}$  por HVL tendremos:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\mu HVL}, \quad (3-16)$$

con lo cual luego de aplicar logaritmo natural (Ln) en ambos lados de la expresión anterior:

$$\text{Ln} \frac{1}{2} = -\mu HVL. \quad (3-17)$$

Por propiedades del logaritmo:

$$\text{Ln} 1 - \text{Ln} 2 = -\mu HVL, \quad (3-18)$$

como  $\text{Ln} 1 = 0$  se obtendrá finalmente que:

$$\text{HVL} = \frac{\text{Ln} 2}{\mu}. \quad (3-19)$$

La anterior expresión se le conoce como espesor hermirreductor es claro que no depende de la intensidad del haz incidente y únicamente dependerá del coeficiente de atenuación del material que a su vez se relaciona con la sección eficaz del mismo.

Si HVL lo definimos como  $L_H$  lo consideramos como la capa hermirreductora de un determinado haz entonces la atenuación se podrá escribir en la siguiente forma:

$$N_s = N_0 2^{\frac{-L}{L_H}}. \quad (3-20)$$

El factor  $L_H$  depende del material escogido y del espectro de energía del haz incidente (para haces polienergéticos). En la práctica para rayos X, el conocimiento de la capa hermirreductora se considera como suficiente para caracterizar el haz. El TVL es el espesor de material que reduce la intensidad de radiación a la décima parte, por un procedimiento muy similar al expuesto para determinar el HVL se llega a obtener la expresión matemática que permite modelar el sistema de la forma:

$$\text{TVL} = L_n \frac{10}{\mu} = \frac{2 \cdot 3026}{\mu}, \quad (3-21)$$

y para modelar la atenuación y redefiniendo TVL como  $L_T$ , al espesor del material que reduce la intensidad a la décima parte se obtiene:

$$N_s = N_0 10^{\frac{-L}{L_T}} \quad (3-22)$$

### 3.1.2. Atenuación exponencial modelo compuesto

Si al momento de atenuar o frenar una partícula, el blindaje o medio está compuesto por varios materiales, entonces la probabilidad individual de interacción  $\mu$  puede ser compuesta en diferentes términos es decir sumar todos los coeficientes de atenuación del medio.

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots,$$

donde  $\mu_1$  se define como el coeficiente de atenuación lineal parcial correspondiente al proceso de interacción número uno y así sucesivamente.

El número de interacciones de cada tipo, que se producen en una capa de espesor  $dL$  del material, el cual atraviesa el haz es:

$$dN_1 = N \cdot \mu_1 dL, \quad dN_2 = N \cdot \mu_2 dL, \quad (3-23)$$

de esta manera podemos encontrar el número de interacciones de cada tipo que se producen en un espesor  $dL$ .

Al integrar de la misma forma como se realizó para el caso de una sola interacción se obtendrá:

$$N_s = N_0 \exp^{-\mu L} = N_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots)L}. \quad (3-24)$$

Ahora en la lámina macroscópica de espesor total ( $L$ ) el número de interacciones de un determinado tipo  $N_i$  lo podemos obtener del número total sabiendo que la fracción del total que le corresponde será  $\frac{\mu_i}{\mu}$ .

$$N_i = \Delta N \frac{\mu_i}{\mu} = (N_0 - N_s) \cdot \frac{\mu_i}{\mu} = N_0 (1 - e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots)L}) \cdot \frac{\mu_i}{\mu}. \quad (3-25)$$

De esta manera podemos determinar la atenuación que sufre el haz en cada superficie que está atravesando.

### 3.1.3. Atenuación exponencial de un haz ancho

En la definición del coeficiente de atenuación  $\mu$  habíamos excluido a aquellas partículas no primarias es decir que hayan sufrido cualquier tipo de interacción con el blanco. Entonces el coeficiente  $\mu$  incluirá los coeficientes parciales de atenuación de todos los procesos que pueda sufrir una partícula primaria.

La situación real o de haz ancho se considera un coeficiente  $\mu' < \mu$  debido a la probabilidad de contar alguna partícula que haya sufrido difracción es decir ocurre dispersión en un ángulo pequeño.

$$\mu' \rightarrow \mu,$$

en general  $\mu$  será el límite de  $\mu'$  cuando nos movemos hacia una geometría de haz estrecho: alejando el atenuador del detector, alejando la fuente del atenuador, colimando con un material de blindaje adecuado etc.

### 3.1.4. Coeficiente de absorción de energía

Si consideramos el hecho de que sobre cierto material de un espesor  $L$  incide un haz de partículas no cargadas (fotones o neutrones). Se cumplirá que las partículas primarias portan una energía radiante  $R_0$ , en parte sufriendo interacciones dentro del material y las demás atravesándolo sin ser dispersadas o absorbidas. En una situación ideal de haz ancho detectamos todas las partículas secundarias y primarias producidas en el blanco (suficientemente fino). Si nuestro detector responde de modo proporcional a la energía radiante de todas las partículas, primarias, secundarias o dispersadas podremos medir la energía que continúa luego de atravesar el espesor  $L$ , de tal forma que dicho cambio en esta energía la podemos medir como:

$$dR = -\mu_{en} \times R dL. \quad (3-26)$$

De esta manera se mide la variación en una pequeña variación del espesor, bastará integrar la anterior expresión para hallar el total de la energía perdida  $R_s$ , por absorción en el material que se atravesó será de la forma:

$$\int_{R_0}^{R_s} dR = \int_{L_0}^L \mu_{en} R dL$$

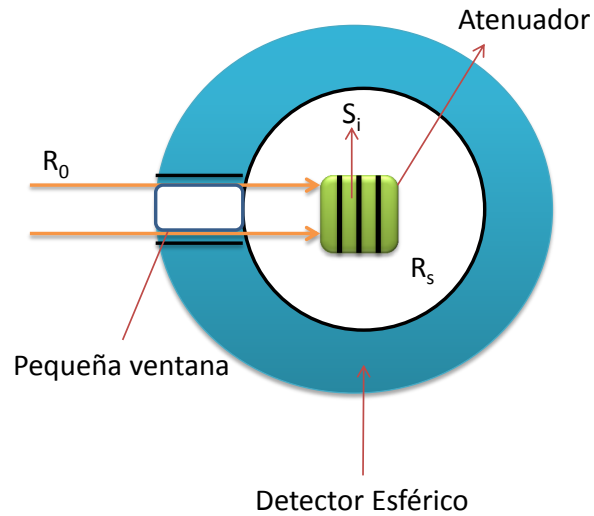
$$\int_{R_0}^{R_s} \frac{dR}{R} = \mu_{en} \int_{L_0}^L dL.$$

Finalmente integrando y aplicando límites y aplicando Ln a ambos lados de la expresión anterior se logra llegar a que la energía total perdida sería de la forma:

$$R_s = R_0 \exp^{-L\mu_{en}}, \quad (3-27)$$

donde  $\mu_{en}$  se conoce como el coeficiente de absorción lineal de energía cuyas unidades son  $m^{-1}$ , y  $\mu_{en}/\rho$  se define como el coeficiente de atenuación másico de absorción de energía el cual tiene unidades de  $m^2/Kg$ .

Se suele considerar como la atenuación  $\mu_{en}$  como una aproximación  $\mu'$  a un caso real, se esquematiza en la Figura **3-1**.



**Figura 3-1:** Esquema de un detector esférico. Evan R.D.

Se observa la manera como colocando un detector esférico podemos contar no solamente los fotones primarios sino que también serán detectados las segundas interacciones además por secciones del atenuador.

En una situación real no detectamos todas las partículas dispersadas que debían llegar al detector (aunque puede haber compensación fuera del contenedor en comparación con las que están dentro del contenedor es decir partículas que en condiciones normales no llevaban una trayectoria hacia el detector y que por dispersión fueron contadas en el detector.

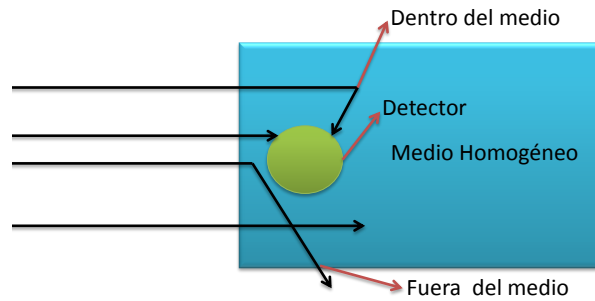
En la Figura 3-2. Se muestra la forma como los fotones primarios luego de tener interacciones con el medio pueden ser contados por el detector, así como fotones primarios que llevaban una trayectoria directa hacia el detector al interactuar con el medio son dispersados y desviados de su trayectoria sin ser contados, por esta razón es que se considera este fenómeno como compensatorio.

De esta manera se puede considerar que:

$$\mu_{en} < \mu' < \mu \text{ dentro del contenedor} < \text{fuera del contenedor}$$

$$\mu' < \mu_{en} \text{ fuera del cotenedor} < \text{dentro del contenedor}$$





**Figura 3-2:** Forma de mantener el equilibrio entre los fotones disparados y los fotones que cambia su trayectoria hacia el detector. Evan R.D.

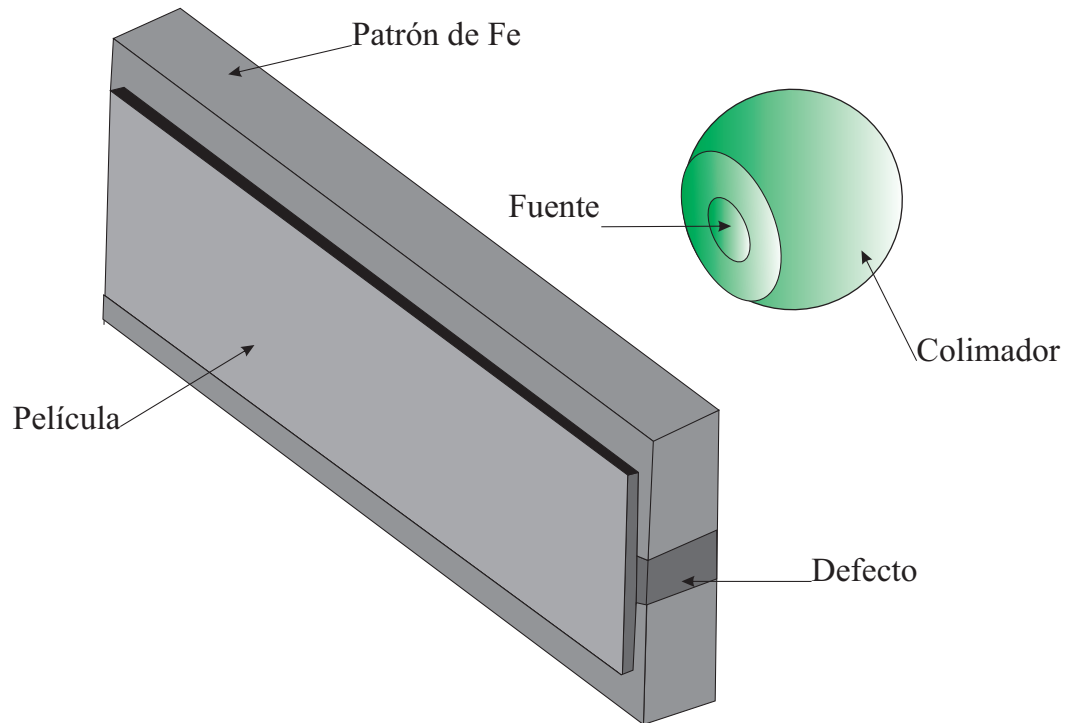
De las anteriores expresiones podemos concluir que el coeficiente de absorción de energía es menor que el coeficiente de atenuación de energía real por esta razón el coeficiente de atenuación será mayor dentro del medio homogéneo que fuera de él.

## 4 Técnicas de radiografía industrial

La radiografía, se utiliza en diversos campos de la industria. Es un tipo de prueba que se puede realizar en campo, es decir en el sitio donde se están llevando a cabo los trabajos. Se obtienen los resultados rápidamente y al finalizar las pruebas queda un registro (en este caso las placas radiográficas) de las pruebas hechas. Uno de los principales campos en los que se utiliza la radiografía industrial son; la evaluación de la calidad de soldaduras, ya que es la manera confiable de saber la calidad de una soldadura, la evaluación y detección del armado de estructuras metálicas y de columnas de concreto en edificios, certificación de maquinaria y equipos, detección de defectos en piezas fundidas, entre otras.

### 4.1. Técnica de pared sencilla

Se denomina también radiografía plana, es una técnica utilizada para irradiar objetos compactos cuyo espesor puede variar, es muy útil para identificar defectologías en soldaduras de perfiles o piezas laminadas, no solamente se utiliza en materiales de este tipo también se puede aplicar a tuberías en las cuales, en esta técnica, la película radiográfica se coloca detrás de la primer pared del tubo, se realiza cuando se tiene la posibilidad de que el tubo este vacío o cuando se quiere verificar defectos en el mismo sin que ocurra superposición con la otra pared. Cuando se realiza en tubos puede resultar un poco más complicado debido a que los tiempos de exposición son cortos y el montaje debe ser preciso y la exposición de la fuente se debe realizar lo mas rápido posible, la técnica se resume en la Figura 4-1.



**Figura 4-1:** Montaje prueba con fuente de  $^{60}\text{Co}$  para pared sencilla.

Este montaje se realiza dentro del bunker del laboratorio de radiaciones nucleares de la U.P.T.C con un patrón de acero de espesor 25 mm solo se muestra el colimador direccional colocado en el extremo del tubo guía ya que la fuente junto con su blindaje se encuentran empotradas dentro de una de las paredes del bunker. Esta técnica se utilizó en la obtención de resultados para los patrones de 2.5 cm, 2.0 cm y 1.5 cm. Para simplificar la comprensión del texto referenciaremos por métodos los procedimientos hechos.

#### 4.1.1. Procedimiento 1 y 2

Según este código ASME sección V, la ecuación para determinar la penumbra geométrica, está establecida por la expresión empírica:

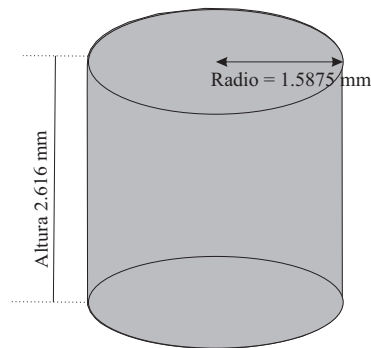
$$P = \frac{F \cdot x}{D}, \quad (4-1)$$

donde P es la penumbra geométrica, x el espesor del objeto en cm, D la distancia fuente objeto en cm y F se define como tamaño de la fuente, este tamaño se calculó tomando la forma geométrica de la fuente reportada por el fabricante, sin tener en cuenta la capsula que la envuelve, esto es, su forma cilíndrica con las dimensiones que se muestran en la Figura 4-2.

A partir de las medidas de la fuente:

Diámetro: 3.175 mm.

Altura: 2.616 mm.



**Figura 4-2:** Geometría de la fuente.

Tomando el área lateral del cilindro y teniendo en cuenta que la fuente al momento de la exposición está de frente y que la exposición se realiza con colimador se tendrá:

$$\text{Area Lateral} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h, \quad (4-2)$$

donde r hace referencia al radio de la fuente y h la altura del cilindro.

$$\text{Área Lateral} = 2 \cdot \pi 1,5875\text{mm} \cdot 2,616\text{mm}$$

$$\text{Área Lateral} = 26,0934\text{mm}^2.$$

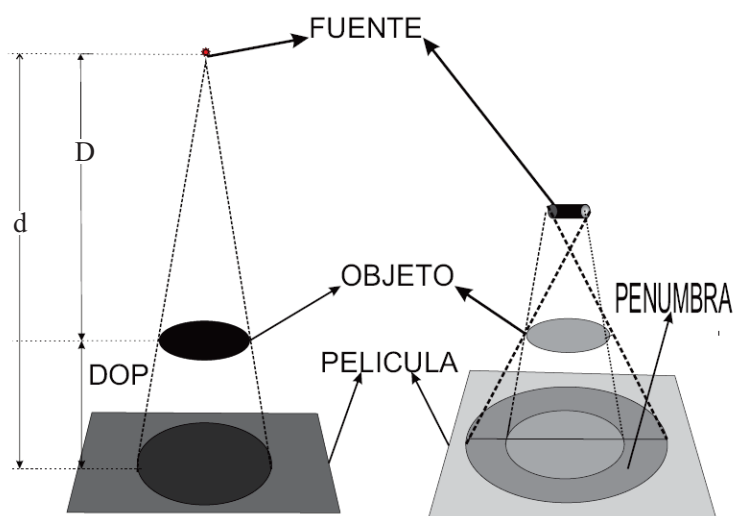
Una vez tenemos el área del cilindro el tamaño real de la fuente será entonces

$$\text{TRF} = \sqrt{\text{Área Lateral}} \quad (4-3)$$

$$\text{TRF} = \sqrt{26,09344\text{mm}^2}$$

$$\text{TRF} = 5,10817\text{mm}.$$

De la Ecuación. 4-1, P es la penumbra geométrica definida como una falta de nitidez de los bordes de la imagen radiográfica, debida básicamente a que en la práctica la fuente no la podemos considerar como una puntual, de tal forma que, luego del revelado lo que encontraríamos es una zona de penumbra la cual nos reduce notablemente la nitidez de la imagen, para entender de una manera más clara se realizó un esquema donde se muestra la aparición de la penumbra, para nuestro caso tomamos la penumbra reportada por la literatura, que para espesores inferiores a 50 mm será de 0.50, En la Figura 4-3 se presenta un esquema explicativo de la penumbra. Las siglas d, D y DOP corresponden a: Distancia Fuente Película, Distancia Fuente Objeto y Distancia Objeto Película.



**Figura 4-3:** Óptica mediante la cual se presenta la penumbra.

De la Ecuación. 4-1,  $x$  nos representa el espesor del objeto, en este trabajo estos espesores corresponden a 1.5, 2.0 y 2.5 cm.

Finalmente podemos calcular la distancia fuente objeto de la Ecuación. 4-1, para cada espesor.

Para espesor de 20 mm será:

$$D = \frac{5.10817\text{mm} \cdot 20\text{mm}}{0.50\text{mm}}$$

$$D = \frac{5.10817\text{mm} \cdot 20}{0.50}$$

$$D = 204.3268\text{mm}$$

$$D = 20.43268\text{cm}.$$

Una vez se tiene la distancia fuente objeto podemos determinar el tiempo de exposición haciendo uso de la siguiente ecuación empírica:

$$t = \frac{H \cdot A \cdot d^2}{S}, \quad (4-4)$$

donde  $H$  hace referencia al factor de película, no es otro que una constante que relaciona, la densidad de película y la calidad del haz de radiación, además del tamaño de grano, es decir, el tamaño de los cristales del bromuro de plata, este valor es proporcionado por la empresa fabricante. Para este trabajo se utilizamos película Structurix AGFA D7 que reporta una densidad de 2.5 y su factor de película es 5.87.

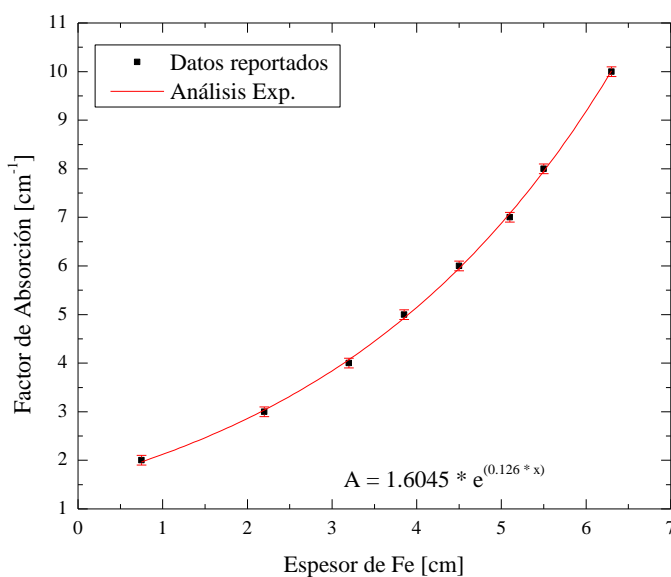
De la Ecuación 4-4, el factor de absorción  $A$  cuyas unidades son decaimientos/cm, lo podemos entender como las transiciones electrónicas que ocurren en los átomos, se pueden obtener considerando no sólo la interacción de los electrones y los fotones gamma con los átomos del objeto a irradiar.

Cuando los fotones gamma en su trayectoria encuentran cualquier medio material interactúan con él. Parte del haz incidente se transmite y otra parte es absorbida por el medio. La física nuclear muestra que la disminución de la intensidad  $I$  de un haz de radiación a medida que

pasa a través de cualquier medio material es proporcional a la distancia atravesada,  $x$ . El factor  $A$  puede ser tomado de la Tabla 4-1. Estos factores hasta 6.3 cm han sido reportados por. Torres *et al* (1984).

**Tabla 4-1:** Factor de absorción para el  $^{60}\text{Co}$  en Fe.

Espesor (cm)	Factor de absorción
0.75	2
2.2	3
3.2	4
3.85	5
4.5	6
5.1	7
5.5	8
6.3	10



**Figura 4-4:** Curva característica para el cálculo del factor  $A$ , Tarres *et al.*, (1984)

Aprovechando este reporte, se procede a obtener la curva característica y obtener una ecuación matemática que nos permita calcular el factor de absorción para cualquier espesor de

De la Figura 4-4, se obtuvo la Ecc. 4-5 utilizada en los cálculos del factor de absorción A, para este trabajo, los que se muestran en la Tabla 4-2

$$A = 1.6045 \cdot e^{0.1263 \cdot x} \quad (4-5)$$

**Tabla 4-2:** Factor de absorción de los diferentes patrones utilizados.

Características del patrón	Material	Espesor (mm)	Factor de Absorción	Clase de acero
Cordón de soldadura	Acero al carbon	25	3.320136441	P 1020
Cordón de soldadura con defecto incrustado.	Acero al carbon	20	2.870742993	P 1020
Pieza soldada con un orificio como defecto.	Acero al carbon	15	2.482176705	P 1020
Tubo triple cordon de soldadura	Acero de moldeo	11	2.209547799	P 1020

Los patrones utilizados para este trabajo están constituidos por acero de baja aleación de carbono y el tubo utilizado en la técnica de pared doble es de acero de moldeo con características muy similares a las de aceros de baja aleación de carbono en los cuales el porcentaje de carbono no supera el 0.12%. De la Ecc. 4-4, nos queda por determinar la variable S (Actividad de la fuente), dicha actividad la tomaremos para los diferentes cálculos en mCi, la distancia la tomaremos en centímetros. Debido a que la actividad de la fuente cambia diariamente su actividad, esta es calculada teóricamente mediante la ecuación:

$$S = S_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (4-6)$$

$S_0$  es la actividad inicial de la fuente para nuestros cálculos la tomaremos como 49.9 Ci actividad registrada en el certificado de la fuente a la fecha inicial de su fabricación.

$\lambda$ . Es la constante de decaimiento propia de cada radioisótopo definida como la razón entre  $\ln 2$  y el tiempo de vida media, para el caso de la fuente de  $^{60}\text{Co}$  este tiempo es de 5.2711 años. El valor calculado para  $\lambda = 4.14709 \cdot 10^{-9} s^{-1}$ . Para facilitar los cálculos se utilizó una hoja de cálculo en la cual se tiene el cambio diario en la actividad.

Por ultimo queda por determinar la variable d de la Ecc. 4-4 que corresponde a la distancia fuente película. En un cálculo anterior se mostró como determinar la distancia fuente objeto



(D). Para calcular distancia fuente película (d), bastara sumarle únicamente el espesor del objeto esto es:

$$d = D + x$$

donde x es el espesor del objeto.

Para el método 2 se tomó el espesor del objeto y multiplicado por 8, se tomó como distancia de irradiación d, y se remplazó en la Ecuación 4-4 obteniendo así una distancia adicional a lo reportado y sugerido por el código, los resultados son referenciados en la Tabla 5-2.

### 4.1.2. Procediminto 3

Haciendo uso de la Ecuación. 4-4, se procedió a realizar los cálculos para el patrón de 2.5 cm de espesor, para este método no se tiene en cuenta el valor de la penumbra como se hizo para el primer y segundo procedimiento debido a que solo se tomaron los valores propios del factor de la película (H) y el factor de absorción propio de cada espesor (A), las distancias tomadas se registran en la Tabla 5-3 junto con los tiempos de exposición utilizados para realizar la irradiación del patrón. Todas las irradiaciones se realizaron el mismo día garantizando nuevamente la homogeneidad en las variables que pudiesen modificar el resultado, de la misma forma están referenciadas algunas de las placas radiográficas tomando distancias mas cercanas y mas lejanas a la fuente debidamente marcadas e identificando los indicadores de calidad (IQ), como prueba de la calidad, en la placa radiográfica, de una forma similar se realizo el procedimiento para los patrón de 20 mm, para este patrón se contaba con cuatro muestras las cuales contenían diferentes defectologías, se escogió finalmente la que presentaba un defecto conocido como penetración incompleta, AWS B1.10., (2000) con el fin de poder verificar el tamaño del defecto. Se realizaron cálculos para varias distancias que van desde los 10 cm hasta las 50" manteniendo similitud con las distancias escogidas para el espesor de 25 mm. y para el patrón de 15 mm de espesor, este patrón corresponde a una pieza con un orificio en uno de sus extremos y unas marquillas en la superficie de 1 mm de profundidad.

## 4.2. Técnica de doble pared

La técnica es propia de tuberías, el haz atraviesa dos espesores de la pieza a irradiar y se proyecta la sección que se encuentre más cercana a la película, es una técnica muy utilizada en la industria petrolera para verificar la calidad de una soldadura, para el trabajo utilizamos la técnica de pared doble vista simple en la cual se califica la parte del cordón de soldadura más cercano a la fuente se tiene un poco más de cuidado debido a que la otra parte del cordón se traslapa en la imagen haciendo que el cordón se vea más ancho el montaje utilizado es como se observa en la Figura 4-5.

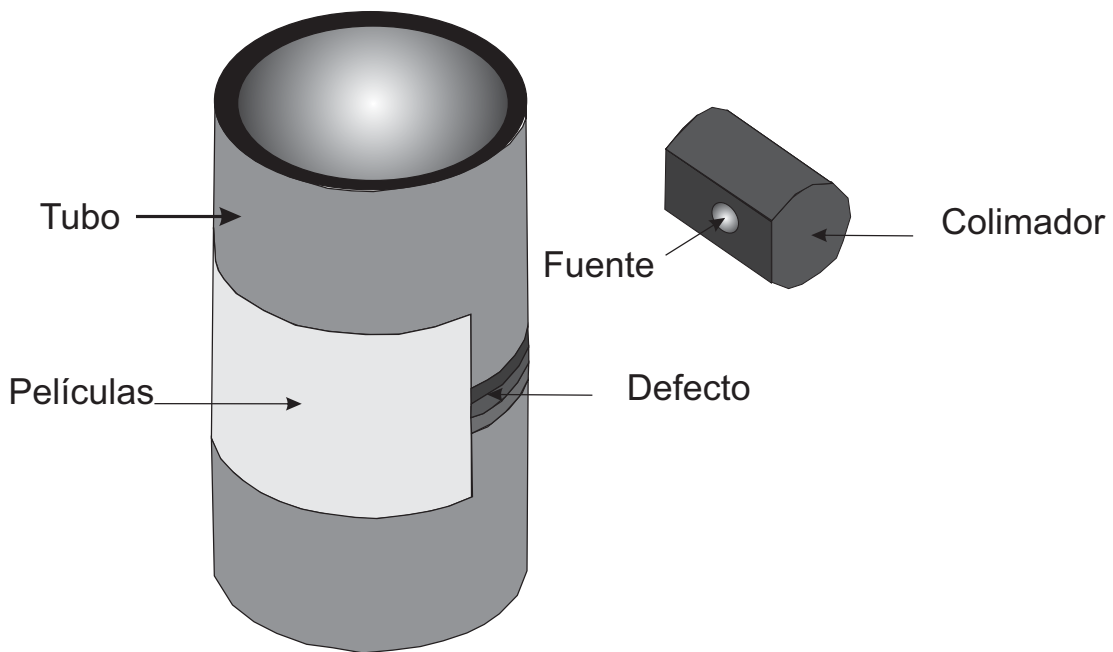


Figura 4-5: Técnica de doble pared.

### 4.3. Propiedades de la Película radiográfica

Una película radiográfica se compone de:

- 1) Un soporte de triacetato de celulosa o poliéster, ambos lados del soporte están provistos de:
  - a) Una capa de gelatina endurecida que protege la emulsión.
  - b) Una capa de emulsión.
  - c) Una capa muy delgada llamada substrato, que asegura la adherencia de la capa de emulsión al soporte, esto es un sellante que permite la estabilidad física de la capa de halogenuro de plata.

La emulsión fotográfica es sensible a la luz y a cualquier tipo de radiación la cual cubre la película, está constituida por una mezcla de gelatina y cristales de halogenuro de plata microscópico.

Entre las propiedades de una película radiográfica se encuentran las siguientes:

- 1) Presenta dos capas de emulsión, una por cada lado del soporte, lo que permite reducir los tiempos de exposición y obtener una imagen más contrastada.
- 2) La acción de la radiación electromagnética sobre la película da lugar a la formación de la imagen latente, la cual es puesta de manifiesto por el tratamiento de revelado y fijado realizado luego.
- 3) La emulsión es sensible a las radiaciones electromagnéticas.

En el mercado existen varios tipos de película, que generalmente, proporcionan resultados óptimos para las diferentes clases de trabajo en radiografía. Sin embargo, no se pueden formular reglas definitivas en la selección de películas, puesto que ello depende de los requisitos específicos del usuario tales como: nivel de calidad radiográfico, y tiempo de exposición máximo económicamente permisible.

Las películas no expuestas deben almacenarse de forma que, sean protegidas de los efectos: de la luz, presión, calor excesivo, humedad excesiva, vapores de gases o radiación penetrante. La limpieza es el más importante de los requisitos para obtener una buena radiografía. Debe evitarse el doblado y la presión excesiva y un manejo brusco. Asegurarse que el cuarto en el

que se está efectuando el revelado este totalmente oscuro, que las luces negras que se utilizan sea la adecuada, los líquidos del proceso de revelado sean los adecuados y que se encuentren limpios y en buenas condiciones, asegurarse que los tiempos que se mantendrán las películas en cada uno de los líquidos son los adecuados en relación a la temperatura.

### 4.3.1. Variables que inciden en la calidad de una radiografía

Para obtener una radiografía de óptima calidad hay que tomar en cuenta varios factores, aparte del manejo cuidadoso de la película, que se mencionó en la sección anterior.

#### 4.3.1.1. Selección de la película adecuada

En la Tabla 4-3 se presenta la clasificación de las cuatro clases de películas contempladas en la norma ASTM *E* – 94 – 68, dichas características son de gran importancia ya que una película no es apta para todos los tipos de exposiciones.

**Tabla 4-3:** Características de las Películas

Tipo de Película	Rapidez	Contraste	Tamaño de Grano
1	Lenta	Muy alto	Muy pequeño
2	Media	Alto	Pequeño
3	Alta	Medio	Grande
4(a)	Muy alta	Muy alto	(b)

(a) Película para ser utilizada con pantallas reforzadas fluorescentes. Cuando estas películas se exponen directamente o con pantallas de plomo, su rapidez, contraste y tamaño de grano son medios.

(b) El tamaño de grano depende de las características de las pantallas fluorescentes utilizadas. Las características de las películas pueden definirse así:

- **La rapidez.** Se define como la velocidad a la cual la película se ennegrece cuando es sometida a una exposición.
- **El contraste.** Es el grado de diferencia entre dos campos o zonas contiguas de una radiografía que presentan diferentes densidades.

- **La densidad.** Se define como el grado de ennegrecimiento de una película expuesta a la acción de la radiación. En primer lugar a la absorción de la luz por el soporte o base y en segundo lugar a la aparición del velo químico como consecuencia de la acción ejercida por los reactivos químicos utilizados en los baños de revelado y fijado sobre la emulsión.

- **Uso de los indicadores de control de calidad de imagen.**

El indicador de calidad de imagen es un dispositivo empleado para comprobar que la radiografía obtenida fue satisfactoria. Es empleado como un control de la sensibilidad y contraste alcanzados en la película. No se emplea para evaluar el tamaño de las discontinuidades o establecer límites de aceptación del material o producto, son de plomo y su espesor es generalmente del 2% del espesor del objeto. Enrique., *et al* (2006).

- **Indicadores de agujeros.**

Consisten en plaquitas planas, cuyo espesor esta perfectamente determinado, en las que se han taladrado varios orificios de diámetro creciente, siendo el más pequeño, generalmente, de diámetro igual al espesor de la placa.

- **Indicadores de hilos**

Son colecciones de hilos de material semejante al del objeto que se radiografía, colocados sobre una envoltura de polímeros, plástico, etc. Los diámetros de los hilos varían de acuerdo con una cierta progresión característica del indicador de control de imagen. La lectura se realiza sobre el diámetro del hilo más fino todavía visible en la imagen, deduciéndose, como siempre, la sensibilidad de detección que le corresponde.

#### 4.3.2. Radiografía de uniones soldadas.

De acuerdo con la necesidad y la imagen radiográfica a obter, los tipos de radiografía son:

- a) De una sola pared con interpretación de una sola pared.
- b) De doble pared con interpretación de la imagen de las dos paredes atravesadas por la radiación.

c) De doble pared con interpretación de una sola pared.

## 4.4. Tipos de defectologías en soldaduras

Son los diferentes tipos de defectos que se buscan encontrar con este END.

### 4.4.1. Grietas

Son discontinuidades de morfología bidimensional o laminar, que aunque regularmente salen a la superficie son difícilmente visibles a simple vista. Las grietas por su origen se pueden dividir en dos grandes grupos: Las frías o de tensión, producidas con el metal completamente solidificado y las calientes o de contracción que se forman con el metal aún en estado líquido, estas últimas pueden ser provocadas por la creación del arco sobre una de las paredes laterales de la tubería y luego moverlo dentro del área de soldadura.

### 4.4.2. Porosidades

Este defecto puede aparecer en la superficie o cara de la soldadura o en la soldadura completa. Es provocado por los gases que quedan atrapados dentro de la soldadura que se solidifica. La concentración de poros puede llegar a provocar la aparición de una grieta.

### 4.4.3. Inclusiones de escoria.

Estos son materiales sólidos no metálicos atrapados entre el metal de la soldadura y el metal base, se pueden encontrar en soldaduras hechas por varios tipos de proceso. Por lo general las inclusiones de escoria son el resultado de una falla en las técnicas de soldadura.

- **Inclusiones de tungsteno.** Estas son partículas de tungsteno atrapadas en el metal de la soldadura y aparecen en las soldaduras hechas en procesos de soldadura con protección de gas tungsteno. En estos procesos, un electrodo no consumible de tungsteno

es utilizado para establecer el arco de soldadura entre el electrodo y el material base a soldar.

#### **4.4.4. Falta de penetración o penetración incompleta de la junta.**

Este defecto ocurre cuando el metal de la soldadura falla al penetrar la junta. El área que no se penetra, y que por lo tanto, no se fusionó, es la discontinuidad que se describe como falta de penetración.

- **Falta de fusión o fusión incompleta**

Es el resultado de una mala técnica en la soldadura, una inapropiada preparación del material base, o un inapropiado diseño de la junta. Otras deficiencias que causan faltas de fusión incluyen la falta del calor al realizar la soldadura o la falta de acceso a todas las caras que se deben fusionar. La adhesión de óxido a la soldadura interferirá también con la adecuada fusión, aunque esto se evita aplicando a la soldadura el calor adecuado y permitiendo el acceso adecuado a todas las áreas a soldar, Zahran., *et al* (2013). Enrique., *et al* (2006).

## 5 Análisis de resultados

En este trabajo se usó un irradiador de  $^{60}\text{Co}$ , que para el momento de inicialización del estudio experimental poseía una actividad de 35 Ci. Este irradiador único en el país para este propósito hace parte del equipamiento del laboratorio de radiaciones nucleares de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Las placas radiográficas hechas a muestras de acero con espesores de 2.5, 2.0 y 1.5 cm, fueron analizadas en cada caso. La toma de estas placas se realizaron utilizando la técnica de pared sencilla, el primer cálculo se hizo basados en las ecuaciones reportadas en el código ASME sección V.

### 5.1. Procedimiento 1

Una vez explicadas y conocidas todas las variables y aplicamos la Ecuación. 4-4 para el cálculo en un espesor de 2.0 cm:

$$t = \frac{5.87 \cdot 2.870742922 \cdot (22.43268\text{cm})^2}{29677.88111\text{mCi}\cdot\text{cm}^2}$$

$$t = 17.144\text{s.}$$

Habíamos previsto que por cada patrón obtendríamos una única distancia de irradiación, se tabularon los resultados de los cálculos realizados para cada patrón en la Tabla **5-1** incluyendo el tiempo de exposición siguiendo las recomendaciones del código ASME sección V, esto con el fin de demostrar que mediante las recomendaciones del código se puede obtener una placa radiográfica de buena calidad tanto en la imagen como en densidad de película.



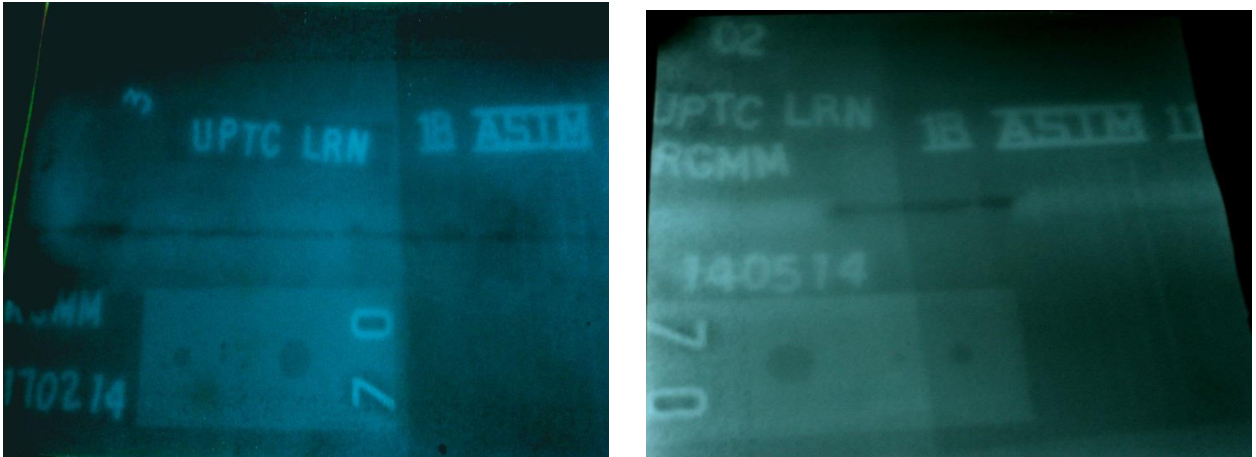
**Tabla 5-1:** Distancia y tiempos de exposición utilizando exclusivamente el código ASME sección V.

Esesor (cm)	Distancia d (cm)	Distancia $d^2(cm^2)$	Tiempo de exposición (s)
2.5	25.54	786.2416	30.9842
2.0	20.432	503.194624	17.1426
1.5	15.33	283.25	8.4716

Con las distancias y tiempos calculados, se procedió a realizar el marcado de los diferentes patrones colocando indicadores de calidad tipo hilo de lado de la película, los cuales permiten identificar cada placa luego de pasar por proceso de revelado, y además permite identificar y evaluar la calidad de la placa radiográfica.

Siguiendo los procedimientos propios del Laboratorio de Radiaciones Nucleares (LRN) se hizo el montaje que incluye la conexión del tubo guía al conducto de salida del irradiador, la colocación y nivelación del colimador que permite tener un haz direccionado y la disminución de la radiación dispersa, por último se coloca la pieza a irradiar ubicándola a las distancias calculadas, referenciadas en la Tabla 5-1. La irradiación de cada patrón se realizó bajo las mismas condiciones de temperatura, humedad, montaje, operador del telemando, operador del cronómetro, proceso de revelado con el fin de poder realizar la experiencia a las mismas condiciones. El proceso de revelado se hizo justo después de terminada la última irradiación garantizando así que la película revelada no pudiera estar sujeta a exposiciones de luz adicionales en el bunker, con esto se garantiza que lo que se ve en la imagen es justamente lo que se plasmó en la película por los fotones del irradiador únicamente.

Una vez terminado el proceso de revelado y secado de cada placa se hace uso del negatoscopio para analizar la calidad de la placa, la que una vez cumple con los estándares de calidad según los indicadores de calidad de imagen, es almacenada y digitalizada. En las Figuras 5-1 y 5-2 se presentan las placas radiografías obtenidas a estas condiciones.



**Figura 5-1:** Panel izquierdo Radiografía espesor de 2.5 cm. Panel derecho placa radiográfica espesor de 2.0 cm, distancia por código ASME sección V.



**Figura 5-2:** Placa radiográfica patrón de espesor 1.5 cm distancia por código de 15.33 cm.

## 5.2. Procedimiento 2

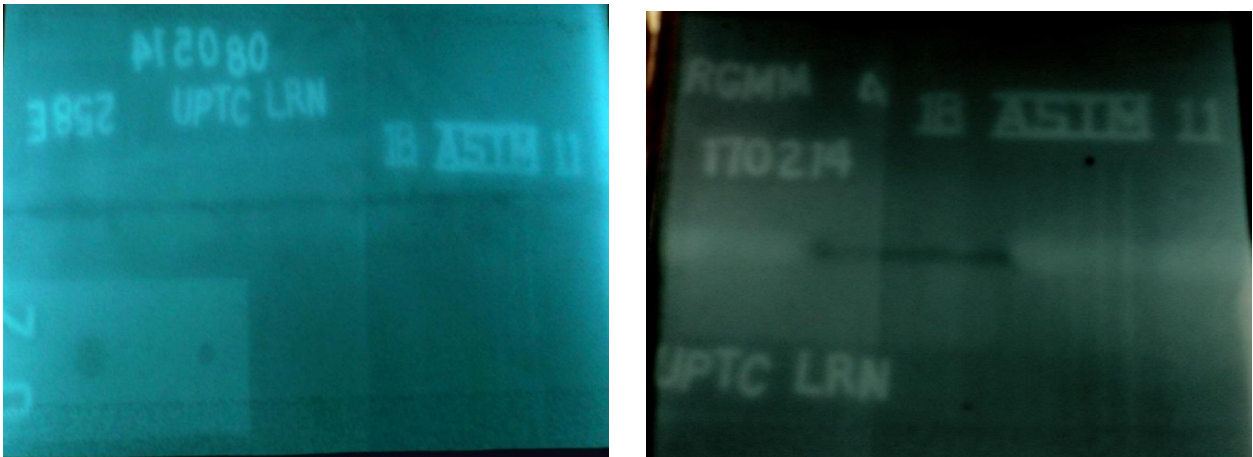
Existen diversos métodos para las tomas radiográficas, muchos de los cuales quedan restringidos a la experticia del operador. En este trabajo se trae a contexto algunos de estos métodos que aunque no están documentados en algunos casos resultan eficientes y dan buenos resultados.

Luego de corroborar el método reportado por la ASME sección V, se procedió a comprobar otro método empírico tomando placas radiográficas con distancia fuente-película ocho veces el espesor del material a inspeccionar. Esta distancia se toma a partir de experiencias de algunos expertos pero cuyo procedimiento no ha sido reportado.

Con el fin de verificar esta teoría, se calculan tiempos de irradiación directamente de la Ecuación. 4-4, para cada uno de los patrones, los resultados se reportan en la Tabla 5-2

**Tabla 5-2:** Distancia y tiempos de exposición utilizando ocho veces el espesor.

Espesor (cm)	Distancia d (cm)	Distancia $d^2(cm^2)$	Tiempo de exposición (s)
2.5	20	400	17.46
2.0	16	256	9.66
1.5	12	144	4



**Figura 5-3:** Panel izquierdo placa radiográfica espesor 2.5 cm. Panel derecho Placa radiográfica espesor 2.0 cm.

En las Figuras 5-3- 5-4, se encontró que efectivamente se obtiene una placa radiográfica de buena calidad, concluyendo que es acertado tomar 8 veces el espesor de la pieza a irradiar como distancia de irradiación.



Figura 5-4: Placa radiográfica espesor 1.5 cm.

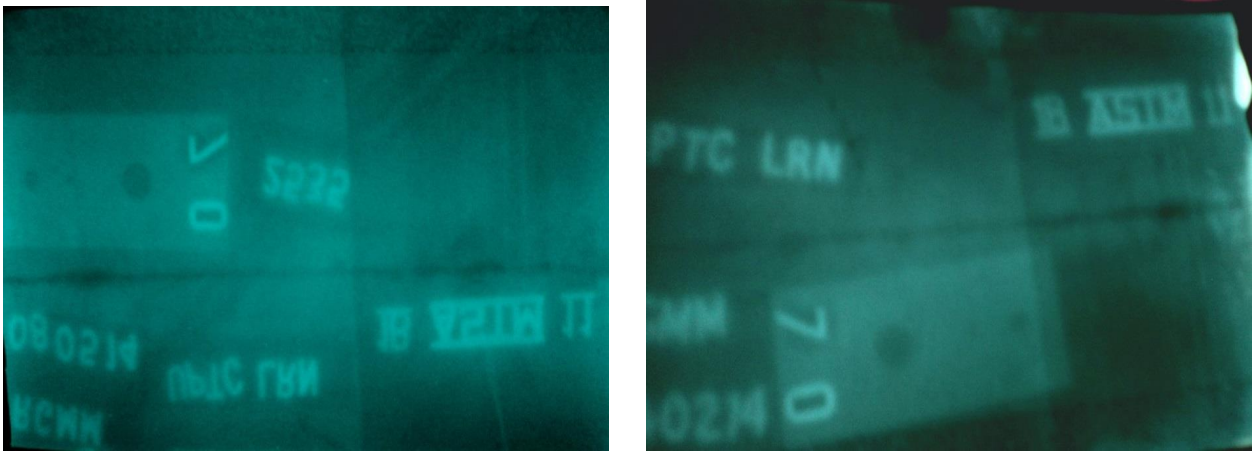
### 5.3. Procedimiento 3

Aunque son efectivas las dos técnicas, existen problemas inherentes a la posición de la fuente en sitios de difícil acceso. Por esta razón, la contribución de este trabajo consiste en hacer placas radiográficas a distancias de irradiación más cortas y más largas que las obtenidas hasta el momento por las dos métodos expuestas anteriormente para cada uno de los patrones referenciados, en la Tabla 5-3 se tabularon las distancias y tiempos de exposición tomados para éste patrón.

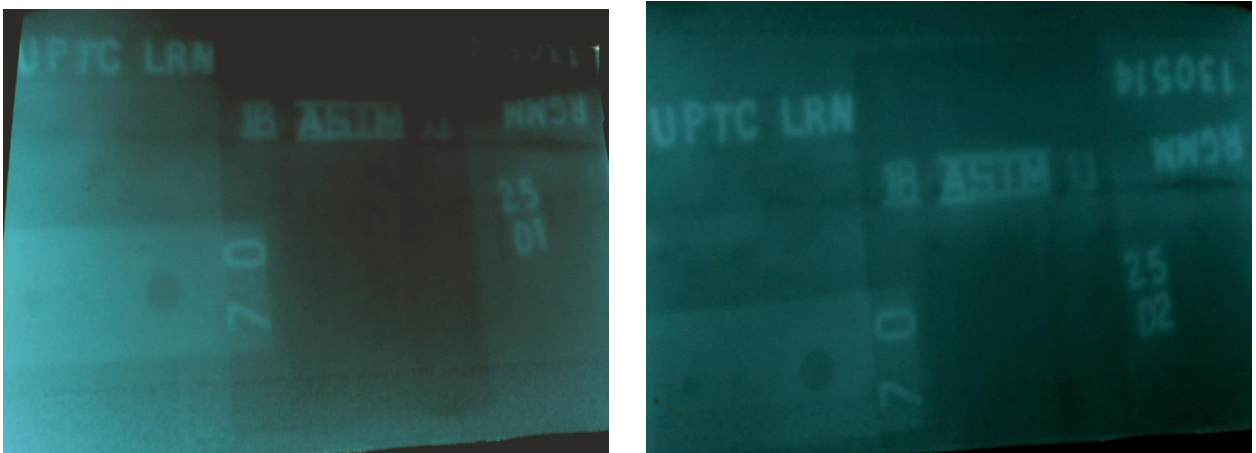
Tabla 5-3: Distancias y tiempos de exposición experimentales para un espesor de 2.5 cm.

Distancia d (cm)	Distancia $d^2(cm^2)$	Tiempo de exposición (s)
127	16129	704.21
101.6	10322.56	450.68
88.9	7903.21	345
76.2	5806.54	259.54
50.8	2580.64	113.56
28.04	786.24	34.08
25.4	645.16	28.39
20 (8 v E)	400	17.46
10	100	4.366

Las imágenes presentadas en las Figuras 5-5 y 5-6 corresponden a las placas radiográficas obtenidas para el patrón de 2.5 cm de espesor, dos placas para distancias cortas 10 cm y 25.4 cm y al final dos placas para distancias largas, 88.9 y 101.6cm.



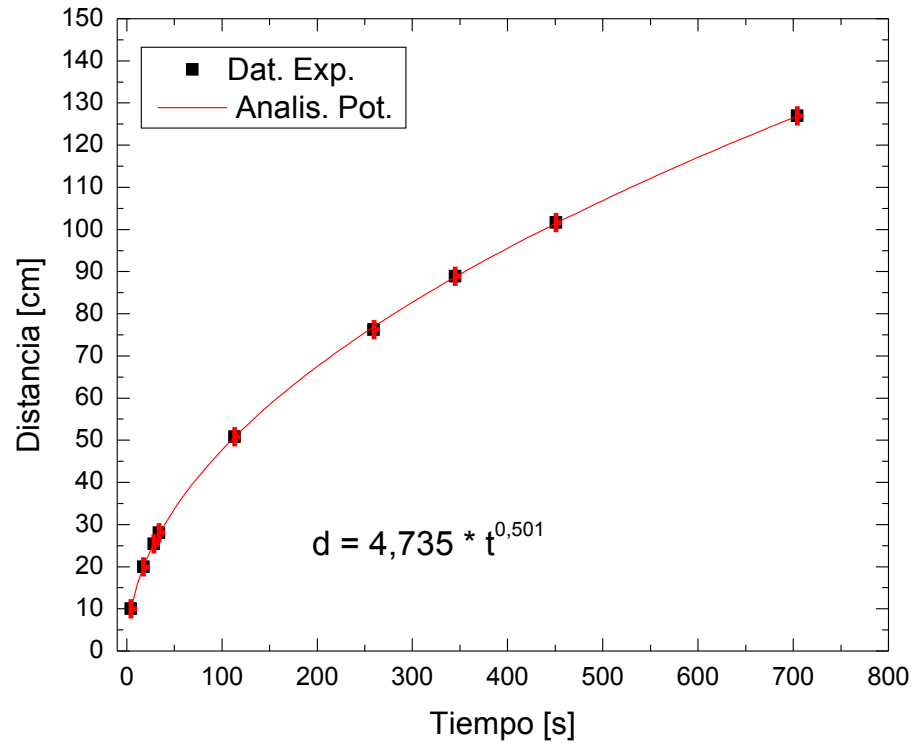
**Figura 5-5:** Panel izquierdo 25.4 cm, Panel derecho 10 cm, distancia fuente película



**Figura 5-6:** Panel izquierdo 88.9 cm Panel derecho 101.6 cm, distancia fuente película.

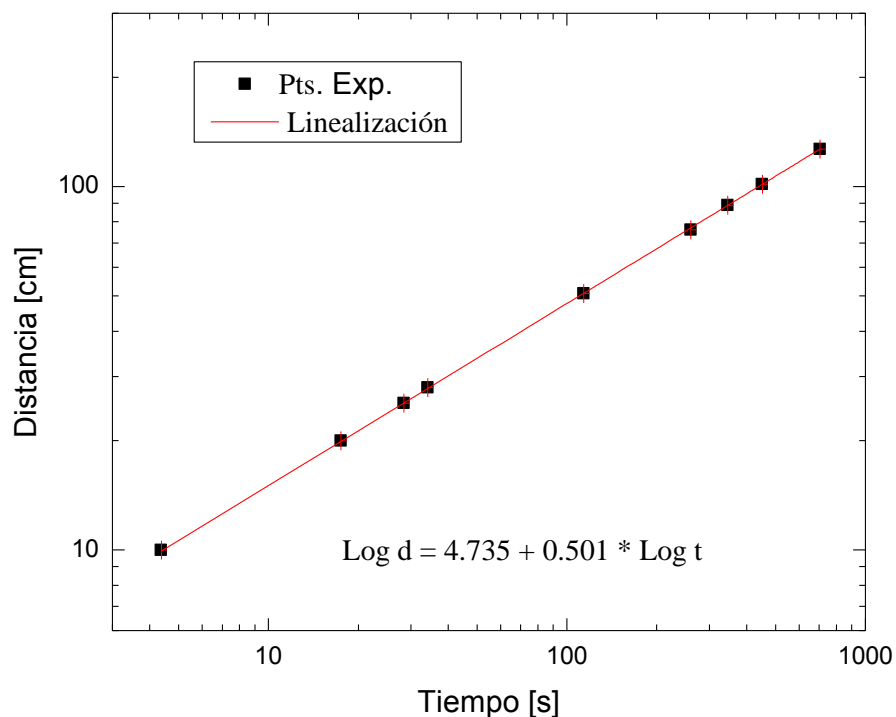
Conocida y verificada la información en la toma de las placas radiográficas, se hace un análisis de las distancias y tiempos utilizados para encontrar una relación entre las dos variables,

creando la curva característica que modela la practica Figura 5-7.



**Figura 5-7:** Curva experimental característica para un espesor de 2.5 cm.

De la Figura 5-7 luego de un ajuste potencial se obtiene la ecuación particular de distancia en función del tiempo para un espesor particular y desde luego para Co-60. Esta relación matemática no resulta practica para la interpretación en campo donde quienes realizan estas tareas son en general técnicos, por esta razón en la Figura 5-8 se presenta esta misma grafica ahora en escala logarítmica. Curvas de esta mismo tipo son ampliamente utilizadas en radiografía industrial, particularmente con Rayos X.



**Figura 5-8:** Linealización de la curva característica experimental para el patrón de 2.5 cm de espesor con  $^{60}\text{Co}$ .

Esta recta permitió demostrar experimentalmente que es posible irradiar una pieza del mismo espesor a cualquier distancia, aunque cualquier distancia no es cierta ya que existe una distancia mínima, que está determinada por el tiempo de exposición. Para el patrón de 2.5 cm de espesor será superior los 5 cm pero aun esta distancia aunque teóricamente sea posible experimentalmente no lo es, ya que su tiempo de exposición será demasiado corto y si tenemos en cuenta que el exponer y resguardar la fuente tarda en promedio cinco segundos, no se lograría obtener una placa radiográfica de buena calidad. Se estipula para el patrón de 2.5 cm de espesor una distancia mínima de irradiación 10 cm de distancia entre la fuente y la película, basados en la grafica anterior.

Haciendo uso de esta recta para este patrón, es posible variar las distancias de irradiación y conseguir buenos resultados en este tipo de ensayo no destructivo. Se obtiene de la recta la distancia mínima  $d$  a la que puede ser expuesta la pieza, este aspecto importante con el fin

de mantener los límites de dosis y disminuir al máximo los efectos estocásticos producidos por la radiación ionizante.

### 5.3.1. Patrón 2.0 cm de espesor

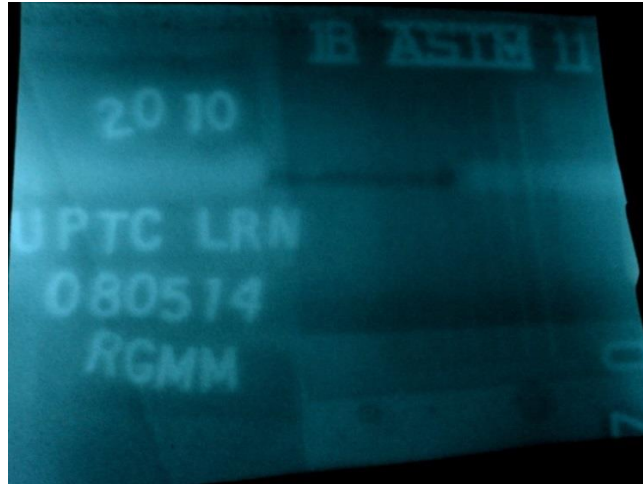
Una vez concluido el proceso para dicho patrón se procedió a reproducir el procedimiento para el patrón de 2.0 cm de espesor. En la Tabla 5-4 podemos verificar las distancias y tiempos calculados para tal proceso nuevamente se realizó un ajuste al tiempo obtenido.

**Tabla 5-4:** Distancias y tiempo de exposición para espesor de 2.0 cm.

Distancia d (cm)	Distancia $d^2(cm^2)$	Tiempo de exposición (s)
16129	127	608.88
10322.56	101.6	389.69
7903.21	88.9	298.35
5806.44	76.2	224.41
2580.64	50.8	98.19
645.16	25.4	24.55
503.11	22.4	18.85
256	16	9.66
100	10	3.77

En la Tabla 5-4 se incluyeron los tiempos de exposición tomados directamente de la curva, en las siguientes figuras mostraremos las placas radiográficas representativas de la experiencia. Para distancias cortas la placa mostrada en las Figura 5-9 corresponden a distancia de 10 cm con un tiempo de exposición de 3.77 s, un tiempo corto y muy difícil de aplicar lo cual con los resultados obtenidos se convierte en un aporte mas para el trabajo ya que lograr placas de buena calidad con tiempos de exposición tan cortos resulta efectivamente bueno en protección radiológica y eficiencia para el laboratorio. Si observamos bien en la imagen se observan cinco de los seis hilos lo cual le da una calificación de A1 que es la mejor calidad de imagen según el código ASME sección V.





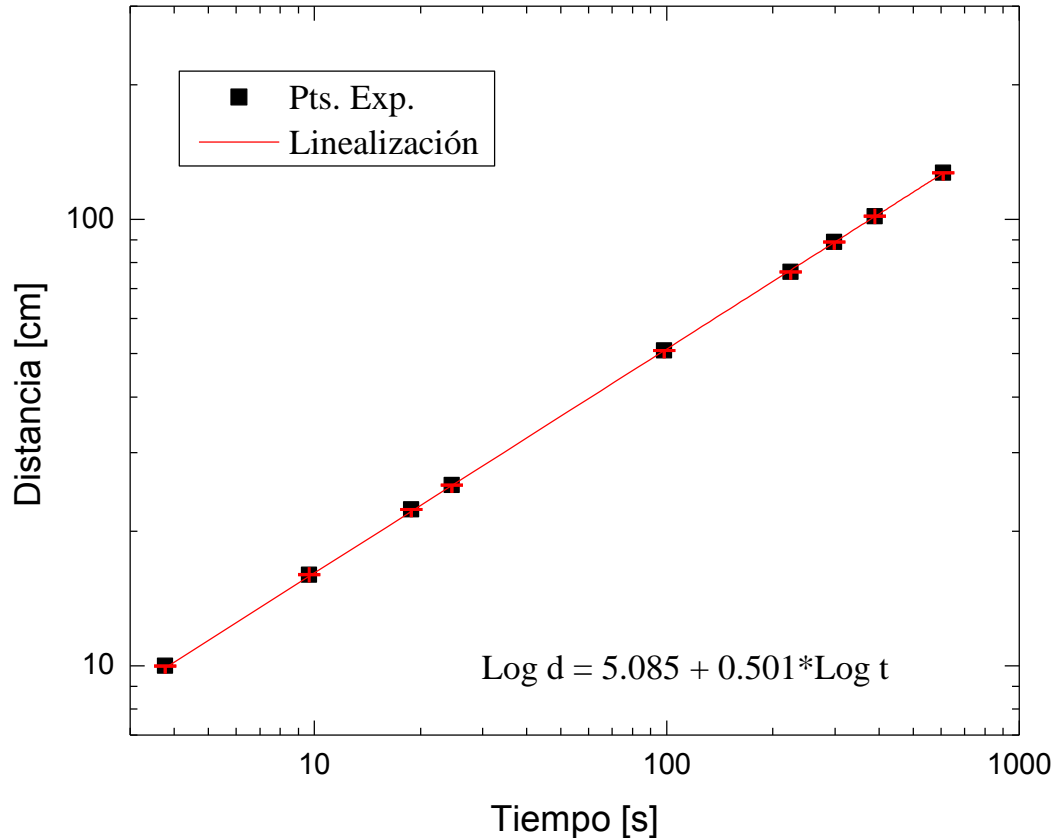
**Figura 5-9:** Placa espesor 2.0 c distancia de irradiación 10 cm.

A distancias más largas, a la distancia obtenida por el código Figura 5-1, panel derecho el comportamiento es el mismo, mejora la calidad y densidad de la imagen visualmente pero se observan menos hilos lo cual le daría una calificación de A2, que sigue siendo una buena calidad de imagen.



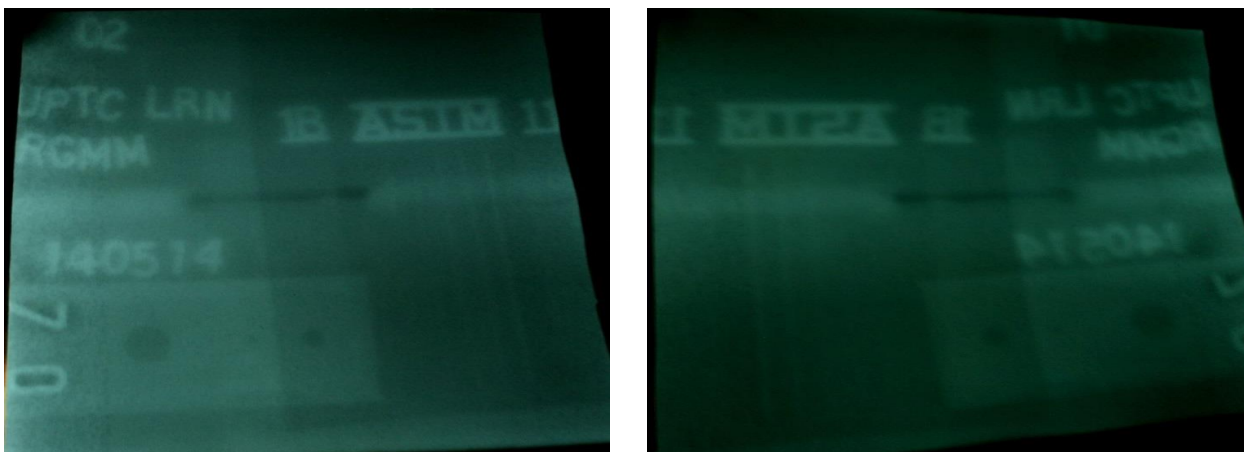
**Figura 5-10:** Placa espesor 2.0 cm distancia de irradiación 88.9 cm.

Las distancias y tiempos calculados se analizaron en la Figura 5-11, obteniendo al igual que en caso anterior, una expresión matemática para el cálculo de tiempos de exposición a cualquier distancia.



**Figura 5-11:** Curva linealizada espesor 2.0 cm datos experimentales.

Para comprobar que la curva obtenida puede ser reproducible en cualquiera de sus puntos se tomaron dos distancias de irradiación aleatorias y se tomaron las placas radiográficas exactamente con los tiempos que arroja la curva las imágenes correspondientes a dichas placas fueron digitalizadas y corresponden a la Figura 5-12.



**Figura 5-12:** Panel izquierdo placa prueba espesor 2.0 cm distancia de irradiación 23.45 cm. Panel derecho placa prueba espesor 2.0 cm distancia de irradiación 76.2 cm.

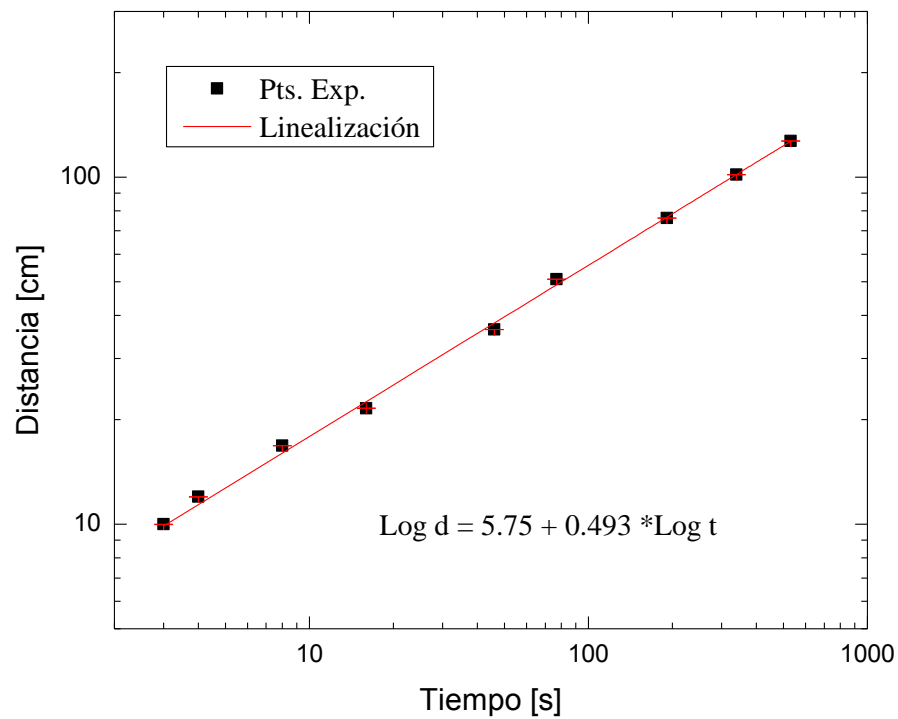
En comparación con la curva linealizada para el espesor de 2.5 cm su comportamiento es el mismo, la distancia mínima es un poco mayor que en el patrón de 2.5 cm ya que los fotones gamma emitidos desde la fuente atravesaron en este caso un espesor menor, impactan la película con mayor energía y además un mayor número de fotones impactaran la película por lo que se necesita una mayor distancia y mayores tiempos de irradiación.

### 5.3.2. Patrón 1.5 cm de espesor

El tercer y último espesor estudiado en pared sencilla es de 1.5 cm. En la Figura 5-13, se muestra la ecuación matemática obtenida y en las Figuras 5-14, se muestran las películas radiográficas obtenidas, una vez más con las características de calidad requeridas. Siguiendo en el proceso se determinó las mismas distancias y tiempos de exposición que para el caso del patrón de 2.0 cm las cuales se reportan en la Tabla 5-5, desde los 10 cm hasta las 127 cm.

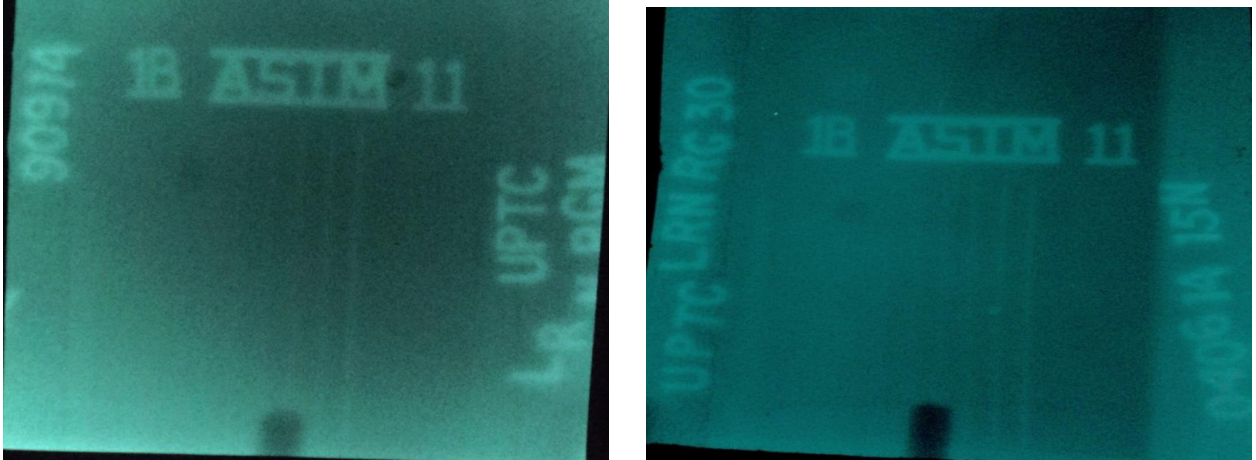
**Tabla 5-5:** Distancia y tiempos de exposición espesor 1.5 cm.

Distancia d (cm)	Tiempo de exposición (s)
10	3
12	4
16.85	8
50.8	77
76.2	191
101.6	339.6
127	530.6
21.58	16
36.4	46

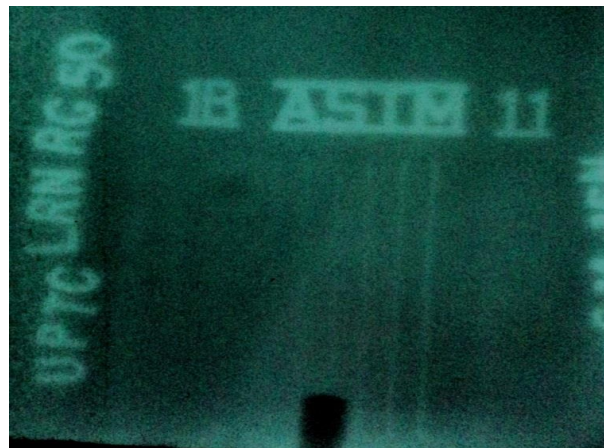
**Figura 5-13:** Linealización de la curva experimental espesor 1.5 cm.

Para cada punto de la Figura 5-13, se obtuvo una radiografía de buena calidad. En las Figuras 5-15 están relacionadas las radiografías más representativas de la experiencia todas

muestran cuatro hilos lo cual proporciona una calidad óptima.



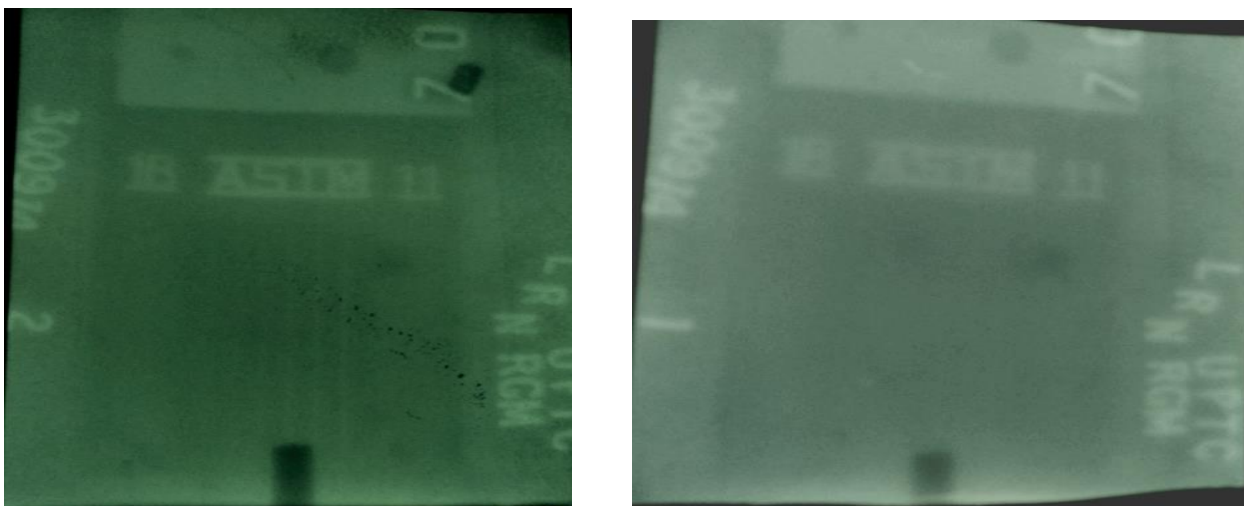
**Figura 5-14:** Panel izquierdo distancia de irradiación 10 cm. Panel derecho distancia de irradiación 76.2, patrón 1.5 cm.



**Figura 5-15:** Distancia e irradiación 127 cm, espesor 1.5 cm.

Ya graficada la curva y linealizada se procedió a comprobarla tomando como en los dos patrones anteriores dos distancias con sus respectivos tiempos de irradiación de forma aleatoria, las placas que corresponde a la Figura 5-16. En ellas se observa que poseen, al igual

que las anteriores características de calidad de imagen.



**Figura 5-16:** Panel izquierdo y Panel derecho Patrón 1.5 cm placas prueba.

Las distancias y tiempos escogidos al azar se incluyeron en la gráfica de tal forma que podemos verificarlo en la tabla 5-5 y grafica 5-13 como dos puntos sobresalientes en la curva final.

#### 5.4. Técnica de doble pared

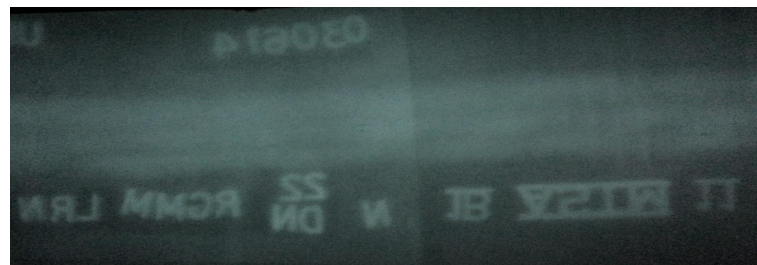
El procedimiento seguido en los patrones estudiados anteriormente resulta sencillo si se compara con los END a piezas como tubos en los que la radiación hace doble interacción con las paredes del mismo. La técnica de pared doble vista simple (PDVS), es la escogida para este trabajo ya que resulta mas tedioso analizar las placas segun lo estipulado por el código ASME sección V. Para tal propósito se utilizó un procedimiento similar al realizado para pared sencilla, se calculó la distancia de irradiación de tres formas distintas: tomando solo una pared, es decir, haciendo el cálculo para los dos espesores que el haz atraviesa como si fuese uno solo, esto tomando en cuenta que el diámetro del tubo no es lo suficientemente grande como para que afecte la intensidad del haz en una forma considerable. La otra forma

realizando el cálculo para una sola cara del tubo y el último método tomando las dos caras del tubo por separado y luego se realizó un promedio entre los dos datos de distancia y tiempo de irradiación promedio de la pieza. En la Figura 5-17, la imagen corresponde a la irradiación que se hizo tomando las paredes del tubo como si fuese una sola y se observan los defectos del mismo, como son los tres cordones de soldadura así como las dos raíces del tubo.

En la Figura 5-18 la distancia de irradiación fue la promedio La placa presenta poca densidad y la calidad óptica no es buena lo que significa que esta placa no pasa los controles de calidad, por esta razón no se decidió tomar el espesor del tubo como si fuese un solo espesor para realizar los cálculos de irradiación.



**Figura 5-17:** PDVS tubo 1.1 cm, un solo espesor.



**Figura 5-18:** PDVS tubo 1.1 cm, dos espesores (2.2 cm).

Una vez se encontró una placa de calidad óptima en densidad y calidad óptica Figuras 5-17 y 5-18, se procedió a realizar cálculos de distancia y tiempo usando el método de pared

sencilla, tomando distancias entre 10 cm y los 127 cm. Con el propósito de poder generar una curva de irradiación característica para este espesor en un tubo. Los datos de distancia y tiempo de irradiación escogidos para obtener la curva característica en la técnica de pared doble vista simple (PDVS) se muestran en la Tabla **5-6**, también se incluyeron los datos de los tiempos junto con las distancias tomados de la curva los cuales llamaremos prueba para poder afirmar que la curva en realidad es útil y reproducible.

**Tabla 5-6:** Datos Experimentales Tubo 2.2 cm de Espesor.

<i>Distancia</i> <sup>2</sup> ( <i>cm</i> <sup>2</sup> )	Distancia <i>d</i> (cm)	Tiempo de exposición (s)
16129	127	735.93
10322.56	101.6	470.99
5806.44	76.2	264.93
2580.64	50.8	117.749
645.16	25.4	29
608.61	24.67	28
1241.85	35.24	57
4221.11	64.96	193

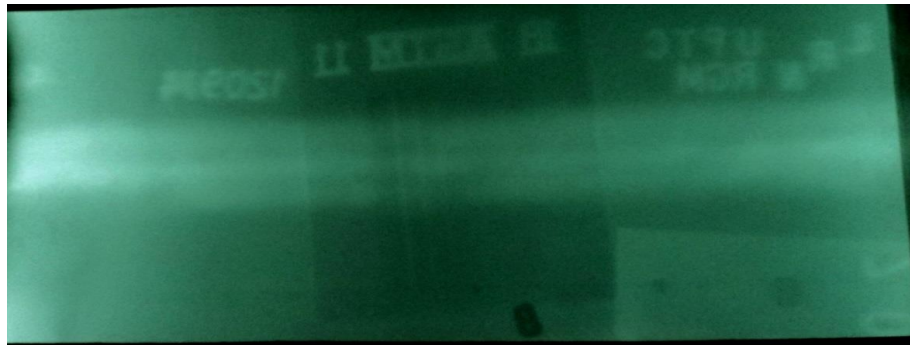
Las placas experimentales que se obtuvieron tanto para distancias largas como cortas se muestran las Figuras **5-19** - **5-23**, en las cuales las dos primeras **5-19** y **5-20** corresponden a distancias largas  $d > 1m$ , en estas se observan los tres cordones de soldadura separados por dos matrices, como era de esperarse, los cordones se muestran un poco mas gruesos debido a la superposición de los cordones pegados a la placa.

En las siguientes tres Figuras **5-21** - **5-23** se tomaron con distancias  $d < 1m$ , con tal éxito que se reprodujo la calidad de la placa, así mismo se determinó que efectivamente existe retro dispersión denotado por la letra B que se observa en las placas, de la radiación, la que no es posible eliminar.

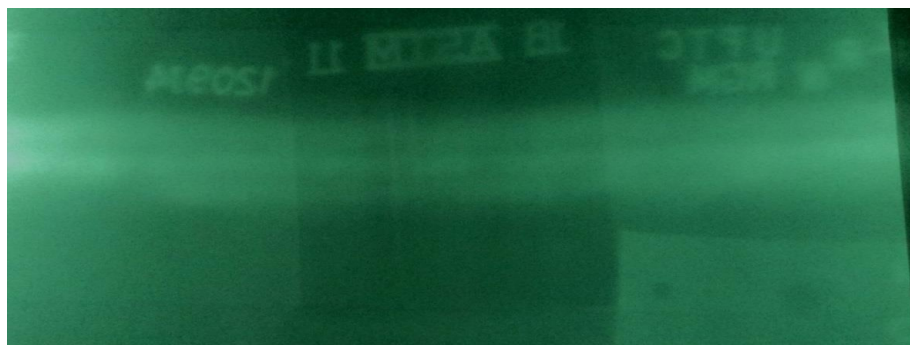




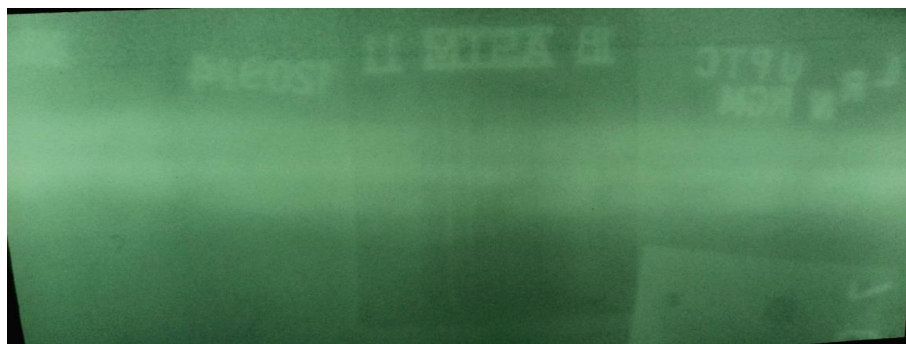
**Figura 5-19:** PDVS tubo 2.2 cm, DFP 127 cm.



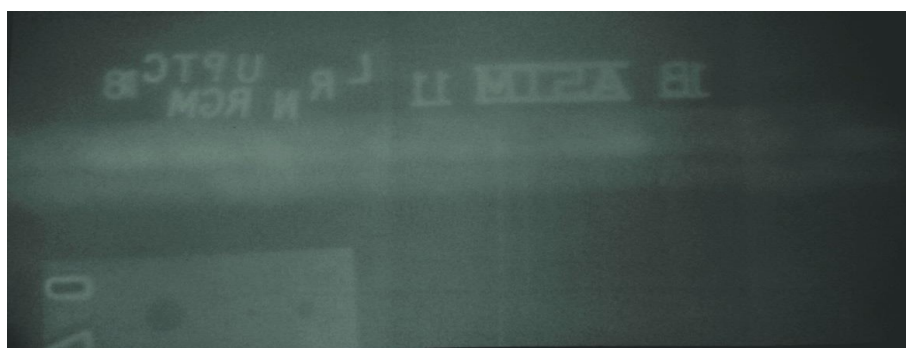
**Figura 5-20:** PDVS tubo 2.2 cm DFP 101.6 cm



**Figura 5-21:** PDVS tubo 2.2 cm DFP 76.2 cm.



**Figura 5-22:** PDVS tubo 2.2 cm DFP 50.8 cm.



**Figura 5-23:** PDVS tubo 2.2 cm DFP 25.4 cm.

Obtenidas las placas radiográficas se graficaron los datos de distancia de radiación en función del tiempo de radiación, obteniendo una curva característica de este espesor Figura 5-24. Todos los datos se encuentran dentro de la recta por lo que nos permite tomar dos distancias con sus respectivos tiempos de irradiación para comprobar la veracidad y confiabilidad de la curva y obtener las placas radiográficas que nos permitan comprobar experimentalmente nuestros resultados.

De la Figura 5-24 se tomaron dos distancias aleatorias sobre la recta las cuales para el caso del tubo fueron 21.58 cm y 36.4 cm con sus respectivos tiempos de radiación y que se reportan en la Tabla 22 en los dos últimos datos (parte inferior), luego se prepararon y se irradiaron las

placas haciendo uso del irradiador cuyos resultados se muestran en las Figuras 5-25 y 5-26.

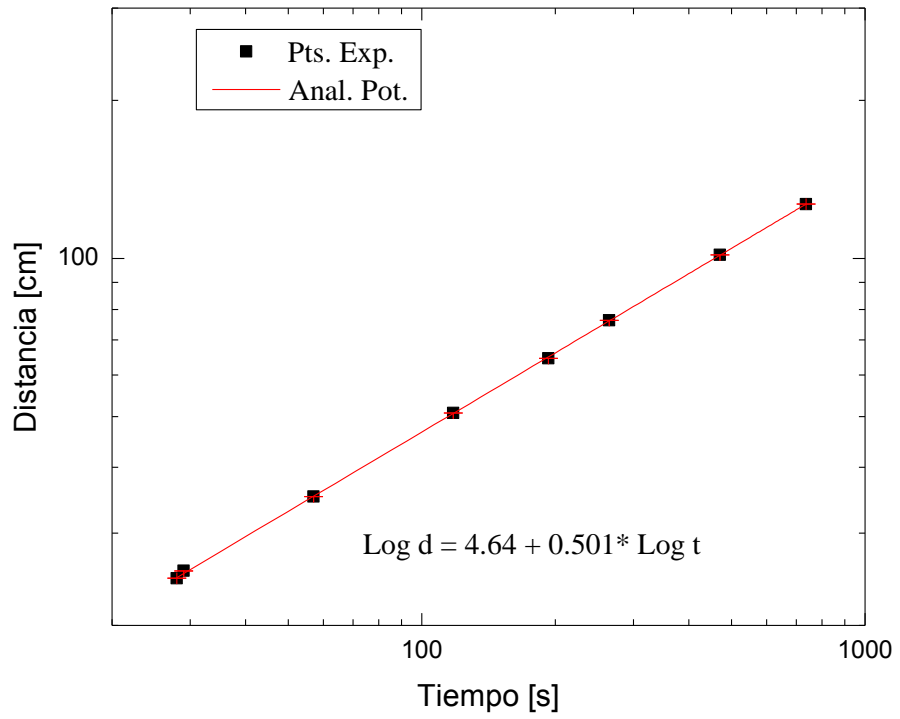


Figura 5-24: Curva experimental tubo 2.2 cm.



Figura 5-25: Placa prueba tubo 2.2 cm DFP 21.58 cm.



**Figura 5-26:** Placa prueba tubo 2.2 cm DFP 36.4 cm.

De esta forma la curva característica probada experimentalmente donde los dos puntos centrales corresponden a los dos tiempos y distancias que se tomaron al azar.

## 6 Conclusiones

- Se demostró experimentalmente que es posible tomar una placa radiográfica con calidad óptica y densidad de película que se encuentra dentro de los estándares de calidad dados por el código ASME sección V a diversas distancias.
- Mediante el método expuesto, es posible determinar la distancia mínima de ubicación de la pieza a partir de la recta de irradiación en cada caso.
- Se demuestra experimentalmente que la relación que existe entre la distancia y el tiempo de irradiación, coincide con lo predicho por la teoría, la conocida relación de la distancia al cuadrado.
- La técnica de pared doble con vista simple (PDVS) resulta una técnica práctica al inspeccionar tuberías que no pueden ser manipuladas y cuyos END deben hacerse insitu.
- Aunque la técnica (PDVS) fue tediosa al momento de utilizarla se obtuvo una curva característica de distancia en función del tiempo de irradiación con la que es posible obtener obteniendo una placa radiográfica aceptada por los estándares de calidad del código (ASME sección V).

# Bibliografía

- [1] Applications 9th ECNDT, Berlin, 25-29 Sept. 2006. Proceedings CD, NDT. Net. Publications <http://www.ndt.net/article/eendt2006/Th3.2.1pdf>.
- [2] API standar1104.American Petroleum Institute. Welding of Pipelines and Related Facilities. 19c Editions, (1999).
- [3] ASTM A36M-04. American Society for Testing and Materials Standard. Specification for carbon structural steel. USA,(2004).
- [4] ASTM E124-92. American Society for Testing and Materials Standard. Method for Controlling Quality of Radiographic Testing. USA, (2000).
- [5] ASME V. Boiler and Pressure Vessel Code. American Society of Mechanical Engineers New York. (2013).
- [6] AWS B1.10 American Welding Society. Guide for the Nondetructive Inspection of Welds (Supersedes AWS B1.0-77). United Estates, (2000).
- [7] Barnea G & Dick C.G. Coupled Electron- Photon Monte Carlo Calculations of X Ray Scattering eith Application tio Industrial Radiography . NDT International: 20:111-115, (1998).
- [8] Bavendiek K., Heike U., Meade W.D., Zscherpel U. & Ewert. New Digital Radiography Proce7ure Exceeds Film Sensitivity Considerably in Aerospace.
- [9] Browne E. BNM- CEA/ LNHB, Table of Radionucleidos,  $^{192}_{77}Ir_{115}$ . 30/06/1998-9/12/2003.

- [10] Bulubay U & Tugraul A.B. Cuantitative Evaluation of Intensifying Screen Materials in Co-60 Radiography for Steel Parts. NDT &International, pag. 193-199, (1998).
- [11] CR-Standards., CEN EN 174874., ASTM E 2033., E 2445., E2446.
- [12] Didactic L.D. GmbH Layboldstrasse 1D-500354 Huerth.Alemania.
- [13] Daniel F.G. Manual de Radiografía Industrial con Rayos X y Gamma. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Tunja, (2010).
- [14] Edaliti K., Rokrok K., Kermani B., Seoiedi A., Movafeghi M & Shahandeh A. Scattering and Image Contrast Simulation for Double Wall Radiography of Pipes International Journal of Pressure Vessel and Piping. Vol. 84, pag. 441-45. (2007).
- [15] Enrique Alberto Gálvez Argueta. Determinación del tiempo de exposición para películas radiográficas, utilizadas en ensayos realizados en sistemas de tubería llena de petróleo o sus derivados. Universidad de San Carlos de Guatemala, facultad de ingeniería escuela de ingeniería mecánica. Guatemala, Octubre de (2006).
- [16] Evan R.D. Brad beam attenuation; Mc. Graw Hill Book company(2006).
- [17] Ewert U., Zscherpel U., Heyne K., Jechow M. & Bavendick K. Image Quality in Digital Industrial Radiography . Mater . Eval: 7(8), 955-964 (ISSN 0025 5327).
- [18] Ewert U., Jaenisch G-R., Zscherpel U., Osterloh K & Redmer B. Material Forchung Und-Profung, Unter den Eichen 87,12205, Berlin, Germany.
- [19] Fujifilm Technical Hand book. Fundamentals of Industrial Radiography: 7-3, Akasaka 9 Chome, Minatoky, Tokyo 10-0052 Japan, Pag.4-30, (2005-9).
- [20] Helmer R.G & Chechw V.P. LNE-LNAB/CEA Table of Radionucléides,  $^{137}_{55}\text{Cs}_{32}$  &  $^{60}_{27}\text{Co}_{33}$ . 04/02/1998 - 11/12/2007.
- [21] Hernández M.O., Duran H.O., Acuña E.M. & Castillo H.R. Medición y comparación del coeficiente de atenuación lineal en líquidos. Revista Investigación científica. Vol. 4. Agosto, (2008).

- 
- [22] Kasban H., Zahran O., Arafa H & El-Kordy M. Elaraby Sayed MS Abd El-Samie FE. Welding Defect Detection from Radiographic Image Using Cepstral Approach. *NDT E Int*; 44(2):226-3, (2011).
- [23] Melgarejo M.I., Pineda Y., Martínez S. A., J. & Aponte Y. Quality of Gamma and X Ray Inspections for Low Dimensional Parts. *Journal of Nondestructive Evaluation*: (DOI) 10.1007/s192-013-0220-x, (2014).
- [24] OIEA TS-R-1. Organismo Internacional de Energía Atómica. Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos, (2009).
- [25] Panaitescu L. Assessing the Quality of a Radiographic Image. *Materials Evaluation*: 2(9)7:153-158, (1971).
- [26] Silva D., Romeu R., Siquiera HS., Viera M.O., Rebello J., Calowidehatb MA. & Luiz P. Estimated Accuracy of Classification of Defects Detected in Welded Joints by Radiography Tests. *NDT E Int*: 38:335-43, (2005).
- [27] Wang G. & Liao TW. Automatic Identification of Different Types of Welding Defects in Radiography Images, *NDT and E int* (2002).
- [28] Zahara O., Kasban H., El Kordy M & El Samie F.E.A. Automatic Weld Defect-Identification from Radiography Images, *NDT and E International*, Res. 57 pag. 26-35, (2013).
- [29] Torres M., Torres B & Montañez J. Radiografía industria X y gamma. Instituto de asuntos nucleares , Aplicaciones industriales y metalurgia. Bogotá, (1984).
- [30] Zahara O. & Al-Nuaimy W. Recent Development in Ultrasonic Techniques for Rail Track Inspection. In : proceedings of NDT Conference, Uk; pag. 22-60, (2002).