



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica**

**MANUAL DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE  
RAYOS X MEDIANTE LA MEDICIÓN DE RADIACIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA**

**Edwin Roberto Castro Hurtarte**

**Asesorado por**

**Lic. Ángel René Osorio Tercero  
Ing. Otto Fernando Andrino González**

**Guatemala, enero de 2004**



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE RAYOS X MEDIANTE LA  
MEDICIÓN DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDWIN ROBERTO CASTRO HURTARTE**

ASESORADO POR

Lic. Ángel René Osorio Tercero  
Ing. Otto Fernando Andrino González

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

Guatemala, enero de 2004

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing.	Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing.	Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic.	Amahán Sánchez Alvarez
VICAL III	Ing.	Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br.	Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br.	Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing.	Pedro Antonio Aguilar Polanco

**TRUBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing.	Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing.	José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing.	Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing.	Otto Fernando Andrino González
SECRETARIO	Ing.	Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **MANUAL DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE RAYOS X MEDIANTE LA MEDICIÓN DE RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA**

Tema que fuera asignado por la dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica- Eléctrica con fecha del 03 de mayo del 2003.

**Edwin Roberto Castro Hurtarte**

## **Acto que dedico**

### **A Jesucristo**

Por haberme otorgado la vida y ser quien guíe mi camino durante mi existencia.

### **A mis padres**

Lourdes Maribel Hurtarte de Castro y Edwin Guillermo Castro Pineda por su amor, paciencia y consejos durante toda mi vida para que este logro suyo se haga realidad.

### **A mi hermano**

Mario Guillermo Castro Hurtarte por haber compartido tantos momentos juntos y haberlos hecho especiales.

### **A mis abuelitos**

Argelia (†) y Jesús Castro (†), Isabel y Mario Hurtarte, por ser gran inspiración en mi vida y ejemplo de trabajo y amor.

### **A mis amigos**

Con los cuales pude compartir durante mi carrera universitaria. Y muy especialmente a Ana Gabriela de Paz por su cariño y comprensión.

## **Trabajo de graduación que dedico**

### **A mi país, Guatemala**

El cual necesita de nuestro esfuerzo y dedicación como profesionales.

### **A la Universidad de San Carlos de Guatemala**

Que por medio de la Facultad de Ingeniería me permitió realizar este logro.

### **A mi asesor y amigo**

Ángel René Osorio Tercero por su gran ayuda y apoyo en esta tesis.

### **Al Ministerio de Energía y Minas**

Que por medio de la Dirección General de Energía y su personal me permitió desarrollar mi trabajo de campo.

### **A mis catedráticos**

Por ser las personas de las cuales pude aprender y obtener los conocimientos para terminar mi carrera.

### **A futuros ingenieros**

Para motivarlos y ayudarlos en su vida universitaria.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VI
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO.....	X
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	XV

1. LOS RAYOS X	1
1.1. Historia y origen.....	1
1.2. Clasificación de los rayos X.....	2
1.2.1. Radiación Ionizante.....	4
1.2.2. Radiación no Ionizante.....	5
1.3. Generación de los rayos X.....	6
1.3.1. El espectro de rayos X.....	6
1.3.2. El tubo de rayos X.....	8
1.3.2.1. El cátodo.....	9
1.3.2.2. Aceleración de los electrones.....	10
1.3.2.3. El ánodo.....	11
1.3.2.3.1. Tipos de ánodos.....	12
1.3.2.4. El punto focal.....	15
1.3.2.5. Efecto Talón.....	16



1.3.3.	Operación del tubo de rayos X.....	17
1.4.	Medidas de la Radiación.....	18
1.5.	Aplicación de los rayos X.....	19
1.5.1.	Aplicaciones industriales.....	19
1.5.1.1.	Determinación de impurezas en agua.....	20
1.5.1.2.	Determinación de azufre y metales pesados en aceite crudo y derivados del petróleo.....	20
1.5.1.3.	Determinación de contaminación radiactiva en alimentos.....	21
1.5.2.	Otras aplicaciones.....	22
1.5.3.	Aplicación en la medicina.....	22

## 2. EQUIPOS DETECTORES DE RADIACIÓN 23

2.1.	Energía e intensidad de las radiaciones ionizantes.....	23
2.2.	Medida de energía de un haz.....	23
2.2.1.	Espectrometría.....	23
2.2.1.1.	Espectrometría de partículas cargadas.....	24
2.2.1.2.	Espectrometría de fotones.....	25
2.3.	Medida de la intensidad de un haz.....	26
2.3.1.	Detectores por ionización o inmediatos.....	27
2.3.1.1.	Cámara de ionización.....	30
2.3.1.2.	Contador proporcional.....	32
2.3.1.3.	Geiger-Müller.....	33
2.3.2.	Detectores por excitación.....	36
2.3.2.1.	Inmediatos.....	36
2.3.2.2.	Retardados.....	36

3.	NORMA ISO 4037	39
3.1.	Definiciones básicas y conceptos generales.....	40
3.1.1.	Energía media, E.....	40
3.1.2.	Resolución espectral, $R_e$ .....	40
3.1.3.	Capa hemirreductora, CHR o <i>Half Value Layer, HVL</i> ..	40
3.1.4.	Coeficiente de homogeneidad, h.....	41
3.1.5.	Calidad de la radiación de referencia.....	41
3.1.6.	Tipos de radiación de referencia.....	42
3.2.	Condiciones para la radicación de referencia.....	45
3.2.1.	Características de la unidad de rayos X.....	45
3.2.2.	La filtración.....	46
3.2.2.1.	La filtración fija.....	46
3.2.2.2.	La filtración adicional.....	47
3.3.	Método para establecer la radiación de referencia.....	47
3.3.1.	Medición de la capas hemirreductoras CHR o <i>HVL</i> .....	47
3.3.1.1.	Equipo necesario.....	48
3.3.1.2.	Procedimiento de medición.....	48
3.3.1.3.	Interpretación de los resultados.....	48
4.	MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO DE RAYOS X	49
4.1.	Determinación de la calidad de los rayos X.....	50
4.1.2.	Procedimiento experimental.....	51
4.1.2.1.	Equipo necesario.....	51

4.1.2.2.	Medición de la filtración inherente.....	51
4.1.2.3.	Determinación de las capas hemirreductoras	52
4.2.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo.....	53
4.2.1.	Procedimiento experimental.....	53
4.3.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia.....	54
4.3.1.	Procedimiento experimental.....	54
4.4.	Comprobación del campo de radiación.....	55
4.4.1.	Procedimiento experimental para la determinación del perfil horizontal.....	55
4.4.2.	Procedimiento experimental para la determinación del perfil vertical.....	56

## 5. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO DE RAYOS X 57

5.1.	Determinación de la filtración inherente del equipo.....	57
5.2.	Determinación de la capa hemirreductora o <i>HVL</i> .....	58
5.3.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo.....	63
5.4.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia.....	67
5.5.	Comprobación del campo de radiación.....	72
5.5.1.	Perfil horizontal.....	72
5.5.2.	Perfil vertical.....	73
5.6.	<i>Kerma</i> en función de la corriente del tubo y de la distancia fuente-detector.....	80
5.7.	Posibles errores en la calibración del equipo de rayos X.....	81
5.7.1.	Precisión y exactitud.....	81
5.7.2.	Corrimiento del cero.....	82
5.7.3.	El kilo-voltaje aplicado al tubo.....	83

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>84</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>85</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>86</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	El Espectro electromagnético	3
2.	Representación gráfica de la penetrabilidad de los rayos alfa, rayos beta, rayos X, rayos gamma y neutrones	5
3.	Gráfica de un espectro de rayos X	6
4.	Circuito eléctrico de un tubo de rayos X	9
5.	Representación física del ánodo fijo	13
6.	Representación física del ánodo rotatorio	13
7.	Principio de línea focal utilizado en un tubo de rayos X	15
8.	Disminución de la intensidad debida al efecto Talón	16
9.	Diagrama físico de un tubo de rayos X	18
10.	Respuesta de un espectrómetro	25
11.	Las tres diferentes regiones de operación de los detectores por ionización	29
12.	Esquema de la cámara de ionización	30
13.	Configuración de los electrodos para detectar el impulso de la cámara de ionización antes de enviarla al amplificador	32
14.	Diagrama de un contador de Geiger- Müller	34
15.	Determinación de la filtración inherente al equipo de rayos X	58
16.	Medición de la capa hemirreductora calidad N-40	59
17.	Medición de la capa hemirreductora calidad N-60	59
18.	Medición de la capa hemirreductora calidad N-80	60
19.	Medición de la capa hemirreductora calidad N-100	60

20.	Medición de la capa hemirreductora calidad N-120	61
21.	Medición de la capa hemirreductora calidad N-150	61
22.	Medición de la capa hemirreductora calidad N-200	62
23.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo calidad N-40	63
24.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo calidad N-60	64
25.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo calidad N-80	64
26.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo calidad N-100	65
27.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo calidad N-120	65
28.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo calidad N-150	66
29.	Medición de la tasa de <i>Kerma</i> con la corriente del tubo calidad N-200	66
30.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia a 40kV	68
31.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia a 60kV	68
32.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia a 80kV	69
33.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia a 100kV	69
34.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia a 120kV	70
35.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia a 150kV	70
36.	Dependencia de la tasa de <i>Kerma</i> respecto a la distancia a 200kV	71
37.	Medición del perfil horizontal a 40kV	73
38.	Medición del perfil vertical a 40kV	74
39.	Medición del perfil horizontal a 60kV	74
40.	Medición del perfil vertical a 60kV	75
41.	Medición del perfil horizontal a 80kV	75
42.	Medición del perfil vertical a 80kV	76
43.	Medición del perfil horizontal a 100kV	76
44.	Medición del perfil vertical a 100kV	77
45.	Medición del perfil horizontal a 120kV	77
46.	Medición del perfil vertical a 120kV	78
47.	Medición del perfil horizontal 150kV	78
48.	Medición del perfil vertical a 150kV	79

49.	Medición del perfil horizontal 200kV	79
50.	Medición del perfil vertical a 200kV	80

## **TABLAS**

I.	Parámetros de los tipos de radiación de referencia	42
II.	Parámetros de la radiación de espectro angosto	43
III.	Parámetros de la radiación de espectro ancho	44
IV.	Parámetros de la radiación de bajo <i>Kerma</i> en aire	44
V.	Parámetros de la radiación de alto <i>Kerma</i> en aire	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\int$	Integral.
$\partial$	Derivada parcial.
$\Delta$	Variación pequeña.
$\pm$	Tomar el valor especificado más o menos.
$\mu\text{Gy}$	Micro( $1 \cdot 10^{-6}$ ) Gray
$\text{nC}$	Nano( $1 \cdot 10^{-9}$ ) Coulomb
$\text{kV}$	Kilo( $1 \cdot 10^3$ ) Voltio
$\text{mA}$	Mili( $1 \cdot 10^{-3}$ ) amperio
$\text{mm}$	Milímetro
$\text{s}$	Segundo
$\text{h}$	Hora
$\text{cm}$	Centímetro
$\text{min}$	Minuto
$\text{J}$	Unidad de Joule.
$\text{Kg}$	Unidad de kilogramo.
$\text{Hz}$	Unidad de Herzt.
$\propto$	Es proporcional a.



## **GLOSARIO**

<b>Acelerador</b>	Máquina utilizada para comunicar energía cinética a partículas cargadas eléctricamente.
<b>Ancho de banda</b>	Es la diferencia entre dos frecuencias (superior e inferior) en donde se concentra la mayor parte de energía de una señal por transmitir.
<b>Amplificador</b>	Aparato destinado a reforzar una señal.
<b>Calibración</b>	Medición exacta y comparación de las entradas y salidas de un instrumento contra un patrón conocido.
<b>Campo</b>	Algo que existe a través de todo el tiempo y el espacio, en oposición a una partícula que existe en un solo punto en un instante.
<b>Campo eléctrico</b>	El responsable de las fuerzas eléctricas.
<b>Campo magnético</b>	El responsable de las fuerzas magnéticas, actualmente incluido, junto con el campo eléctrico, dentro del campo electromagnético.

<b>Capa hemirreductora</b>	Es el grosor de un material específico el cual atenúa el haz de radiación a la mitad de su valor original.
<b>Electrómetro</b>	Aparato para medir la cantidad de carga eléctrica en algún cuerpo.
<b>Espectro electromagnético</b>	Clasificación de la radiación electromagnética de acuerdo con su frecuencia o longitud de onda.
<b>Espectroscopia</b>	Técnica que estudia la producción y observación de los espectros de las radiaciones electromagnéticas.
<b>Filtración</b>	Láminas de aluminio o cobre con una pureza del 99.9% que se utilizan para atenuar el haz de radiación.
<b>Frecuencia</b>	Para una onda, número de ciclos completos por segundo.
<b>Gray</b>	La unidad que se utiliza para especificar la cantidad de dosis absorbida o <i>Kerma</i> .
<b>Ion</b>	Átomo o grupo de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones ha adquirido una carga neta.

<b><i>Kerma</i></b>	(Kinetic Energy released in the material) Energía cinética liberada en el material. Ocurre cuando se consideran partículas indirectamente ionizantes, como los fotones.
<b>Longitud de onda</b>	En una onda, distancia entre dos valles o dos crestas adyacentes.
<b>Radiación</b>	Energía o partículas materiales que se propagan a través del espacio, y que provienen de un núcleo radiactivo.
<b>Radiactividad</b>	Propiedad que presentan algunos núcleos de desintegración espontánea.
<b>Rayos X</b>	Los rayos X con longitudes de onda típicas entre $0.01\text{nm}$ y $10\text{nm}$ pueden producirse con longitudes de onda discretas en transiciones individuales entre los electrones interiores de un átomo, y también pueden producirse al desacelerar partículas cargadas como los electrones
<b><i>Roentgen</i></b>	Unidad de dosis iónica de una radiación ionizante.

## RESUMEN

La operación exitosa de cualquier proceso depende de la exactitud y el funcionamiento en la medición de cada instrumento en el lazo de control. La calibración del instrumento ayuda a asegurar que el proceso opere dentro de las especificaciones y que produzca un producto de calidad.

Al igual que cualquier equipo eléctrico o mecánico que se vende en el mercado, a un equipo de rayos X es necesario realizarle una serie de pruebas antes de poder utilizarlo. El presente trabajo de graduación realiza la calibración de un equipo de rayos X, el cual será puesto en servicio en el Laboratorio de Calibración Dosimétrica en la Dirección de Energía del Ministerio de Energía y Minas.

Los rayos X emitidos por el equipo deben tener una calidad, la cual esté dentro de los estándares internacionales, en nuestro caso la norma ISO 4037. Una forma de expresar la calidad o poder de penetración de los rayos X es por medio de la capa hemirreductora o *half value layer*. La capa hemirreductora, CHR o *HVL* es el espesor de un material de referencia que, al ser colocado en el camino del haz de radiación, reduce su intensidad a la mitad de su valor original.

Asimismo, fue importante determinar la tasa de *Kerma* del equipo de rayos X y el tamaño del campo de radiación. Dichas pruebas son importantes para obtener un buen rendimiento y conocimiento del equipo de rayos X. Los resultados de la calibración del equipo de rayos X se dejaron plasmados en una serie de gráficos, los cuales ilustran de una mejor manera las conclusiones.

## OBJETIVOS

- **General**

Efectuar la puesta en servicio de un equipo generador de rayos X del Ministerio de Energía y Minas con fines de calibración dosimétrica.

- **Específicos**

1. Conocer las características físicas de la radiación electromagnética, así como su clasificación.
2. Investigar acerca del equipo utilizado para detectar de radiación.
3. Determinar la calidad de los rayos X según la norma ISO 4037 mediante la determinación de las capas *hemirreductoras* para cada energía.
4. Investigar el comportamiento de la tasa de *Kerma* para cada energía contra la corriente del tubo de rayos X.
5. Determinar la dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia.
6. Medir la uniformidad del campo de radiación del equipo de rayos X, mediante la realización de los perfiles vertical y horizontal.

# INTRODUCCIÓN

Desde su descubrimiento, a principios del siglo XX, los rayos X han demostrado ser de gran utilidad para el ser humano.

En la actualidad sus aplicaciones prácticas van desde usos diagnósticos y terapéuticos en medicina hasta procedimientos industriales como: radiografías de soldaduras, verificación de llenado de recipientes metálicos, mediciones de espesores de láminas, inspección de contenedores en aduanas o de equipaje en aeropuertos, espectroscopia para análisis no destructivos de compuestos, etc.

Tanta diversidad de aplicaciones trajo consigo un problema de metrología: ¿Cómo medir y cuantificar una radiación electromagnética invisible y con un inherente potencial dañino?

La solución a dicho problema, ha sido el establecimiento de una red de Laboratorios de Calibración Dosimétrica avalados por el Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA, que pueda garantizar a los usuarios de radiaciones ionizantes que las lecturas de los equipos medidores y detectores de radiaciones, cuenten con una adecuada calibración y que sean confiables.

En Guatemala no es posible realizar dichas calibraciones razón por la cual las empresas y clínicas que utilizan rayos X se ven obligadas a trabajar con detectores de radiación, sin la adecuada calibración.

Las diversas aplicaciones industriales y médicas que involucran el uso de rayos X requieren la utilización de equipo detector sofisticado, el cual debe ser calibrado debidamente por un Laboratorio de Calibración Dosimétrica con equipamiento adecuado a fin, de garantizar la confiabilidad de las mediciones.

El hecho de que dichos equipos de medición no se encuentren debidamente calibrados, acarrea problemas en las cadenas de producción o, lo que es peor, puede desencadenar en problemas de sobre exposición a las radiaciones ionizantes del personal que se encarga del manejo de dichos equipos con los subsecuentes efectos adversos a la salud.

En el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica de la Dirección de Energía del Ministerio de Energía y Minas fue recientemente instalado un equipo generador de rayos X que se utilizará para procesos de calibración de equipos detectores de radiación.

Actualmente, en Latinoamérica existen 10 laboratorios secundarios, siendo el de Guatemala el único en Centro América. Solamente los laboratorios de Argentina y Brasil cuentan con el servicio de calibración en rayos X por lo que la puesta en servicio de dicho equipo es de suma importancia no sólo para el país sino para la región.

# 1. LOS RAYOS X

## 1.1. Historia y origen

Wilhem Conrad Roentgen descubrió un nuevo tipo de rayos el 8 de noviembre de 1895, en el Instituto de Física de Würzburg en Bavaria. Roentgen experimentaba con un tubo de Crookes, el cual consiste de una cápsula de vidrio, con presión baja, que contiene dos electrodos de platino. Al hacer pasar una descarga eléctrica produce destellos de luz.

Roentgen cubrió el tubo con cartón negro y oscureció la habitación para evitar interferencias con el experimento que conducía. Al hacer pasar las descargas pudo observar una luz verde procedente de un cartón pintado con platino-cianuro de bario, un material fluorescente que se encontraba a un metro de distancia del tubo. Puesto que el material fluorescente responde a la luz y el cuarto estaba en la oscuridad, Roentgen concluyó que se trataba de algún tipo de radiación desconocida que lograba traspasar el cartón que rodeaba el tubo de Crookes y excitaba el material.

Este tipo de radiación desconocida tenía un poder penetrante sorprendente. Podía atravesar cartón, madera y tela con facilidad. Sin embargo, los metales como el cobre, hierro, plomo, plata y oro eran menos penetrables. Los metales más densos probaron ser más opacos. Lo más sorprendente resultó ser que la piel era transparente, mientras que los huesos eran opacos. Al interponer su mano entre la fuente de radiación y la pantalla fluorescente pudo observar sus huesos.



Para diciembre de 1895 Roentgen presentó los resultados de su trabajo. En 1901 recibió el primer Premio Nóbel de Física por su investigación. Hoy en día es obvio que la contribución de este descubrimiento ha revolucionado el diagnóstico médico.

## **1.2. Clasificación de los rayos X**

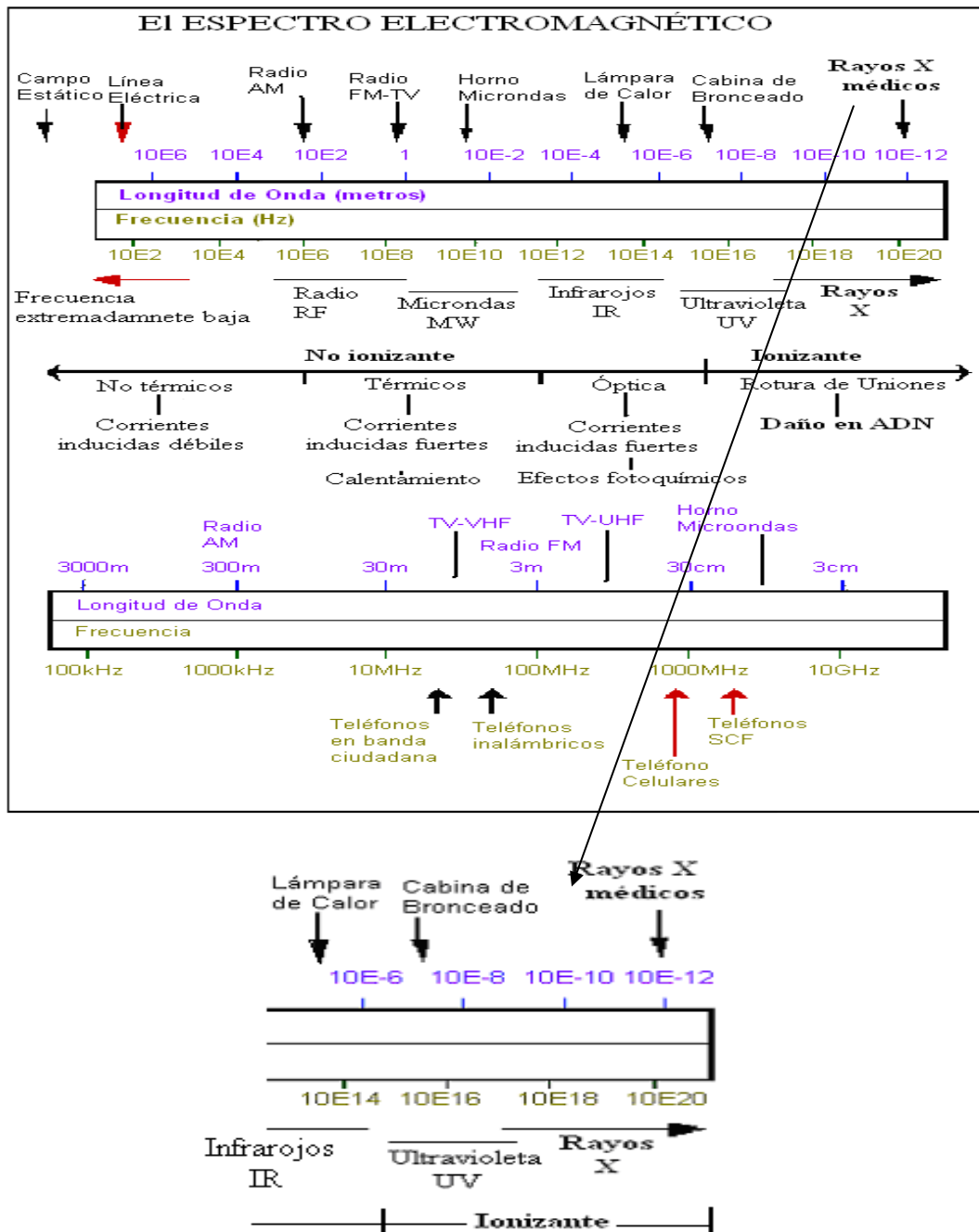
Hoy en día el espectro electromagnético abarca una amplia gama de diferentes clases de radiaciones provenientes de una variedad de fuentes. Estas radiaciones difieren en gran manera en cuanto a sus propiedades, sus medios de producción y las maneras en que las observamos, comparten otras características en común; todas pueden describirse en términos de campos eléctricos y magnéticos, y todas viajan a través del vacío con la misma velocidad, la velocidad de la luz.

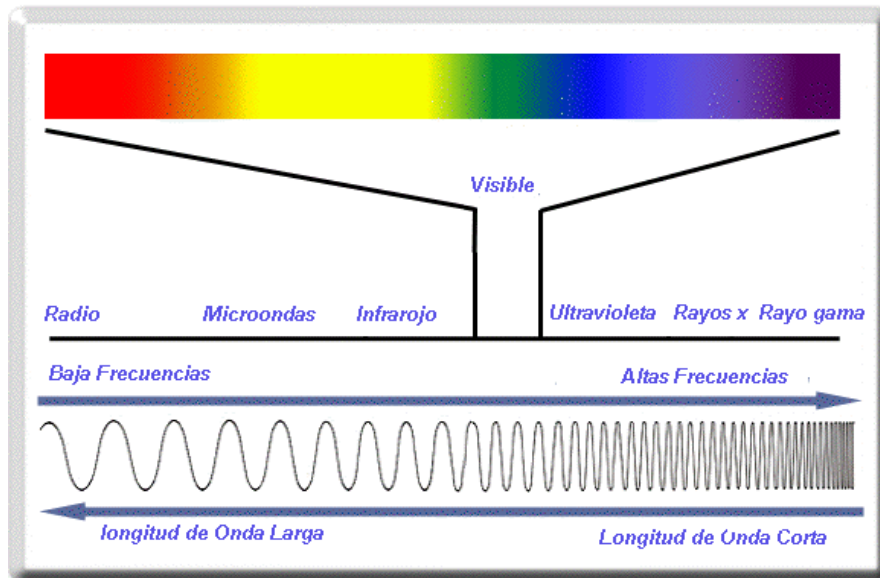
De hecho desde el punto de vista fundamental, difieren sólo en la longitud de onda. Aparte de la diferencia de sus longitudes de onda como se muestra en la figura 1, no existe una manera experimental de distinguir una onda en la región visible de otra en la región infrarroja; las ondas tienen formas idénticas y descripciones matemáticas idénticas. No existen espacios en el espectro, como tampoco límites bien definidos entre las diversas categorías

El espectro electromagnético se divide, según su frecuencia y energía en:

- Radiación ionizante
- Radiación no ionizante

Figura 1. Espectro electromagnético





Fuente: **Las radiaciones y sus características.** s.d.e

### 1.2.1. Radiación ionizante

Se extienden desde los  $3 \cdot 10^{15}$  Hz. Hasta por encima de  $1 \cdot 10^{27}$  Hz siendo sus características principales (2-15):

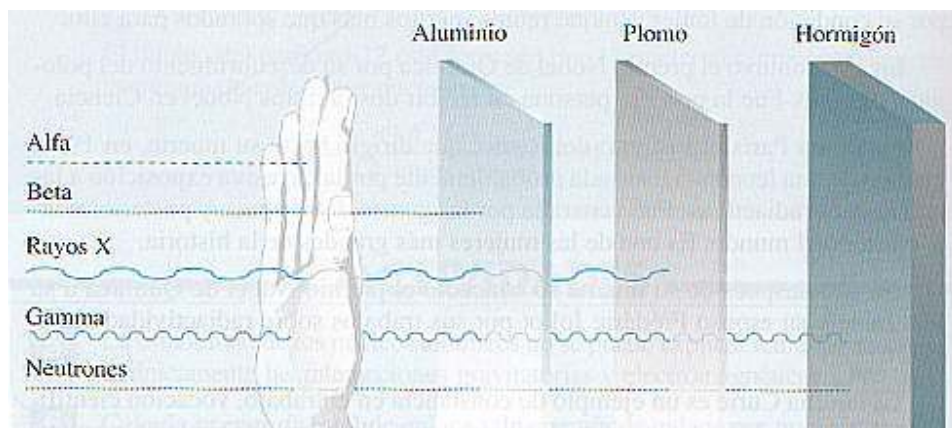
- Las radiaciones ionizantes son de alto contenido energético.
- Longitud de ondas pequeñas. Desde  $100 \text{ nm}$  hasta  $300 \cdot 10^{-21} \text{ m}$ .
- Tienen capacidad para ionizar (cuando un átomo ganó o perdió uno o más electrones) medios.

### 1.2.2. Radiación no ionizante

Se extienden desde 0 Hz. Hasta aproximadamente  $3 \cdot 10^{15}$  Hz siendo sus características principales (2-18):

- Las radiaciones no ionizantes no son de alto contenido energético.
- Longitudes de onda grandes. Desde infinito hasta  $100 \text{ nm}$ .
- Las radiaciones no ionizantes, aún cuando sean de alta intensidad no pueden causar ionización, es decir, que no inducen carga eléctrica sobre átomos o moléculas neutras.
- Las radiaciones no ionizantes son ondas electromagnéticas.

Figura 2. **Representación grafica de la penetrabilidad de los rayos alfa, rayos beta, rayos X, rayos gamma y neutrones**



Fuente: **Las radiaciones y sus características.** s.d.e

En la figura 2 se muestra la diferencia que existe según la penetrabilidad de los distintos tipos de radiación.

### 1.3. Generación de los rayos X

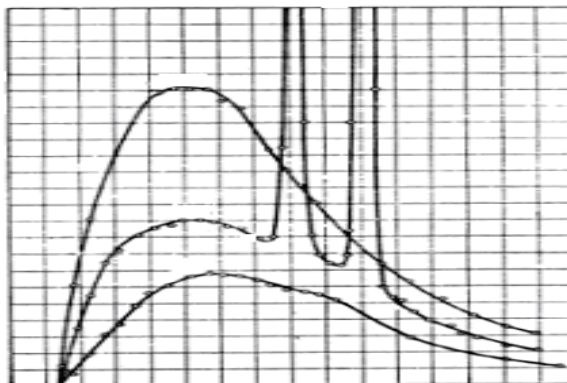
Los rayos X con longitudes de onda típicas entre  $0.01\text{nm}$  y  $10\text{nm}$  pueden producirse con longitudes de onda discretas en transiciones individuales entre los electrones interiores de un átomo, y también pueden producirse al desacelerar partículas cargadas como los electrones.

Las longitudes de onda corresponden aproximadamente al espaciamiento entre los átomos de los sólidos; por lo tanto la dispersión en los materiales es una manera útil de estudiar su estructura. Los rayos X pueden penetrar fácilmente en tejidos blandos, pero son detenidos por los huesos y otras materias sólidas.

#### 1.3.1. El espectro de rayos X

Si se considera un electrón de energía cinética que se dispersa del núcleo de un átomo en algún blanco, se obtendrá una colisión en la cual se transfiere un ímpetu al átomo, y el electrón pierde energía cinética.

Figura 3. **Gráfica de un espectro de rayos X**



Fuente: **Protección radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares.** Centro de protección e higiene de las radiaciones. La Habana, Cuba.

En la figura 3 se muestra un espectro característico de rayos X en el cual el eje horizontal, está en longitudes de onda y el eje vertical es la intensidad.

Puesto que el átomo es tan masivo, el ímpetu que el electrón le imprime al átomo da por resultado una energía cinética despreciable. La pérdida de energía del electrón aparece como energía de un fotón de rayos X que irradia hacia fuera del lugar del encuentro.

Este proceso se llama *Bremsstrahlung* (del alemán que significa, "radiación de frenado") y es la responsable del espectro continuo de rayos X.

Si se supone que los electrones se aceleran por una diferencia de potencial e inciden sobre un blanco grueso debido al proceso *Bremsstrahlung*, los electrones pueden perder cualquier cantidad de energía entre cero y su energía máxima. Los fotones de *Bremsstrahlung* tienen un espectro continuo.

Una característica prominente del espectro continuo es la longitud de onda de corte muy precisamente definida por debajo de la cual no existe el espectro continuo. Este mínimo de longitud de onda corresponde a un suceso de desaceleración en el que uno de los electrones incidentes pierde toda su energía en un solo encuentro, irradiándola hacia afuera en forma de fotón aislado (5-560).

Los rayos X pertenecen a las radiaciones electromagnéticas, las cuales son una combinación de oscilaciones eléctricas y magnéticas que viajan libremente en el espacio. A estas radiaciones pertenecen también la luz, las ondas de radio, las microondas y los rayos gamma. Los rayos X tienen las siguientes características:

- Su longitud de onda extremadamente corta permite que penetren materiales que absorben o reflejan la luz.
- Ocasionalmente que ciertas sustancias fluorescan, es decir, emitan radiación en el rango visible y ultravioleta.
- Afectan las películas fotográficas produciendo un registro hecho visible al revelarlas.
- Causan cambios biológicos, somáticos y genéticos; un hecho que permite su uso en terapia, pero necesita precaución en diagnóstico.

Los rayos X son producidos al chocar con los átomos del blanco en ese instante, los electrones se detienen. La mayor parte de la energía utilizada se convierte en calor, pero una porción pequeña, menor del 1%, se transforma en rayos X(2-45). El método más eficiente de producirlos es un tubo de rayos X parecido a los antiguos tubos al vacío de los radios y televisores, aunque menos complicado.

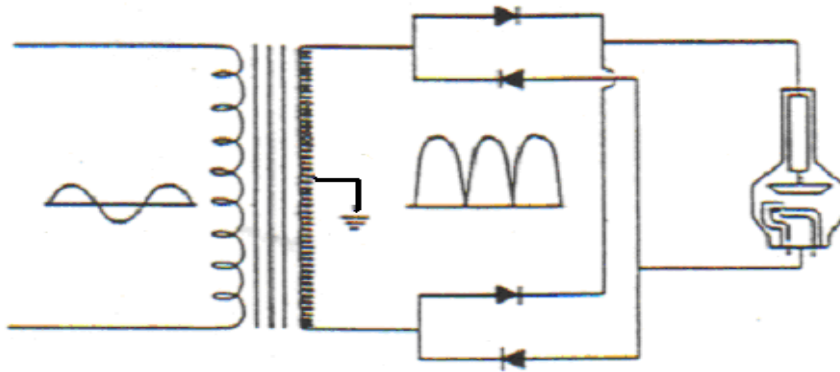
### **1.3.2. El tubo de rayos X**

Un tubo de rayos X está constituido por una unidad de alto vacío perfectamente sellada, generalmente con un ánodo (blanco) de cobre o molibdeno, aunque para propósitos especiales se emplea también el cromo, hierro, níquel, plata o tungsteno (2-25).

Para producir rayos X se necesitan algunos artificios tecnológicos:

- Producir electrones en cantidad suficiente.
- Acelerarlos hacia un blanco.
- Recoger los electrones para cerrar el circuito.

Figura 4. **Circuito eléctrico de un tubo de rayos X**



Fuente: **Protección radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares**. Centro de protección e higiene de las radiaciones. La Habana, Cuba.

En la figura 4 se aprecia el transformador de alta tensión y el rectificador de onda completa, componentes que forman el circuito eléctrico del tubo de rayos X.

Actualmente ya no se utilizan los tubos de *Crookes*. En 1913 se comenzaron a utilizar los tubos de *Coolidge*. Desde esa fecha los tubos de rayos X no han cambiado esencialmente.

### 1.3.2.1. El cátodo

Para producir electrones se utiliza el efecto termoiónico. Esto se consigue al calentar un material hasta una temperatura muy alta. Esencialmente, se agrega energía en forma de calor a los electrones libres del material y con ello se logra una nube electrónica sobre el mismo (2-30).



Si el metal es calentado en la presencia de oxígeno, este puede arder y vaporizarse. Por lo tanto es necesario colocar el material a calentarse dentro de una cápsula al vacío. El material que cumple mejor con los requisitos es un alambre enrollado, como el filamento de una lámpara incandescente de una aleación tungsteno-torio. El tungsteno tiene un punto de fusión altos y poca tendencia a vaporizarse.

Se utiliza una copa enfocadora para dirigir los electrones hacia el blanco. Esta copa tiene una forma especial y se conecta a un potencial negativo. El campo producido en esta forma dirige o enfoca los electrones hacia cierto punto en el espacio. Al conjunto formado por el filamento y la copa enfocadora se conoce como cátodo.

### **1.3.2.2. Aceleración de los electrones**

Para acelerar los electrones desde la nube electrónica se establece una diferencia de potencial de algunas decenas de miles de voltios, entre el filamento y un blanco metálico dentro del tubo.

El vacío logrado para que el filamento no se vaporice sirve también para que los electrones acelerados dentro del tubo no pierdan energía en colisiones con las moléculas del aire. La aceleración sufrida por los electrones en el campo eléctrico establecido entre el filamento (o cátodo) y el blanco (o ánodo) es análoga a la aceleración que tendría un objeto al soltarse desde una gran altura en un campo gravitacional.

La energía que un electrón gana al ser acelerado en esta forma es igual al producto de la carga del electrón por la diferencia de potencial eléctrica aplicada entre los electrodos. Este producto viene expresado en kilo-electrón-voltios, o keV. Un electrón-voltio es una unidad de energía equivalente a  $1.602 \cdot 10^{-19}$  Joule.

Si aplicamos 100kV entre los electrodos, los electrones acelerados tendrán 100keV antes de llegar al ánodo. La diferencias de potencial aplicada varía entre 30kV a 120kV para radiología diagnóstica.

### **1.3.2.3. El ánodo**

Los electrones acelerados son susceptibles de entregar toda la energía cinética ganada, en rayos X. Sin embargo, gran parte de esta energía se transforma en calor debido a que los electrones incidentes en el blanco ionizan o excitan a los átomos del mismo. Algo más del 99% se convierte en calor, mientras que menos del 1% se convierte en rayos X.

El blanco o ánodo está construido de una aleación de tungsteno-renio. Como ya se mencionó anteriormente, el tungsteno tiene un punto de fusión alto, para evitar que se deforme o se derrita durante su utilización.

Para poder lograr una producción de rayos X durante un lapso de tiempo, debe establecerse una corriente eléctrica dentro del tubo.

Para ello, al ánodo mismo debe ser de un material que no solo soporte las altas temperaturas, sino que sea un conductor eléctrico. Para lograr la corriente del tubo se utilizan generadores eléctricos monofásicos, trifásicos, de alta frecuencia, o de corriente continua.

La diferencia de potencial que proporcionen estos generadores debe variarse entre el rango apropiado y deben proporcionar una corriente adecuada para el tubo. La potencia que suministran es de unos kilovatios.

#### **1.3.2.3.1. Tipos de ánodos**

Dependiendo de su utilización, los tubos de rayos X tienen dos tipos de ánodos: ánodos fijos y ánodos rotatorios. De esta característica dependerá la forma en que se disipe el calor producido durante la operación del tubo.

El ánodo fijo consiste en una placa de unos 2 a 3 milímetros de espesor de una aleación de tungsteno-renio, que constituye el blanco, colocada sobre y alrededor de una masa grande de cobre.

El cobre es un buen conductor eléctrico y calorífico que reúne las condiciones expresadas anteriormente. Este tipo de tubo, sin embargo, no logra soportar altas corrientes. Si se calentara en exceso el blanco podría levantarse de la masa de cobre debido a las diferencias de sus coeficientes de expansión térmica. Estos tubos no se utilizan normalmente en radiografía diagnóstica, sino en radioterapia o radiografía industrial.

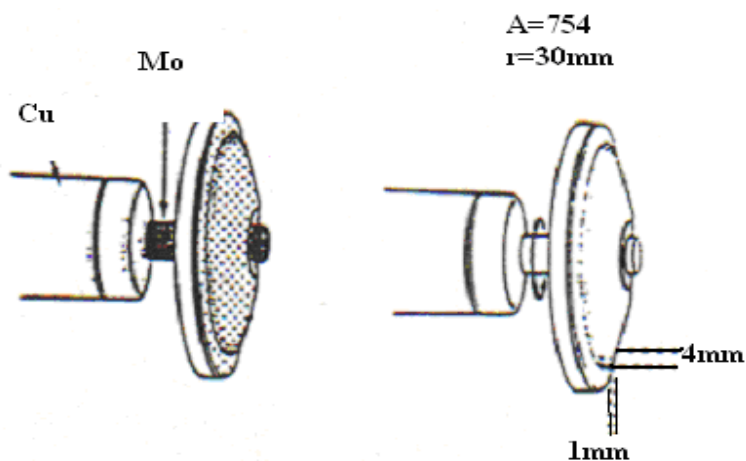
Figura 5. **Representación física del ánodo fijo**



Fuente: **Protección radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares.** Centro de protección e higiene de las radiaciones. La Habana, Cuba.

Los tubos de radiodiagnóstico utilizan un tubo de rayos X con el ánodo rotatorio. En estos casos el ánodo es un disco de aleación de tungsteno-renio de algunos centímetros de diámetro. De esta forma, el ánodo al rotar, distribuye el calor en toda la periferia del disco.

Figura 6. **Representación física del ánodo rotatorio**



Fuente: **Protección radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares.** Centro de protección e higiene de las radiaciones. La Habana, Cuba.

Para hacer girar el disco, existe una gran dificultad mecánica, puesto que su eje no puede quedar fuera de la cápsula de vidrio. Para resolver el problema, se coloca un estator o bobina de inducción dentro de la cápsula de vidrio, en el cuello del tubo. Para hacer girar el estator, se colocan bobinas externas.

El rotor hace girar a su vez al ánodo por medio de un eje. Este eje debe ser de un material conductor, con alto punto de fusión y aislante del calor. El material utilizado es el molibdeno, que reúne estas propiedades. La velocidad a la que rota el ánodo es, en teoría, 3600 RPM, puesto que se utiliza la corriente alterna de la línea. Entre más grande sea el disco, logrará distribuir más calor. Existen, sin embargo, algunas limitaciones técnicas del tamaño que puede tener el ánodo. Si el disco es demasiado grande, será muy masivo y tendrá un momento de inercia muy alto que hará difícil llevarlo a rotar a la velocidad adecuada.

Por otro lado, el peso del disco, perpendicular al eje, hará que éste se doble. Existen otros tipos de tubos que logran salvar este inconveniente.

La cápsula de vidrio se aloja dentro de un blindaje de plomo que tiene un espacio lo suficientemente grande para rellenarlo con aceite mineral muy grueso, que disipa el calor. Como el aceite se expande al calentarse, se coloca un fuelle para no dañar ni la cápsula ni el blindaje de plomo.

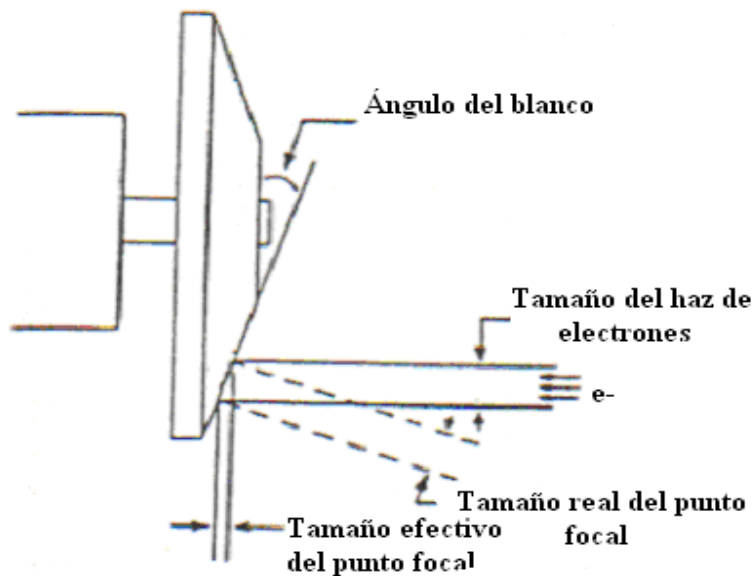
En los tubos de ánodo fijo, el calor producido en el blanco se disipa por conducción a la cápsula de vidrio, por medio de la masa de cobre. En los tubos con ánodo rotatorio el calor producido en el blanco no se puede disipar por medio del rotor. El ánodo queda aislando del rotor por medio del eje de molibdeno. El calor se disipa por radiación del blanco a la cápsula de vidrio.

#### 1.3.2.4. El punto focal

Es el área del ánodo que es bombardeado por los electrones provenientes del filamento. La longitud del filamento y la forma de la copa enfocadora determinan la forma y tamaño del punto focal.

Para producir un punto focal pequeño se enfocan los electrones en un área menor del blanco. Si esto se realiza por mucho tiempo, se concentrará mucho calor en esta área pequeña. No es conveniente, por lo tanto, producir siempre puntos focales pequeños ya que se reduce la vida útil del tubo de rayos X. En la figura 7 se puede verificar el principio de línea focal y el punto focal, el cual está inclinado con respecto a la normal.

Figura 7. Principio de línea focal utilizado en un tubo de rayos X



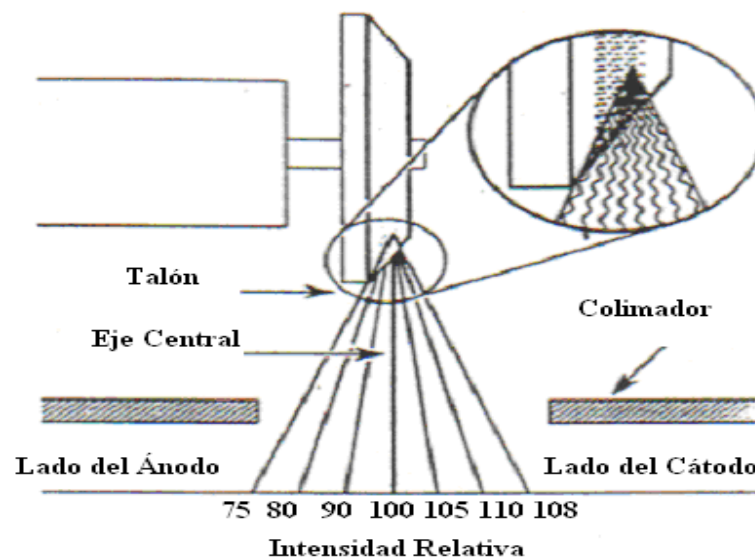
Fuente: **Protección radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares.** Centro de protección e higiene de las radiaciones. La Habana, Cuba.

Los ánodos de los tubos de rayos X tienen una inclinación, respecto de la vertical, de algunos grados. Esto produce una proyección del punto focal, en el plano de toma de la radiografía. El punto focal efectivo producido de esta forma, es menor que el punto focal real en el ánodo.

### 1.3.2.5. Efecto Talón

Debido a la inclinación del ánodo en los tubos de rayos X los fotones emitidos del lado del ánodo son filtrados por el tungsteno del ánodo mismo. Esto ocasiona una disminución de la intensidad de los rayos X en este lado del tubo. Como puede verse en la figura 8, la intensidad en el lado del cátodo es mayor respecto a la central y menor en el lado del ánodo.

Figura 8. **Disminución de la intensidad debida al efecto Talón**



Fuente: **Protección Radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares.** Centro de protección e higiene de las radiaciones. La Habana, Cuba.

### **1.3.3. Operación del tubo de rayos X**

El aparato eléctrico que permite el control y operación del tubo, consiste en un número de componentes básicos: un transformador de alto voltaje, un rectificador y una fuente de potencia para el filamento del tubo, como se muestra en la figura 9.

Los circuitos se arreglan de tal forma que el alto voltaje positivo se aplique al ánodo del tubo y el alto voltaje negativo se aplique al cátodo. Los electrones del filamento caliente son cargas negativas y por lo tanto son atraídas con mucha fuerza hacia el ánodo positivo. El kilovoltaje aplicado proporciona la aceleración de los electrones.

El número de electrones se controla por la temperatura del filamento. Esto se ajusta por medio de la corriente del mismo a través de su propio circuito de bajo voltaje. Entre mayor temperatura tenga el filamento, mayor número de electrones se tendrán disponibles para ser acelerados.

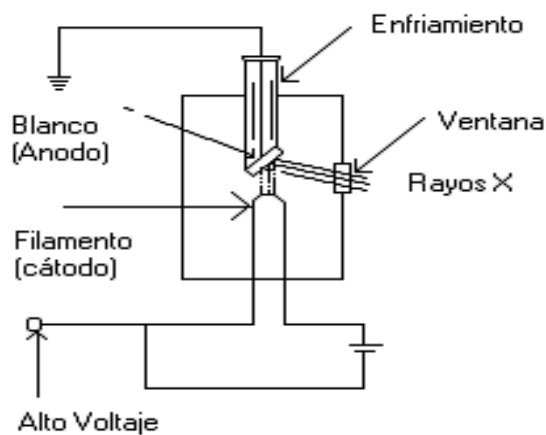
En el tubo de rayos X el número de electrones que fluyen por segundo se mide en miliamperios. Por lo tanto, ajustar la máquina de rayos X a un miliamperaje realmente significa ajustar la temperatura del filamento para entregar el flujo de corriente indicado.

Como se mencionó anteriormente, el kilovoltaje aplicado entre el cátodo y el ánodo acelera los electrones para producir rayos X. Cuando se utilizan kilovoltajes bajos, los rayos X tienen una longitud de onda mayor y son fácilmente absorbidos. Estos se denominan rayos suaves.



La radiación producida en los kilovoltajes altos tiene una energía mayor y longitud de onda más corta. Estos rayos X son más penetrantes y se conocen como duros.

Figura 9. **Diagrama físico de un tubo de rayos X**



#### 1.4. Medidas de la Radiación

En dosimetría las magnitudes nos sirven para darnos una medida física en un punto de interés, en una región que está relacionada con los efectos potenciales o reales de las radiaciones ionizantes.

Para nuestro estudio nos van a interesar los dos tipos de medida que van a ser la dosis absorbida y *Kerma*.

Dosis absorbida: la magnitud de la dosis absorbida nos indica la cantidad de energía absorbida por unidad de masa en un material irradiado ( $D=d\varepsilon/dm$ ).

El valor de la dosis absorbida se puede establecer para cualquier medio y para cualquier tipo de radiaciones ionizantes. La unidad que se utiliza para especificar la cantidad de dosis absorbida es el  $\text{J.Kg}^{-1}$  y tiene el nombre de Gray (Gy).

El Gray es una unidad que fue introducida recientemente para definir esta cantidad, pero con anterioridad la unidad que se utilizaba era el rad que fue introducida en 1953. La unidad de tasa de dosis absorbida es el  $\text{J.Kg}^{-1}\text{s}^{-1}$  ó  $\text{Gy.s}^{-1}$

*Kerma* (energía cinética liberada en el material): cuando se consideran partículas indirectamente ionizantes, como los fotones, conviene también describir la energía liberada por ellas al interactuar con la materia. Esta magnitud *Kerma*, expresada a veces por unidad de masa viene definida por el cociente:

$$K = \frac{\partial E}{\partial m} \quad (1.1)$$

Donde  $\partial E$  es la suma de las energías cinéticas de todas las partículas cargadas liberadas por las interacciones de las partículas ionizantes no cargadas en una masa  $\partial m$ , la unidad utilizada para expresar la magnitud es J/kg.

## **1.5. Aplicación de los rayos X**

### **1.5.1. Aplicaciones industriales**

Los rayos X en la industria generalmente son usados en el control de calidad de plástico, metal, aislantes, y otros productos que a simple vista no es preciso determinar; el examen de la imagen se realiza utilizando películas radiográficas, pantallas fluoroscópicas u otras técnicas para tomar rayos X.

A continuación daremos unos ejemplos de la aplicación de los rayos X en la industria.

#### **1.5.1.1. Determinación de impurezas en agua**

El empleo de muestras líquidas, para su análisis por esta técnica instrumental, presenta bastantes ventajas debido a su homogeneidad y su fácilmente reproducible colocación en el porta muestras. Debido a que los límites de detección son generalmente bajos, hay que recurrir al empleo de técnicas de concentración previa, bien sea por métodos físicos o químicos.

El procedimiento más simple consiste en analizar el líquido directamente, colocándolo adecuadamente en un porta muestras, sin embargo, no pueden analizarse elementos ligeros debido a efectos de absorción.

La aplicación de la espectroscopia de rayos X a la determinación de impurezas en aguas presenta ventajas, como técnica instrumental por ser relativamente sencilla, rápida, de carácter multielemental y versátil. Además de ser de elevada precisión y gran exactitud.

Los problemas que se pueden presentar es el caso de algunas soluciones que se hacen inestables al irradiarlas con rayos X o se precipitan a causa de algún proceso de hidrólisis. También puede producirse la evaporación parcial del líquido, si el tiempo de exposición de los rayos X es demasiado largo.

### **1.5.1.2. Determinación de azufre y metales pesados en aceite crudo y derivados del petróleo**

El análisis por fluorescencia de rayos X, basado en el principio de excitación secundaria y en un modelo cuantificado aproximado, provee un método adecuado para la determinación de azufre y metales pesados en aceite crudo y productos derivados del petróleo.

Las muestras pueden ser analizadas directamente sin ninguna clase de preparación, sin embargo, procedimientos de calibración deben ser realizados para el adecuado análisis, tanto cualitativo como cuantitativo.

### **1.5.1.3. Determinación de contaminación radiactiva en alimentos**

Ésta corresponde a una de las aplicaciones más recientes y que ha sido tratada con mayor énfasis, debido a la gran cantidad de plantas nucleares que existen en funcionamiento en el mundo. A fin de eliminar la contaminación que pueden representar.

Gran variedad de productos alimenticios son importados, lo cual hace necesario, especialmente en productos provenientes de países en donde existe la probabilidad de haber sido contaminados, de efectuar estudios de análisis instrumental para asegurar que no se encuentren en dicho estado. En caso de determinarse contaminación, asegurarse que los niveles se encuentren debajo de los límites de seguridad permitidos para el consumidor.

### **1.5.2. Otras aplicaciones**

Debido a la gran variedad de aplicaciones de la técnica, podemos mencionar algunas de las aplicaciones más comunes en la industria.

- Determinaciones de oro.
- Análisis de fluidos biológicos.
- Determinación de uranio en muestras derivadas de estudios de explotaciones minerales.
- Análisis de medicamentos
- Determinación de petróleo por medio de rayos X

### **1.5.3. Aplicación en la medicina**

El uso de las radiaciones ionizantes en la medicina, generalmente rayos X, ha permitido aplicar nuevas técnicas en áreas como la genética celular, ortopedia, odontología y otras ramas de la medicina. Estas aplicaciones confirman la diversidad de los usos pacíficos de la energía nuclear.

La esterilización de tejidos para trasplantes por medio de la radiación ionizante, constituye una de las aplicaciones más nobles de la energía nuclear en nuestros días.

Los rayos X son usados para estudiar las estructuras internas del organismo como ayuda al diagnóstico. Los rayos X pueden registrarse en placas fotográficas o proyectarse “en directo” en un fluoroscopio o una pantalla de televisión, de forma que el médico pueda estudiar el movimiento de diversas estructuras internas del cuerpo.

## **2. EQUIPOS DETECTORES DE RADIACIÓN**

El hombre no posee sensores biológicos de radiación ionizante. Como consecuencia tiene que depender totalmente de la instrumentación para la detección y medida de estas radiaciones. Para esto existe una cantidad grande de instrumentos con diferentes propósitos. Existen aparatos que son diseñados principalmente para medición de un determinado tipo de radiación, tales como: rayos X de baja energía, rayos gama, electrones, neutrones, etc.

### **2.1. Energía e intensidad de las radiaciones ionizantes**

Las radiaciones ionizantes pueden presentarse en dos formas: como partículas o como fotones individuales; presentándose éstos como intensidades o flujos en los que los fotones y las partículas se movilizan en un universo angular. Lo que se consigue con la medida de la energía de las radiaciones ionizantes, es conocer el rendimiento absoluto de un proceso particular y poder deducir la correspondiente sección eficaz.

### **2.2. Medida de la energía de un haz**

#### **2.2.1. Espectrometría**

Es el estudio de las intensidades de radiación electromagnética de diversas longitudes de onda emitidas o absorbidas por las sustancias. Por medio de la espectrometría se determina cuantitativamente las partículas iónicas según su relación masa-carga eléctrica.

### **2.2.1.1. Espectrometría de partículas cargadas**

Con el estudio de los campos magnéticos y eléctricos se descubrió que las partículas cargadas se desvían, dependiendo de su carga eléctrica y de la dirección en la del campo eléctrico o magnético que estuvieren afectando a la partícula, esto ayudó a la física impulsando el inicio del estudio de la descarga gaseosa.

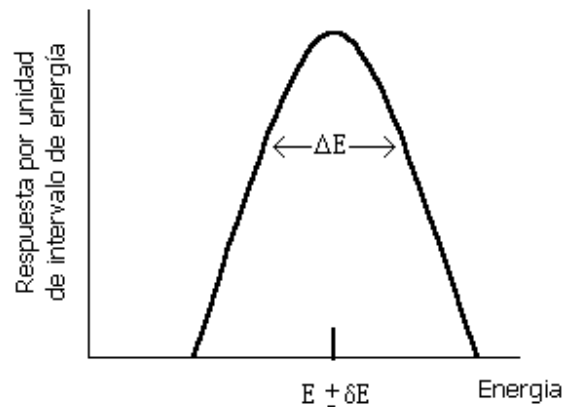
El estudio de estos desvíos de partículas en la actualidad se aplica en:

- Medidas de energía.
- Espectroscopia de masas.
- Diseño de aceleradores.
- Monocromadores, imanes de dirección y focalización de haces.

En física nuclear de bajas energías, los espectrómetros dan información confiable y precisa de los cambios energéticos que suceden en las transmutaciones del núcleo.

Con el estudio de elementos radioactivos naturales se desarrollaron los espectrómetros de rayos  $\beta$  para poder mejorar los datos que se adquirían de los métodos de absorción. Con radiación mono-energética se tiene una respuesta de espectrómetro como se indica en la figura 10.

Figura 10. **Respuesta de un espectrómetro**



Para el caso que se muestran en la figura anterior. La precisión  $\delta E$  depende de la calibración, la magnitud de la anchura de la gráfica depende de las propiedades del instrumento y del detector de partículas utilizado que viene dada por:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \quad (2.1)$$

Donde  $R$  = resolución de la gráfica y  $\Delta E$  = al cambio de energía. Todos los espectrómetros utilizados en la detección de partículas se basan en los instrumentos destinados a la detección de radiación tipo  $\beta$ .

### **2.2.1.2. Espectrometría de fotones**

Los espectrómetros de electrones se pueden dividir en dos tipos:

- a) Espectrómetros de focalización semicircular



El funcionamiento de un espectrómetro de focalización semicircular es cuando los electrones se mueven en un plano perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético creándose así una focalización de primer orden.

b) Espectrómetros de campo no homogéneo (doble focalización)

Basados en la propiedad de doble focalización de un campo no homogéneo, la elevada transmisión del espectrómetro de lente magnética y la potencialmente alta resolución del instrumento de campo constante de  $180^\circ$ .

### **2.3. Medida de la intensidad de un haz**

Un sistema completo de detección está formado por un detector de radiación y un sistema electrónico asociado. La función del detector es actuar como transductor. Es decir, transforma parte de la energía del campo de radiación en energía eléctrica.

La instrumentación electrónica asociada tiene por objeto procesar adecuadamente las señales entregadas por el detector y presentar información al operador.

Los sistemas de detección deben estar correctamente calibrados contra patrones de referencia y ciertas condiciones más o menos reproducibles. De la incerteza con que el patrón de referencia puede establecer una medición y la reproducibilidad de las condiciones dependerá el error con el que el sistema de detección pueda medir.

Los detectores empleados en radio protección se clasifican en dos categorías: detectores por ionización o inmediatos y detectores por excitación, los cuales se subdividen en inmediatos y retardados.

Aunque hay muchos tipos de instrumentos, los principios de operación para la mayor parte de ellos, son relativamente pocos. El requerimiento básico es que la radiación interactúe con el detector, el cual puede ser de diversos materiales. Para la detección de rayos X se utilizan principalmente detectores *geiger* y cámaras de ionización

### **2.3.1. Detectores por ionización o inmediatos**

El principio físico de funcionamiento de los detectores por ionización se basa en la ionización producida en un gas encerrado por electrodos. El dispositivo adecuado para coleccionar los iones producidos es bastante sencillo. Basta con disponer de dos electrodos cargados para que los iones producidos se dirijan hacia ellos y sean coleccionados. Se puede utilizar un arreglo de dos placas paralelas, o electrodos cilíndricos concéntricos a través de las cuales se aplica una diferencia de potencial lo más constante posible.

Uno de los dispositivos más antiguos usado para detectar la radiación ionizante es el que está constituido por dos cilindros coaxiales. Uno de ellos puede ser un alambre delgado o filamento, separado del cilindro exterior por un aislante.

Estos electrodos pueden conectarse a una fuente de voltaje a través de una resistencia para que exista entre ellos una diferencia de potencial suficiente, para lograr la recolección de los iones.

Si se aplica un potencial de tal forma que el alambre central sea el electrodo positivo y la pared del cilindro negativo, se logra un volumen sensible efectivo debido a la variación de la intensidad del campo eléctrico, que permite que los iones formados en el interior de la cámara y en el gas se dirijan a sus respectivos electrodos.

La amplitud del pulso observado del detector contra el voltaje aplicado o el campo eléctrico se ilustran en la figura 11. En valores muy bajos de voltaje, el campo es insuficiente para evitar recombinación del original par de iones, y la carga colectada es menos que la representada por el par de iones. Mientras el voltaje crece, la recombinación se suprime y la región de la saturación de los iones se alcanza; este es el modo de operación normal de la cámara de ionización.

Si se sigue incrementando el voltaje aplicado se alcanza la etapa en la cual el gas se multiplica, la carga colectada empieza a multiplicarse y se puede observar un pulso con una amplitud creciente. Sobre una región del campo eléctrico, la multiplicación de gas será lineal y la carga colectada será proporcional al número de los pares de iones creados por la radiación incidente. Esta es la región de proporcionalidad y representa el modo de operación de los contadores proporcionales.

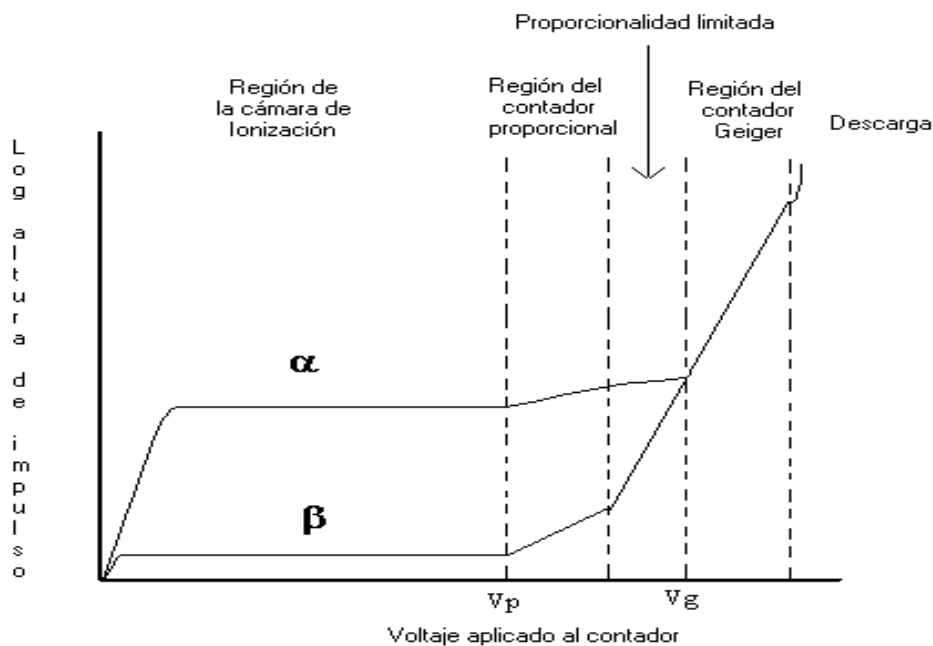
Al incrementar más el voltaje se introducen efectos no lineales. Esto afecta a los iones positivos los cuales son también creados en cada ionización secundaria.

Aunque los electrones libres son rápidamente colectados, los iones positivos se mueven más lentamente y durante el tiempo que tarda colectar los electrones, los iones casi no se mueven.

Es por eso que cada pulso del contador crea una nube de iones positivos que se dispersan lentamente hacia el cátodo.

Si la concentración de iones es suficientemente alta, ellos representan un espacio de carga que puede alterar significativamente la forma del campo eléctrico en el detector. Si el voltaje aplicado alcanza un valor máximo, la carga puede ser completamente dominante y determinar la historia del pulso. Entonces cada pulso de salida del detector es de la misma amplitud y no refleja propiedades de la radiación incidente. Esta es la región de operación del contador Geiger-Müller (10-162).

Figura 11. **Las tres diferentes regiones de operación de los detectores por ionización**

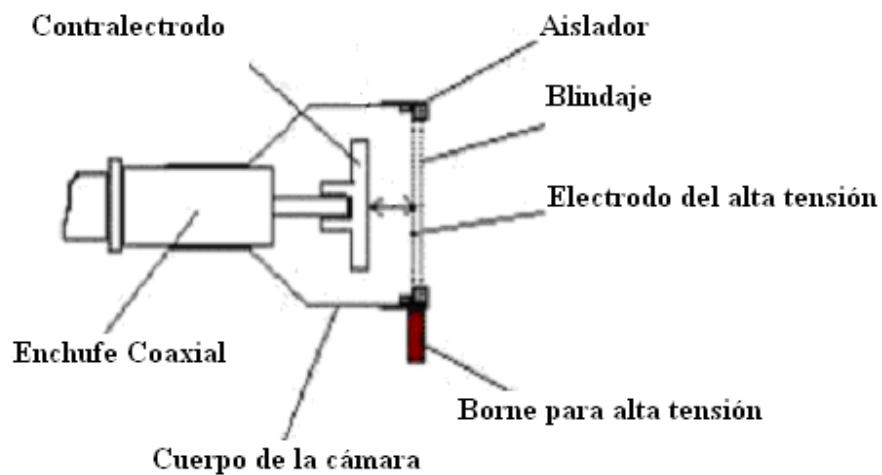


Fuente: Knoll Glenn. **Radiation Detection and Measurement**. 2<sup>da</sup> Edición. EEUU: Editorial McGraw-Hill, 1990, p.163.

### 2.3.1.1. La cámara de ionización

La cámara de ionización es una cámara cilíndrica que contiene aire a presión y temperatura ambiente y una varilla metálica como electrodo central. Esta cámara está cubierta por dentro con un material conductor que hace las veces de electrodo exterior.

Figura 12. Esquema de la cámara de ionización



Fuente: W.E. Burhan. **Física Nuclear**, Editorial Reverte, p.45.

La cámara de ionización en su forma más sencilla es un recinto metálico lleno de gas, en el cual se inserta un electrodo aislado. Al incidir la radiación sobre éste se produce ionización dentro de la misma, generando una corriente eléctrica que se amplifica por un circuito exterior y se mide por un instrumento. El número de iones colectado dentro de la cámara es aproximadamente igual al número de iones que produce la radiación.

Una cámara de ionización es un dispositivo para la medida de radiación, que utiliza el efecto ionizante que produce la radiación  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  sobre las moléculas de un gas.

Al ionizarse las moléculas del gas, éstas adquieren carga eléctrica y mediante la aplicación de un campo eléctrico se puede medir la cantidad de ionizaciones en el seno del gas. Si la magnitud del campo eléctrico y la presión del gas son adecuadas, la intensidad registrada será proporcional al número de partículas que entran en la cámara.

Entre las cámaras de ionización de mayor uso podemos mencionar las siguientes: la cámara de ionización con rejilla, la cámara de ionización de corriente continua y la cámara de aire de iones libres.

En los rayos X se sabe que la ionización primaria se produce a una velocidad constante y la corriente llega a la saturación cuando todos los pares de iones son recogidos antes de que tengan lugar su recombinación.

Cuando en la cámara de ionización se producen  $q$  procesos de ionización por segundo y cada vez que suceden, se producen  $n$  pares de iones, la corriente de saturación viene dada por:

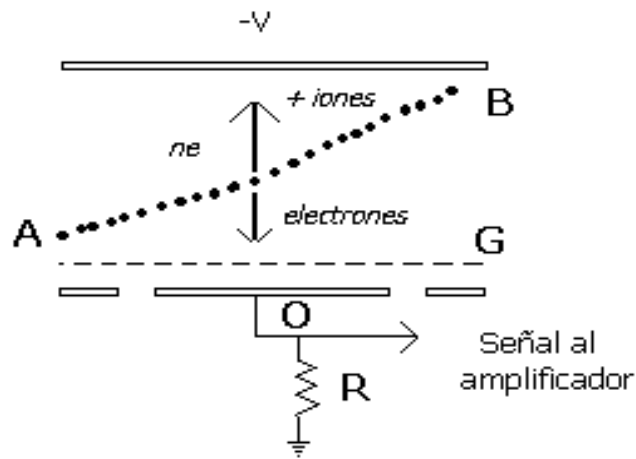
$$I = q \cdot n \cdot e \quad (2.2)$$

Donde  $e$  es la carga del electrón. Con estas condiciones la cámara de ionización puede darnos información con precisión de la ionización primaria.

Con el desarrollo de amplificadores de impulsos de gran ganancia se ha logrado la utilización de las cámaras de ionización como instrumentos de recuento de partículas individuales.

En una cámara de ionización el impulso que se genera se puede detectar cuando se conecta a tierra la placa colectora "O" según la figura 13, a través de una resistencia R elevada ( $10^{10} - 10^{13}$  Ohms) que, junto a la capacidad C de la cámara, forma parte del circuito de entrada de un amplificador.

Figura 13. **Configuración de los electrodos para detectar el impulso de la cámara de ionización antes de enviarla al amplificador**



Fuente: W.E. Burhan. **Física Nuclear**, Editorial Reverte, p.35.

Un defecto que presenta la cámara de ionización es que no detecta partículas de baja energía si el campo eléctrico no es lo suficientemente fuerte o intenso.

### 2.3.1.2. El contador proporcional

El contador proporcional es un detector con gas en su interior, el cual opera en un modo de pulso y utiliza el fenómeno de la multiplicación del gas, amplificando la carga representada por él para originar iones creados en el gas. Los pulsos son por esta razón, más largos que los de la cámara de ionización cuando son utilizados en las mismas condiciones (10-160).

Los contadores proporcionales se pueden aplicar en situaciones en las cuales el número de iones generados es pequeño para permitir satisfactoriamente la operación. Una aplicación importante es en la detección y espectroscopia de rayos X de baja energía. Los contadores proporcionales se utilizan también en la detección de neutrones.

### **2.3.1.3. El detector Geiger-Müller**

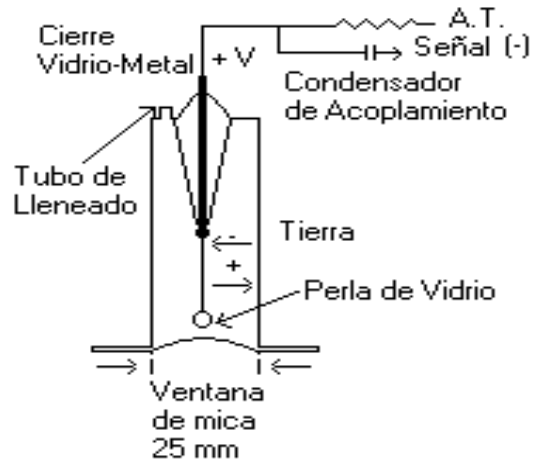
El detector Geiger-Müller tiene el mismo esquema de la cámara de ionización. El electrodo central es un alambre fino del orden de 7 milésimas de centímetro de diámetro y está hecho de tungsteno. El electrodo exterior está montado coaxialmente. El gas usado para el llenado del tubo es un gas noble. Usualmente se agregan pequeñas cantidades de otros gases con el propósito de evitar descargas múltiples.

Los contadores Geiger-Müller, probablemente, son las más usados y versátiles para detectar radiación. Son de bajo costo, fáciles de operar, sensibles y confiables. Sin embargo, su uso en campos de muy alta radiación requiere precauciones porque la mayoría de los contadores se saturan en tal condición.

En un contador proporcional, cuando las características de descarga están alteradas (por reducción de la presión del gas o por un aumento del voltaje aplicado) el impulso de salida es independiente de la ionización inicial y el tubo opera como un contador G-M. La siguiente figura muestra el diagrama de un G-M. En su esquema más sencillo se puede decir que un G-M está constituido por un cilindro de metal y adentro de este cilindro un gas y un electrodo que va a un circuito analizador de impulsos.



Figura 14. Diagrama de un contador de Geiger- Muller



Fuente: W.E. Burhan. **Física Nuclear**, Editorial Reverte, p.78.

Cuando una partícula cargada incide en un G-M, se ioniza el gas que se encuentra dentro del cilindro y debido a la diferencia de potencial en el electrodo se establece un campo eléctrico. Esto hace que el ion se acelere hacia los electrodos dependiendo de la carga que tenga, produciendo un impulso de corriente en los electrodos que se moviliza hacia el circuito.

La amplitud del impulso generado en el G-M puede llegar a varios voltios en función de su fuente de alimentación. En todos los sistemas de detección existe una mínima cantidad de tiempo, que debe separar dos eventos, para que puedan ser grabados como dos pulsos separados. En algunos casos el tiempo límite se puede obtener por procesos del detector mismo. Esta mínima cantidad de tiempo es usualmente llamado el tiempo muerto del sistema de conteo (10-161).

La duración de cada amplitud de pulso es menor que en un contador proporcional, pero el tiempo muerto es mayor debido a la propagación de la descarga a lo largo del filamento y a la gran reducción del campo que produce la nube de iones positivos.

La respuesta de un contador G-M depende de la energía. El tubo responde a toda partícula que atraviese el volumen sensible y produzca iones. El contador G-M permite el recuento de partículas cargadas en presencia de radiación  $\gamma$ .

Principales características intrínsecas de un contador G-M:

- Sensibilidad a la producción de un único par de iones
- Amplitud de impulso de salida constante que es independiente de la ionización inicial
- Tiempo de insensibilidad relativamente largo seguido a la entrada de cada partícula.

Características de un G-M con una fuente de radiación ionizante

- Un voltaje de umbral  $V_g$  en el cual empieza trabajar.
- Una velocidad de recuento de fondo, debida a la contaminación de los materiales y la radiación cósmica
- Un *plateau* ó *planicie* de pequeña pendiente, para el cual la velocidad de recuento aumenta sólo ligeramente con el voltaje de funcionamiento.

## **2.3.2. Detectores por excitación**

### **2.3.2.1. Inmediatos**

Los detectores de centelleo translucen la energía de la radiación en un destello luminoso indetectable por el ojo humano. Asociados al detector de centelleo hay un tubo foto multiplicador que emite electrones por incidencia de luz y multiplica el pulso de electrones.

Estos detectores están constituidos por cristales de yoduro de sodio activado por talio. El principio de detección consiste en que un electrón rápido es liberado y excita los electrones orbitales de átomos del cristal. Estos producen la emisión de fotones luminosos cuyo número es proporcional a la energía disipada en el cristal por la radiación incidente.

El detector de centelleo no se utiliza para determinaciones de dosis sino para realizar espectroscopia de rayos gama. Esto se debe a que su respuesta es muy dependiente de la energía de los fotones incidentes.

### **2.3.2.2. Retardados**

La película fotográfica contiene bromuro de plata con emulsiones de distinta sensibilidad para permitir mayor o menor margen de detección. Los rayos X inciden en la emulsión, libera electrones que forman una imagen latente. Esto hace que se reduzcan los cristales de bromuro de plata en el revelado. Al revelar la película, la zona expuesta a la radiación aparece más oscura.

De acuerdo con la densidad óptica del revelado, se puede calcular la dosis recibida por el individuo. En el caso de la película contenida en los dosímetros personales.

La ventaja de la utilización de la película en dosimetría personal es que se puede archivar como registro. La desventaja es que se necesita un tiempo largo para la determinación de la dosis y de equipo especial para calibrarlos. Además, se necesita personal técnico calificado.

Los cristales termo luminiscentes contienen trampas electrónicas consistentes en pozos de energía. Cuando la radiación incide sobre los cristales, los electrones removidos quedan atrapados en los pozos.



### **3. NORMA ISO 4037**

La operación exitosa de cualquier proceso depende de la exactitud y el funcionamiento en la medición de los haces de rayos X. La calibración de un equipo de rayos X ayuda a asegurar que el proceso opera dentro de las especificaciones y que se produzca un producto de calidad. El propósito de normar los haces es el de obtener aproximadamente la misma forma del espectro, ya que al utilizar las mismas condiciones (kV, mA, tiempo, etc) en dos equipos distintos no se garantiza que se produzcan los mismos espectros.

El hecho de tener un espectro continuo introduce una complejidad enorme al problema de la caracterización de los haces puesto que los procedimientos de espectroscopia son difíciles de realizar tanto en equipamiento como en tiempo. Como resultado de lo anterior es necesario buscar un método alternativo que permita conocer las propiedades de un espectro de radiación electromagnética de rayos X, en función de la diferencia de potencial aplicada en el tubo generador.

Ciertas características intrínsecas de un espectro de radiación electromagnética como la energía máxima, energía media y energía promedio están relacionadas con la capacidad de penetración que el mismo presenta; de ésta cuenta es posible obtener los valores propios de energía, para un determinado haz, mediante el estudio de su capacidad de penetración.

### 3.1. Definiciones básicas y conceptos generales

#### 3.1.1. Energía media, $\bar{E}$

Expresada por la fórmula:

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{E \max} \phi \cdot E \cdot dE}{\int_0^{E \max} \phi \cdot dE} \quad (3.1)$$

Donde E es el campo eléctrico y  $\phi$  es el flujo eléctrico.

$$\text{donde, } \phi = \frac{\partial \phi(E)}{\partial E} \quad (3.2)$$

#### 3.1.2. Resolución espectral, $R_e$

Expresada en porcentaje y definida por la fórmula  $R_e = \frac{\Delta E}{E} \times 100$ , donde  $\Delta E$  representa el ancho del espectro correspondiente a la mitad de la ordenada máxima del espectro.

#### 3.1.3. Capa hemirreductora, CHR o *Half Value Layer, HVL*

Es el grosor de un material específico el cual atenúa el haz de radiación a la mitad de su valor original.

#### 3.1.4. Coeficiente de homogeneidad, h

Es la relación entre la primera y la segunda capa hemirreductora expresado por la fórmula:

$$h = \frac{1erHVL}{2doHVL} \quad (3.3)$$

#### 3.1.5. Calidad de la radiación de referencia

Una forma de expresar la calidad o poder de penetración de los rayos X es por medio de la capa hemirreductora o *half value layer*. La capa hemirreductora, CHR o *HVL* es el espesor de un material de referencia que, al ser colocado en el camino del haz de radiación reduce su intensidad a la mitad de su valor original.

Generalmente el material de referencia es aluminio, con una pureza alta del orden del 99.9%. Para energías más altas se utiliza cobre.

La calidad de la radiación filtrada de referencia se caracteriza por medio de los siguientes parámetros internacionales y según la tabla I.

- Energía media del haz expresada en kilo electronvoltio
- La resolución espectral expresada en porcentaje.
- La capa hemirreductora o *half value layer* expresada en milímetros.
- El coeficiente de homogeneidad.



Tabla I. **Parámetros de los tipos de radiación de referencia**

Tipo de radiación	Resolución en %	Coefficiente de
		homogeneidad
Bajo Kerma en aire	18 a 22	1.0
Espectro angosto	27 a 36	0.75 a 1.0
Espectro ancho	48 a 58	0.67 a 0.98
Alto Kerma en aire	No se especifica	0.64 a 0.86

Fuente: **Norma ISO 4037**

En la práctica la calidad de la radiación obtenida depende esencialmente de:

- El alto voltaje del tubo de rayos X.
- El grueso y naturaleza de la filtración total.
- El tipo y naturaleza del blanco.

### **3.1.6. Tipos de radiación de referencia**

La norma ISO 4037 especifica cuatro series de radiación de referencia en la cual cada serie se caracteriza por la resolución del espectro.

- Espectro angosto o *narrow-spectrum*.
- Espectro ancho o *wide-spectrum*.
- Bajo *Kerma* en aire.
- Alto *Kerma* en aire.

Tabla II. **Parámetros de la radiación de espectro angosto**

Voltaje en (kV)	Filtración adicional en (mm)			1 <sup>er</sup> HVL en mm de cobre	2 <sup>do</sup> HVL en mm de cobre
	Plomo	Estaño	Cobre		
40	-	-	0.21	0.084	0.091
60	-	-	0.6	0.23	0.26
80	-	-	2.0	0.58	0.62
100	-	-	5.0	1.11	1.17
120	-	1.0	5.0	1.71	1.77
150	-	2.5	-	2.36	2.47
200	1.0	3.0	2.0	3.99	4.05
250	3.0	2.0	-	5.19	5.23
300	5.0	3.0	-	6.12	6.15

Fuente: **Norma ISO 4037**

El espectro angosto es el que posee la resolución más pequeña y se debe utilizar para medidas de la variación de la respuesta de un instrumento a la energía de los fotones. La radiación de referencia alto *Kerma* en aire es recomendado para determinar las características de sobrecarga de algunos instrumentos. Los espectros angostos tienen la característica de que por ser más angostos la energía es casi constante, es decir, son mono-energéticos. Al realizar el análisis con el espectro angosto se tiene una respuesta más confiable.

La radiación de referencia bajo *Kerma* en aire, el espectro angosto y el espectro ancho deben verificarse, por medio de espectroscopia, el valor medio de la energía producida entre un  $\pm 3\%$  y la resolución del espectro entre un  $\pm 10\%$  de los valores establecidos por la norma.

Cuando en el laboratorio no exista un sistema de espectroscopia se utilizará otro método para su obtención, verificándolo en las tablas que a continuación se presentan.

Tabla III. **Parámetros de la radiación de espectro ancho**

Voltaje en (kV)	Filtración adicional en (mm)		1 <sup>er</sup> HVL	2 <sup>do</sup> HVL
	Estaño	Cobre		
60	-	0.3	0.18	0.21
80	-	0.5	0.35	0.44
110	-	2.0	0.96	1.11
150	1.0	-	1.86	2.10
200	2.0	-	3.08	3.31
250	4.0	-	4.22	4.40
300	6.5	-	5.19	5.34

Fuente: Norma ISO 4037

Tabla IV. **Parámetros de la radiación de bajo *Kerma* en aire**

Voltaje en (kV)	Filtración adicional en (mm)			1 <sup>er</sup> HVL en mm
	Plomo	Estaño	Cobre	
35	-	-	0.3	2.2 Al
55	-	-	1.2	0.25 Cu
70	-	-	2.5	0.49 Cu
100	-	2.0	0.5	1.24 Cu
125	-	4.0	1.0	2.04 Cu
170	1.5	3.0	1.0	3.47 Cu
210	3.5	2.0	0.5	4.61 Cu
240	5.5	2.0	0.5	5.32 Cu

Fuente: Norma ISO 4037

Tabla V. **Parámetros de la radiación de alto Kerma en aire**

Voltaje en (kV)	1 <sup>er</sup> HVL	
	en mm de Al	en mm de Cu
10	0.04	-
20	0.11	-
30	0.35	-
60	2.4	0.077
100	-	0.29
200	-	1.7
250	-	2.5
280	-	3.4
300	-	3.4

Fuente: **Norma ISO 4037.**

### **3.2. Condiciones para la producción de radiación de referencia**

#### **3.2.1. Características de la unidad de rayos X**

- Los rayos X deben de ser producidos por una unidad de potencial constante. Se recomienda desplegar el valor de potencial con una incerteza  $\pm 1\%$ .
- El blanco o ánodo del equipo de rayos X debe estar construido de tungsteno, el cual debe estar orientado en un ángulo no menos de 20° grados sexagesimales.

### **3.2.2. La filtración**

La filtración total está compuesta por la filtración fija más la filtración adicional.

#### **3.2.2.1. La filtración fija**

Se debe a la filtración inherente al equipo, más la debida a la cámara de ionización monitora, y si es necesario más los filtros de aluminio. Ellos se añaden para obtener una filtración fija total de 4mm de aluminio. Estos filtros o láminas de aluminio deben colocarse antes de la filtración adicional para reducir la radiación de fluorescencia.

La filtración inherente del equipo se debe a varios elementos como por ejemplo, el vidrio de la cápsula, el aceite refrigerante y la ventana. La filtración inherente está expresada en milímetros de aluminio con una pureza del 99.9%, que atenúa al 50% el haz de radiación, sin filtración adicional, para un valor de voltaje de 60kV.

Un tubo de rayos X que tenga una filtración inherente mayor de 3.5mm de aluminio no se debería de utilizar.

La medición de la filtración inherente se debe de efectuar de manera que la radiación de dispersión que producen las capas de aluminio no alcance al detector de rayos X. Las láminas de aluminio deben ser colocadas en forma equidistante al tubo de rayos X y al detector de radiación. La distancia que debe haber entre las láminas de aluminio y el detector debe ser por lo menos cinco veces el diámetro del haz en el detector.

El valor de la filtración inherente expresada en milímetros de aluminio varía en función de la energía, de tal forma que depende del material que constituye la filtración inherente. Dicha filtración debe ser revisada periódicamente para asegurar que el límite establecido de 3.5mm no sea alcanzado.

### **3.2.2.2. La filtración adicional**

La filtración adicional para el espectro angosto, espectro ancho y para bajo Kerma en aire se especifica con láminas de plomo, estaño y cobre según las tablas II, III y IV.

### **3.3. Método para establecer la radiación de referencia**

El siguiente método es para laboratorios que no tengan la capacidad de medir el espectro. Si se encuentra que las capas hemirreductoras concuerdan con las que establece la norma, se puede decir que esencialmente tenemos un haz de rayos X de buena calidad y se recomienda, según estándares internacionales. Este método no es aplicable para la radiación de referencia alto *Kerma* en aire.

#### **3.3.1. Medición de las capas hemirreductoras CHR o HVL**

Si la primera y segunda capa hemirreductora *HVL* en un material son iguales para dos haces de rayos X, entonces estos haces se consideran substancialmente de la misma calidad (1-15).

### **3.3.1.1. Equipo necesario**

Este consiste en el detector mismo y el equipo de medición, permitiéndose una habilidad de repetición de al menos un 0.3% de acuerdo a la norma ISO 3504. El detector debe ser una cámara de ionización que tenga una variación pequeña como función de la energía de los fotones.

El equipo de medición y la manera de su uso debe ser acorde con las recomendaciones de la norma ISO 8963. Se recomienda utilizar una cámara monitora para poder verificar cualquier cambio que pueda suceder.

### **3.3.1.2. Procedimiento de medición**

Para la radiación de referencia escogida se debe aplicar las condiciones de las tablas II, III y IV. Después de realizar las mediciones se debe realizar un gráfico y mediante interpolación del mismo, encontrar el valor de la primera y segunda capa hemirreductora.

### **3.3.1.3. Interpretación de los resultados**

Si los valores de la primera y segunda capa hemirreductora concuerdan en un  $\pm 5\%$  según las tablas II, III y IV, se debe de asumir que la calidad de la radiación de referencia está dentro de los límites que permiten los estándares internacionales. Si este no es el caso el voltaje utilizado se debe reajustar y repetir las mediciones hasta que se cumpla el criterio del 5%.

## **4. MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO DE RAYOS X**

La calibración es la medición exacta y la comparación de las entradas y salidas de un instrumento contra un patrón conocido. A través de una interpretación adecuada de los resultados de esa comparación, pueden ser identificados y corregidos errores en los instrumentos. La calibración, cuando simula las mediciones del proceso actual, es el procedimiento usado para ajustar un instrumento y dejarlo dentro de las especificaciones del fabricante. La calibración de instrumentos puede ser necesaria después de cambios en los parámetros del proceso.

Antes de iniciar con la calibración del equipo, siempre es recomendable hacer una inspección física visual del equipo. Es bueno comprobar que todos los indicadores, dispositivos de enclavamiento, los movimientos y frenos del tubo de rayos X funcionen correctamente. También se debe realizar una inspección de los cables de alto voltaje y su protección. Además, compruebe que el funcionamiento del sistema intercambiable de filtros funcione correctamente de manera que cumpla su objetivo de evitar errores en la selección del filtro.

En lo que a seguridad eléctrica se refiere, se recomienda verificar que el cableado se encuentre en buenas condiciones y no existan aislantes deteriorados ni conectores en malas condiciones. Verificar que el sistema de refrigeración funcione y que el fluido refrigerante se encuentre en la calidad y cantidad adecuado.



En seguridad radiológica se debe de revisar la puerta de acceso al recinto, que exista y funcione bien algún mecanismo que detenga la irradiación en caso de ser abierta o que se impida la emisión de rayos X si no ha sido cerrada.

Es muy importante el conocimiento del nivel de radiación de fuga, esto es un requisito de diseño en un equipo de rayos X. Es necesario medirlo y compararlo para que no exceda los valores permitidos. Esta medición es necesaria para conocer el lugar exacto por el cual pueda fugarse radiación en cantidades superiores al valor permisible.

En cualquier proceso experimental en donde se hagan mediciones, a mayor número de medidas, el error experimental se reduce. La precisión con la cual se trabaje dependerá de la confiabilidad de los resultados. La corriente del tubo de rayos X se selecciona en base a la sensibilidad del equipo de medición y a la potencia del generador de rayos X. Para la determinación de las capas hemirreductoras y de la tasa de *Kerma* es necesario agregar la filtración adicional según la tabla II del capítulo 3.

#### **4.1. Determinación de la calidad de los rayos X**

Los rayos X, como se ha mencionado, son radiaciones electromagnéticas. Entre mayor sea su energía, es decir, menor su longitud de onda, su poder de penetración será mayor, aunque sus cualidades físicas sean esencialmente las mismas.

El espectro angosto o *narrow spectrum* que será de nuestro interés a lo largo de este manual, es el que posee la resolución más baja. En el caso de que algún laboratorio no posea espectroscopia, se deberá utilizar el método que a continuación se describe.

## **4.1.2. Procedimiento experimental**

### **4.1.2.1. Equipo necesario**

- Detector de rayos X o cámara de ionización.
- Una cámara monitora, la cual nos indique si ocurren cambios en el equipo de rayos X, permitiendo asegurarnos que el equipo irradie constantemente. La cámara monitora se debe de colocar en alguna posición que reciba radiación, pero evitando que interfiera con el haz de rayos X.
- Dos electrómetros nos indicarán la lectura obtenida en unidades de  $\eta\text{C}$  por unidad de tiempo; por la cámara de ionización así como de la cámara monitora.
- Láminas de aluminio y cobre de varios espesores con una pureza del 99.9% servirán para atenuar el haz de rayos X.

### **4.1.2.2. Medición de la filtración inherente**

Se procede a medir con un voltaje de 60kV y colocar el detector de rayos X a una distancia de 2 metros de la fuente alineándolo exactamente en la dirección del haz. Para la medición de la filtración inherente no se utiliza filtración adicional. Se procede a irradiar.

Se irán colocando láminas de aluminio de distinto grosor para atenuar la intensidad del haz de rayos X en un 50%. Es probable que no se disponga del espesor exacto que atenúe el haz al 50%, por ello que se recomienda realizar varias mediciones para poder interpolar gráficamente el grosor de la lámina de aluminio. El grosor de la lámina que atenúe el haz en un 50% será la filtración inherente. Se deben de verificar los datos según la sección 3.2.2.1.

#### 4.1.2.3. Determinación de las capas hemirreductoras

Se procede a realizar el mismo mecanismo para los kilo-voltajes o calidades de haces. Para fines prácticos se denominará las calidades de haces como N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150, N-200, N-250 y N-300. La literal N significa que se estará trabajando con los espectros angostos o *narrow spectrum*, el número que le sigue es el kilo-voltaje utilizado.

Colocar el detector de rayos X a una distancia de 2 metros de la fuente y confirmar que el detector esté justamente en la dirección del haz, es decir, alinearlos en la vertical y horizontal.

La primera capa hemirreductora o el 1<sup>er</sup> *HVL*, es el espesor de la lámina de cobre que atenúe al 50% ó a la mitad el valor original. El 2<sup>do</sup> *HVL* es el espesor de la lámina de cobre que atenúe al 25% ó a un cuarto el valor original de la intensidad del haz de rayos X. Los datos se deben de corroborar con la tabla II del capítulo 3.

Es de esperarse que no se disponga del espesor exacto que atenúe el haz al 50% y 25%, es por eso que se recomienda elaborar varias mediciones para poder interpolar gráficamente el grosor de la lámina de aluminio.

Si los valores de la primera y segunda capa hemirreductora concuerdan según la tabla II del capítulo 3 en un  $\pm 5\%$  se asume, según la norma ISO 4037, que la calidad de la radiación está dentro de los estándares internacionales.

## **4.2. Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo**

### **4.2.1. Procedimiento experimental**

Este tipo de medición se debe de hacer para cada una de las calidades de radiación mencionadas anteriormente, es decir para N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150, N-200, N-250 y N-300. El equipo a utilizar es el mismo que se menciona en el inciso 4.1.2.1.

Colocar el detector de rayos X a una distancia de 2 metros de la fuente y confirmar que el detector esté justamente en la dirección del haz, es decir, alinearlos en la vertical y horizontal.

Se procede a irradiar para cada calidad de haz, variando la corriente del tubo dentro de los límites permitidos por el equipo. Tratar de medir la mayor cantidad de datos tomando intervalos pequeños de la variación de la corriente del equipo. Con los datos obtenidos para varias corrientes diferentes se calcula para cada una de ellas la tasa de *Kerma* en  $\mu\text{Gy/h}$ .

Para la medición de la tasa de *Kerma* se debe tomar datos de presión y temperatura periódicamente. Después se procede a corregir las lecturas por un factor temperatura-presión.

Por último, se procede a elaborar gráficas que representen el comportamiento de la tasa de *Kerma* contra la corriente del tubo.

### **4.3. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia**

Los rayos X son ondas electromagnéticas, éstas son campo eléctrico y magnético oscilando y variando en el tiempo.

Si llamamos R a la distancia que hay entre la fuente de rayos X y el punto en donde se desea conocer la intensidad del haz, las gráficas obtenidas de la dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia, serán afectadas por el factor  $1/R^2$  conocido también por la ley del Inverso Cuadrado, el cual gráficamente es una hipérbola.

#### **4.3.1. Procedimiento experimental**

La medición de la dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia se realiza para las calidades N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150, N-200, N-250 y N-300 con filtración adicional.

El equipo a utilizar es el mismo que se menciona en el inciso 4.1.2.1. Se establece la corriente del tubo, la posición vertical y horizontal del detector de rayos X constante. Se establece una escala en una dirección en la cual se pueda alejar en línea recta el detector de la fuente. Se procede a irradiar para cada kilo-voltaje variando la posición fuente-detector de rayos X y anotando las lecturas obtenidas. Con los datos obtenidos se parte a elaborar gráficas y a comprobar la ley del Inverso Cuadrado.

#### **4.4. Comprobación del campo de radiación**

La uniformidad del campo de radiación es recomendable que se compruebe para cada uno de los dos ejes: horizontal y vertical. Una prueba más completa del campo de radiación se alcanza mediante la realización de los perfiles. El tamaño del campo de radiación está definido por la curva del 50% de intensidad respecto al centro del campo.

Los resultados que se obtengan de la medición del perfil horizontal y vertical estarán afectados por la configuración del equipo. La medición del perfil horizontal y vertical se realiza para los kilo-voltajes 40, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 250 y 300 sin filtración adicional. El equipo a utilizar para la realización de los perfiles es el mismo que se menciona en el inciso 4.1.2.1.

##### **4.4.1. Procedimiento experimental para la determinación del perfil horizontal**

Se establece la corriente del tubo, la posición vertical y la distancia fuente-detector constante. Se crea una escala en el eje horizontal, positiva y negativa, con la cual nos permita variar la posición del detector de rayos X. Se procede a irradiar para cada kilo-voltaje variando la posición horizontal del detector de rayos X y anotando las lecturas obtenidas.

Con los datos adquiridos se elaboran gráficas del perfil horizontal para determinar el tamaño del mismo. Opcionalmente se pueden repetir las mediciones variando la distancia fuente-detector, para compararlas.

#### **4.4.2. Procedimiento experimental para la determinación del perfil vertical**

Se establece la corriente del tubo, la posición horizontal y distancia fuente-detector constante. Se determina una escala en el eje vertical, positiva y negativa, la cual nos permita variar la posición del detector de rayos X

Se procede a irradiar para cada kilo-voltaje, variando la posición vertical del detector de rayos X y anotando las lecturas obtenidas. Con los datos obtenidos se comienza a elaborar gráficas del perfil vertical y determinar el tamaño del mismo.

## **5. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE UN EQUIPO DE RAYOS X**

El equipo de rayos X que se calibró es marca Pantak, modelo HF225 y serie 01036535. El tubo de rayos X puede ser sometido a un kilo-voltaje de 5kV-225kV, una corriente de 0.5mA-30mA y una potencia máxima de 3000 *Watts*. Según datos del fabricante, el equipo posee una exactitud del  $\pm 1\%$  y una repetibilidad del  $\pm 0.03\%$ .

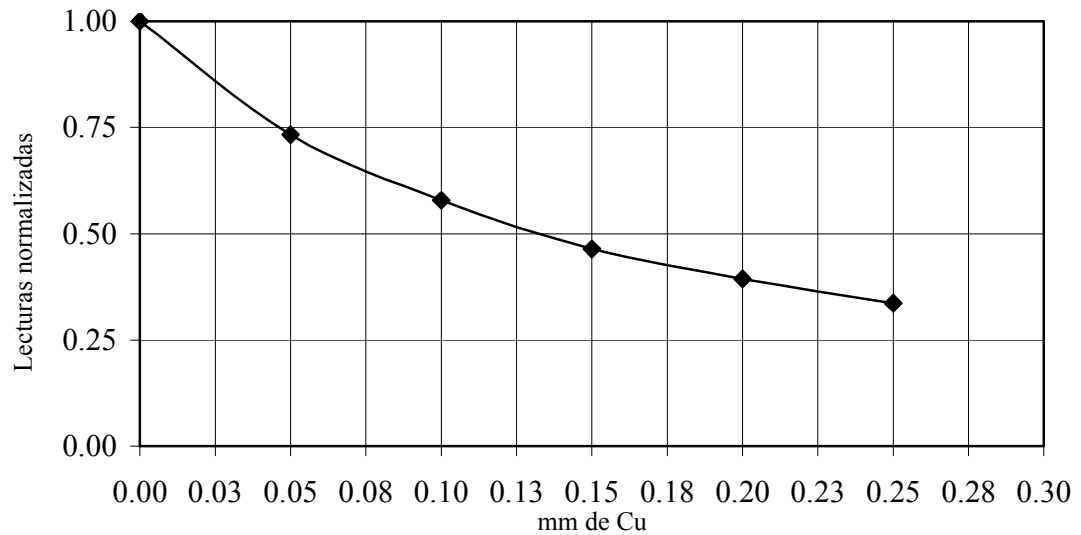
### **5.1. Determinación de la filtración inherente del equipo**

Se determinó la filtración inherente del equipo según el procedimiento del inciso 4.1.2.2. y el resultado se muestra mediante la figura 15. Se realizó la interpolación de la gráfica y se obtuvo una filtración inherente de 0.134mm de aluminio.

El resultado está dentro de lo que la norma nos sugiere; que no debe de exceder 3.5mm de aluminio. Podemos asegurar que la filtración inherente del equipo cumple con esto. Las lecturas obtenidas fueron originalmente en  $\eta\text{C}/\text{min}$ , pero se normalizaron de acuerdo a la más alta, para así facilitar el proceso de obtención del resultado.



Figura 15. **Determinación de la filtración inherente al equipo de rayos X**



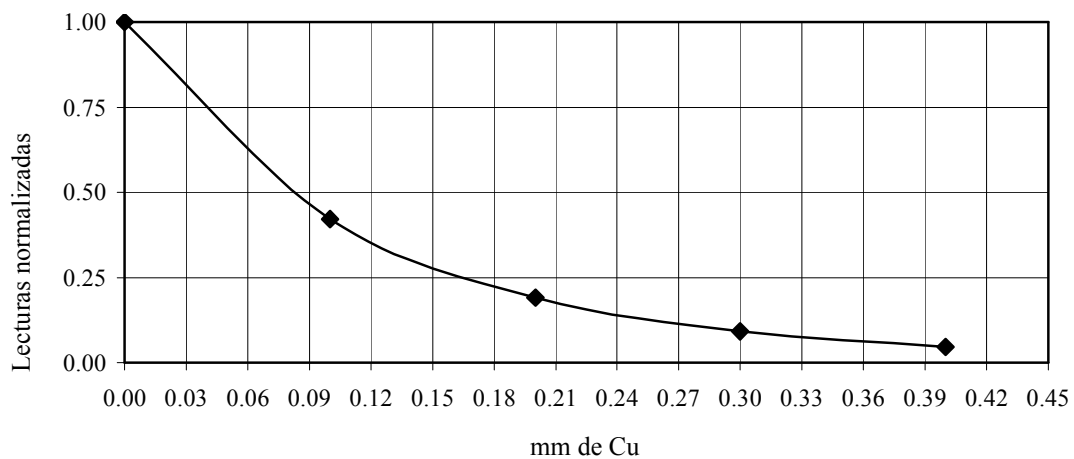
## 5.2. **Determinación de la capa hemirreductora o *HVL***

Se comprobó la calidad de los rayos X sólo para las calidades N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150 y N-200 según el procedimiento del inciso 4.1.2.3. Las otras calidades restantes no se realizaron ya que el equipo no lo permitía. Se atenuó el haz de rayos X con láminas de cobre con una pureza del 99.9%. Se trabajó con la filtración adicional necesaria para cada calidad.

Las lecturas obtenidas fueron originalmente en  $\eta\text{C}/\text{min}$  pero se normalizaron a la lectura más alta para obtener los resultados más fácilmente. Los resultados se interpolaron gráficamente.

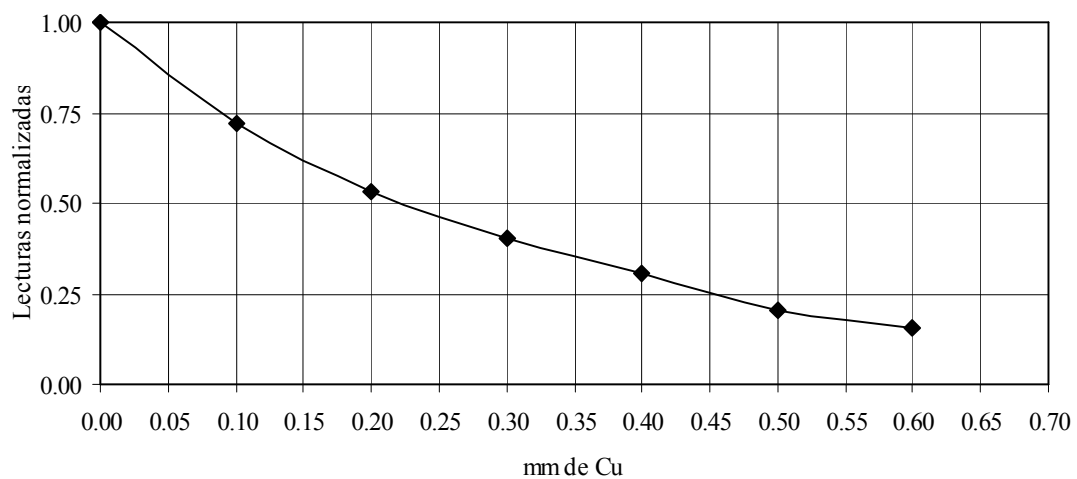
Para la calidad N-40 se encontró mediante la figura 16 que el 1<sup>er</sup>  $HVL=0.08\text{mm}$  y el 2<sup>do</sup>  $HVL=0.08\text{mm}$ , los dos de cobre.

Figura 16. **Medición de la capa hemirreductora calidad N-40**



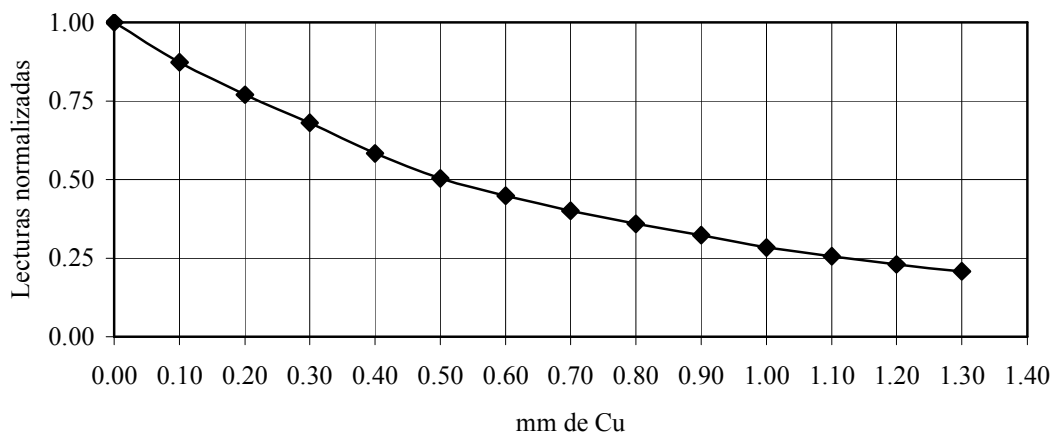
Para la calidad N-60 se encontró mediante la figura 17 que el 1<sup>er</sup>  $HVL=0.22\text{mm}$  y el 2<sup>do</sup>  $HVL=0.22\text{mm}$ , los dos de cobre.

Figura 17. **Medición de la capa hemirreductora calidad N-60**



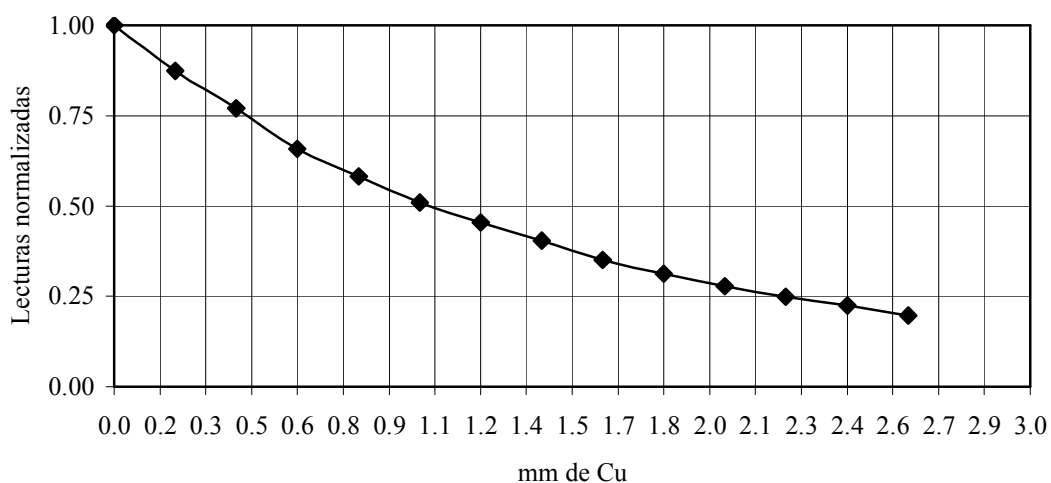
Para la calidad N-80 se encontró mediante la figura 18 que el 1<sup>er</sup>  $HVL=0.5\text{mm}$  y el 2<sup>do</sup>  $HVL=0.62\text{mm}$ , los dos de cobre.

Figura 18. **Medición de la capa hemirreductora calidad N-80**



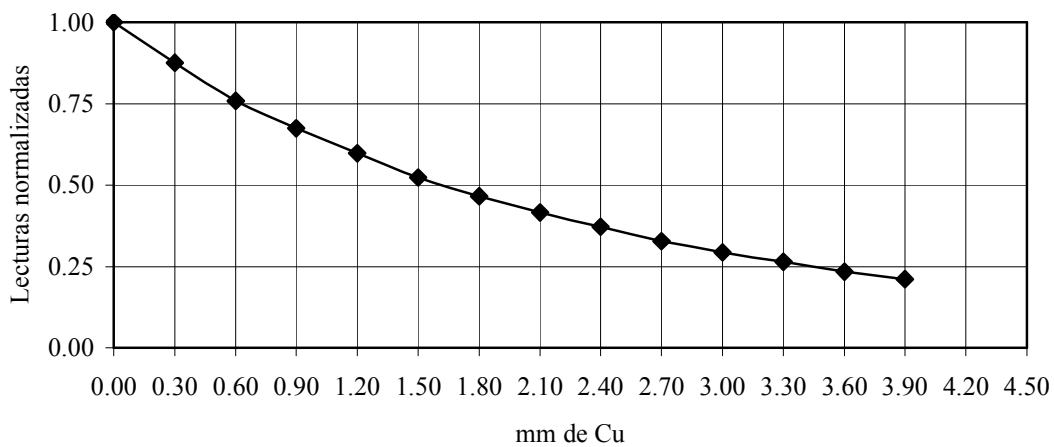
Para la calidad N-100 se encontró mediante la figura 19 que el 1<sup>er</sup>  $HVL=1.07\text{mm}$  y el 2<sup>do</sup>  $HVL=1.1\text{mm}$ , los dos de cobre.

Figura 19. **Medición de la capa hemirreductora calidad N-100**



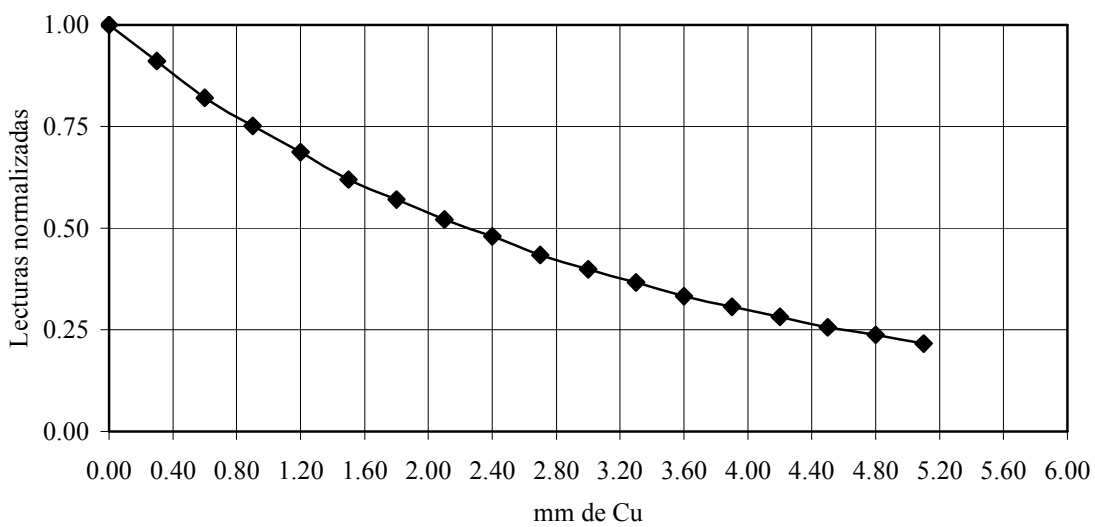
Para la calidad N-120 se encontró mediante la figura 20 que el 1<sup>er</sup>  $HVL=1.61\text{mm}$  y el 2<sup>do</sup>  $HVL=1.82\text{mm}$ , los dos de cobre.

Figura 20. **Medición de la capa hemirreductora calidad N-120**



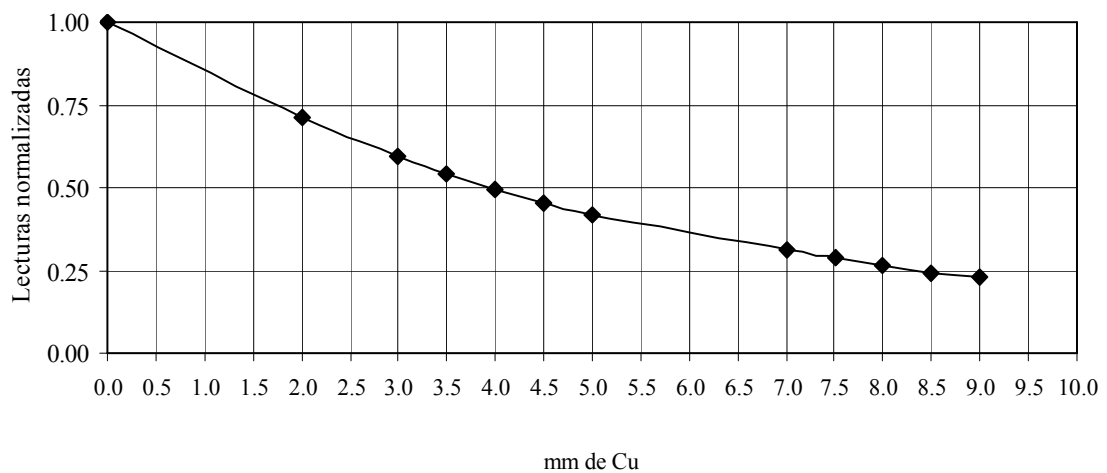
Para la calidad N-150 se encontró mediante la figura 21 que el 1<sup>er</sup>  $HVL=2.25\text{mm}$  y el 2<sup>do</sup>  $HVL=2.35\text{mm}$ , los dos de cobre.

Figura 21. **Medición de la capa hemirreductora calidad N-150**



Para la calidad N-200 se encontró mediante la figura 22 que el 1<sup>er</sup>  $HVL=4\text{mm}$  y el 2<sup>do</sup>  $HVL=4.31\text{mm}$ , los dos de cobre.

Figura 22. **Medición de la capa hemirreductora calidad N-200**



Como se puede observar para las calidades N-40 y N-60 los resultados varían afuera del 5% recomendado. Las otras calidades de haz sí cumplen con el criterio del 5% de variación. La razón de esto es que a mayor voltaje, mayor penetración de los electrones y como son acelerados con mayor energía cinética hay menos dispersión del haz. Otra razón de la variación de los resultados se debe a que el kilo-voltaje utilizado no fue siempre constante, hubo variaciones pequeñas pero significativas en los resultados.

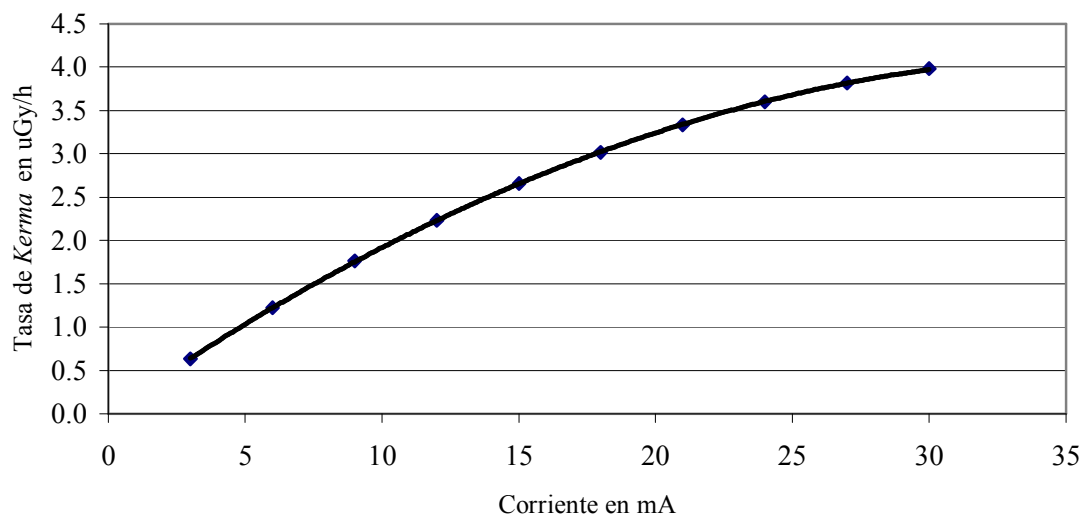
### 5.3. Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo

Se determinó la tasa de *Kerma* de los rayos X sólo para las calidades N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150 y N-200 según el procedimiento del inciso 4.2. Las otras calidades restantes no se realizaron, ya que el equipo no lo permitía. Las lecturas obtenidas por los electrómetros fueron en  $\eta\text{C}/\text{min}$  pero para obtener tasa de *Kerma* se convirtieron estos valores a  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ . La corriente del tubo fue medida en mili amperios. Se trabajó con la filtración adicional necesaria para cada calidad.

Como resultado se obtuvieron gráficas para las diferentes calidades y se agregó una línea de tendencia con su respectivo tipo de curva que fue una parábola, además se incluyó su coeficiente de correlación.

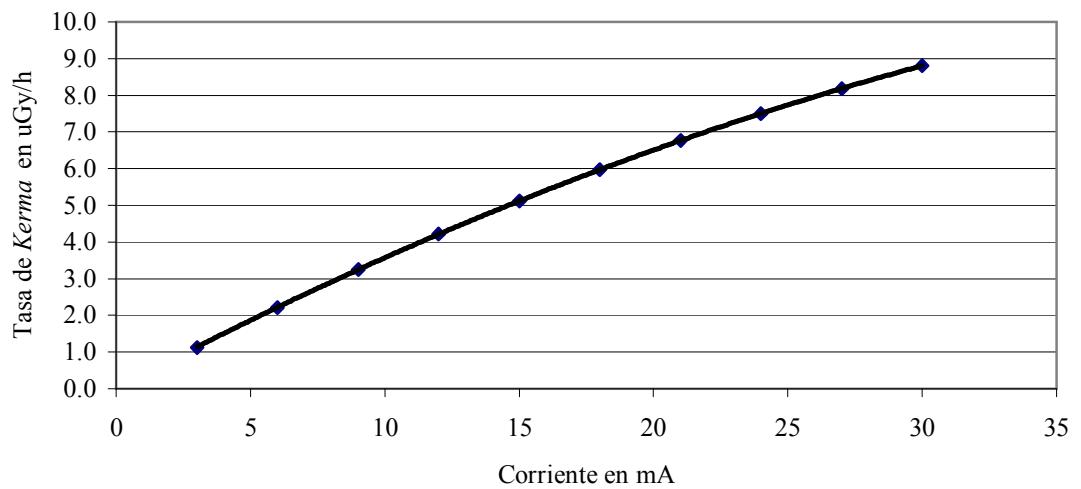
Para la calidad N-40, según la figura 23 se obtuvo la curva parabólica  $K = -10.8\text{mA}^2 + 796.68\text{mA}$ , con un coeficiente de correlación  $R = 1.000$

Figura 23. Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo calidad N-40



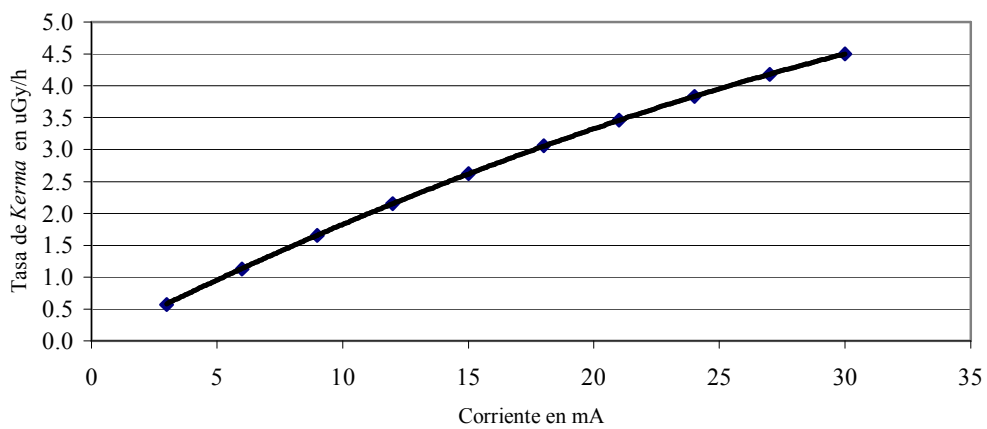
Para la calidad N-60, según la figura 24 se obtuvo la curva parabólica  $K = -11.52mA^2 + 1401.12mA$ , con un coeficiente de correlación  $R = 1.000$

Figura 24. **Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo calidad N-60**



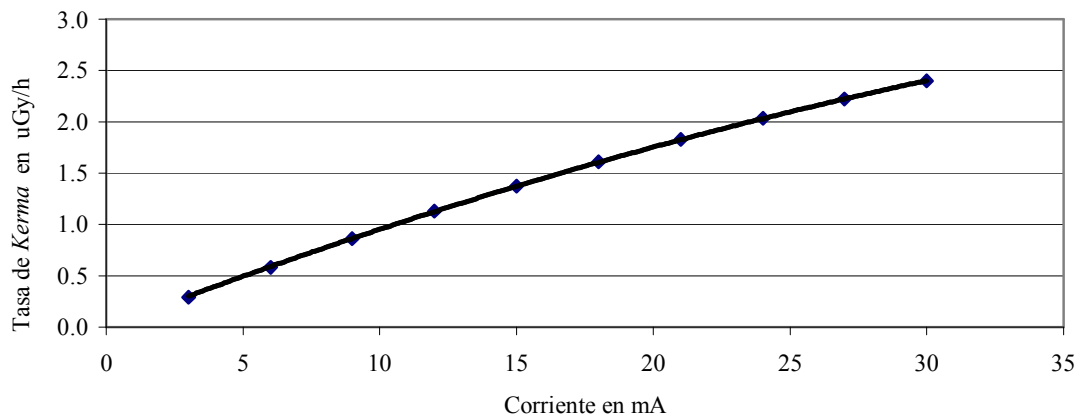
Para la calidad N-80, según la figura 25 se obtuvo la curva parabólica  $K = -5.76mA^2 + 716.04mA$ , con un coeficiente de correlación  $R = 1.000$

Figura 25. **Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo calidad N-80**



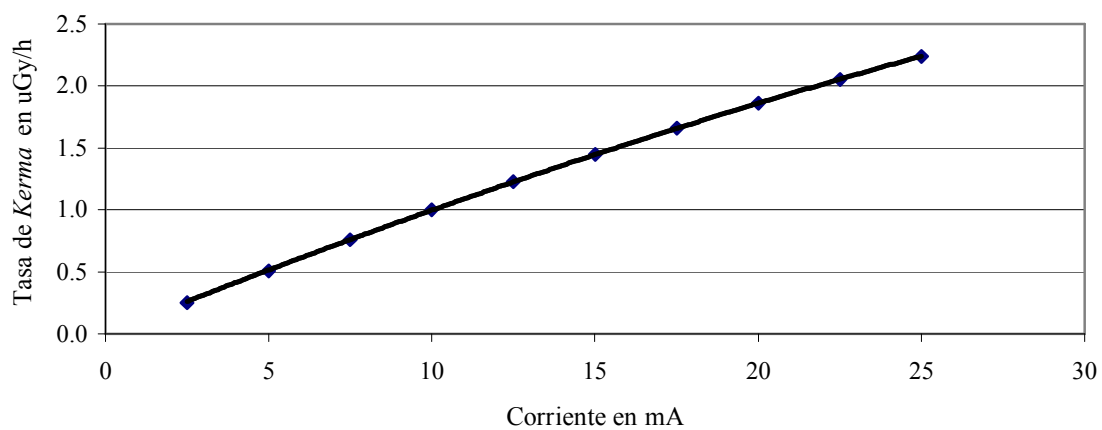
Para la calidad N-100, según la figura 26 se obtuvo la curva parabólica  $K = -2.88\text{mA}^2 + 370.44\text{mA}$ , con un coeficiente de correlación  $R = 1.000$

Figura 26. **Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo calidad N-100**



Para la calidad N-120, según la figura 27 se obtuvo la curva parabólica  $K = -2.52\text{mA}^2 + 383.76\text{mA}$ , con un coeficiente de correlación  $R = 1.000$

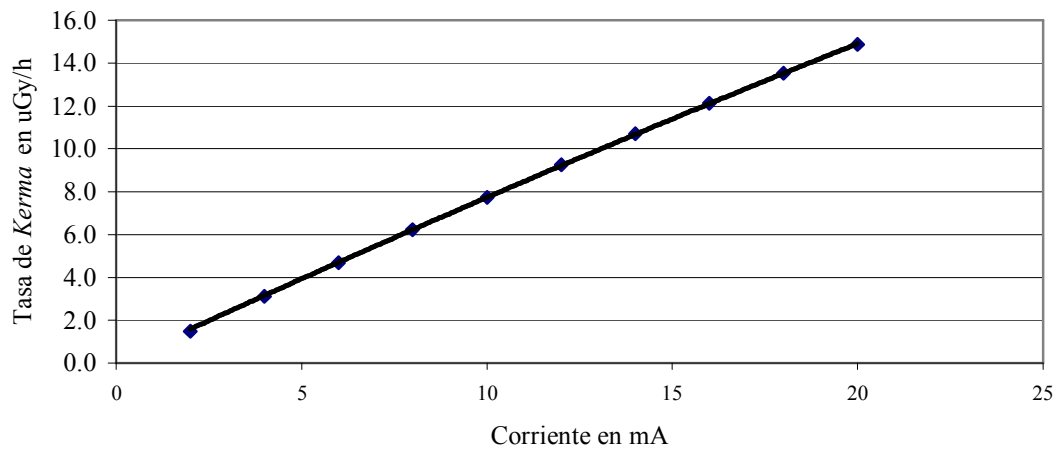
Figura 27. **Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo calidad N-120**





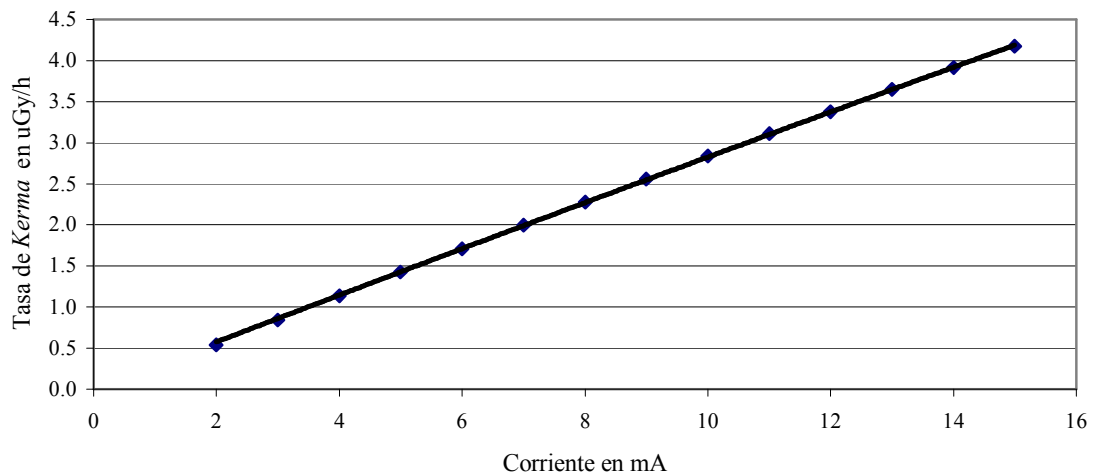
Para la calidad N-150, según la figura 28 se obtuvo la curva parabólica  $K = -10.08mA^2 + 2884.32mA$ , con un coeficiente de correlación  $R = 0.999$ .

Figura 28. **Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo calidad N-150**



Para la calidad N-200, según la figura 29 se obtuvo la curva parabólica  $K = -2.16mA^2 + 1040.04mA$ , con un coeficiente de correlación  $R = 0.999$ .

Figura 29. **Medición de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo calidad N-200**



En las gráficas de Tasa de *Kerma* con la corriente del tubo se puede notar que la dependencia es una curva polinomial de segundo orden. Se puede observar que mientras el voltaje crece la curva tiende a ser una línea recta.

#### 5.4. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia

Se determinó la dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia del equipo de rayos X sólo para las calidades N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150 y N-200 según el procedimiento del inciso 4.3.1. Los otros kilo-voltajes restantes no se realizaron, ya que el equipo no lo permitía. Las lecturas obtenidas por los electrómetros fueron en  $\eta\text{C}/\text{min}$ , la intensidad “K” es indirectamente proporcional al cuadrado de la distancia “(d-d<sub>0</sub>)” multiplicado por una constante “K<sub>0</sub>”.

$$K = K_0 \cdot \frac{1}{(d - d_0)^2} \quad (5.1)$$

donde, K es la tasa de *Kerma* en  $\mu\text{Gy}/\text{h}$ .

K<sub>0</sub> es la tasa de *Kerma* a 1m de distancia.

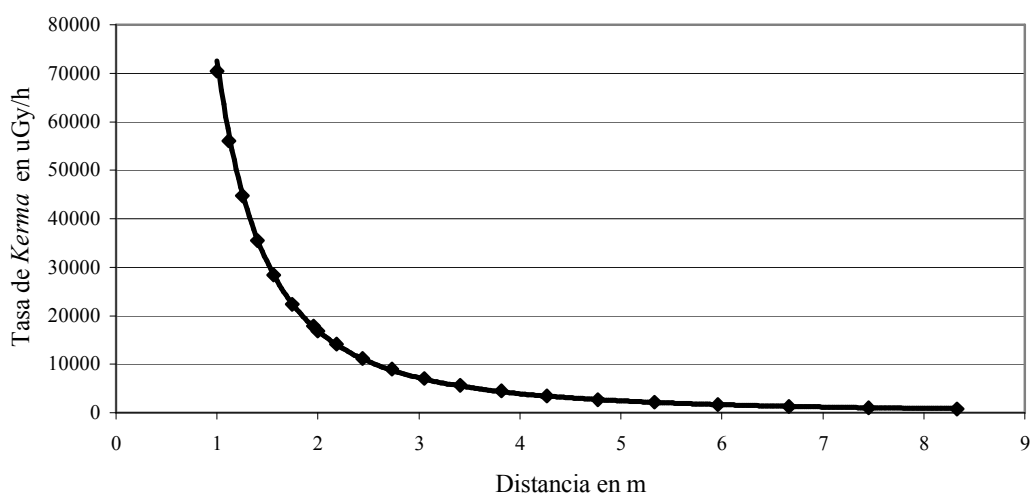
d es la posición del detector y

d<sub>0</sub> es la posición de la fuente.

Para 40kV representada en la figura 30 se encontró la ecuación

$$K = \frac{55998.684}{(d - 0.1871)^2} \text{ con un coeficiente de correlación } R = 0.9993.$$

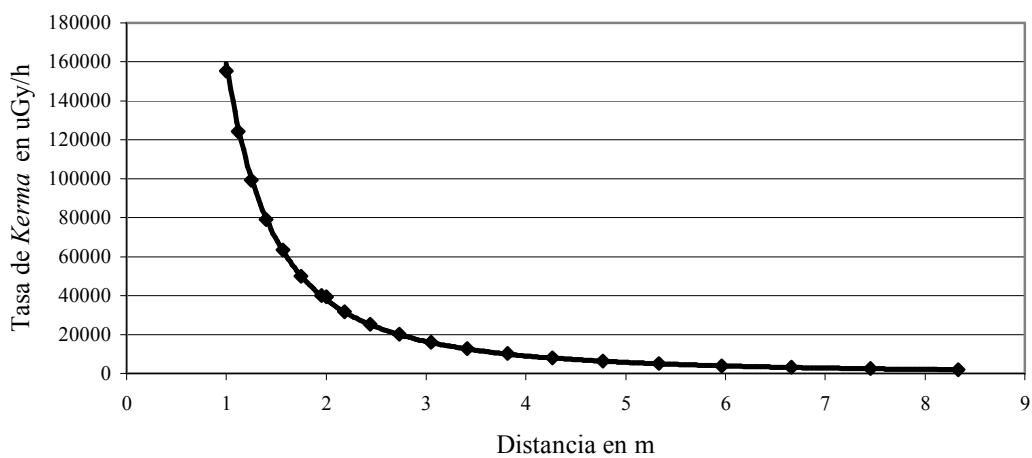
Figura 30. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia a 40kV



Para 60kV representada en la figura 31 se encontró la ecuación

$$K = \frac{132779.845}{(d - 0.134)^2} \text{ con un coeficiente de correlación } R = 0.9996.$$

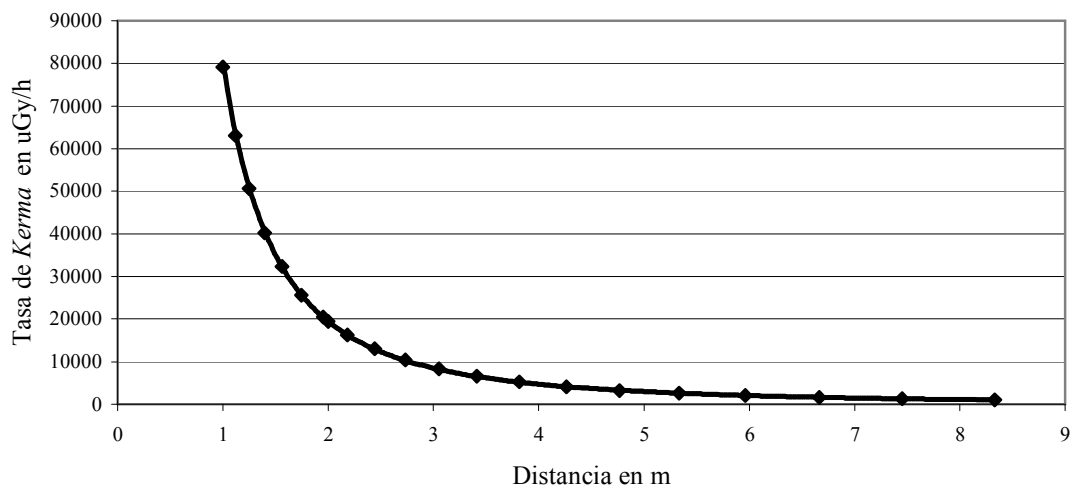
Figura 31. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia a 60kV



Para 80kV representada en la figura 32 se encontró la ecuación

$$K = \frac{70985.406}{(d - 0.0942)^2} \text{ con un coeficiente de correlación } R = 0.9998.$$

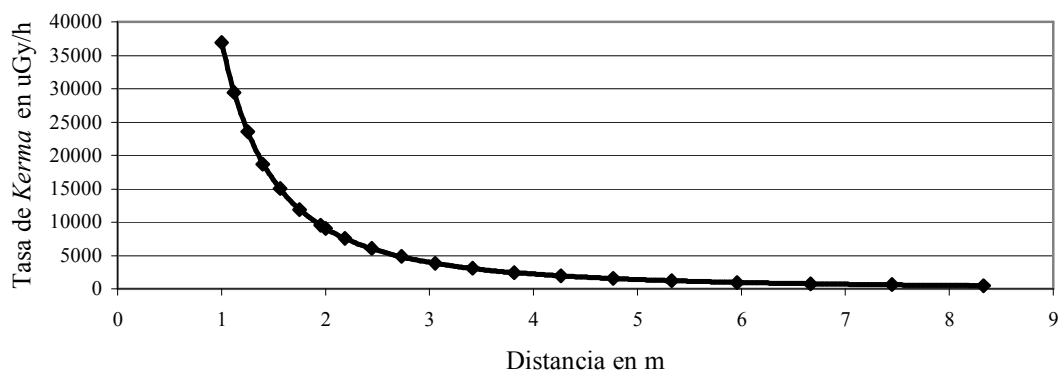
Figura 32. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia a 80kV



Para 100kV representada en la figura 33 se encontró la ecuación

$$K = \frac{38509.074}{(d - 0.0654)^2} \text{ con un coeficiente de correlación } R = 0.9999.$$

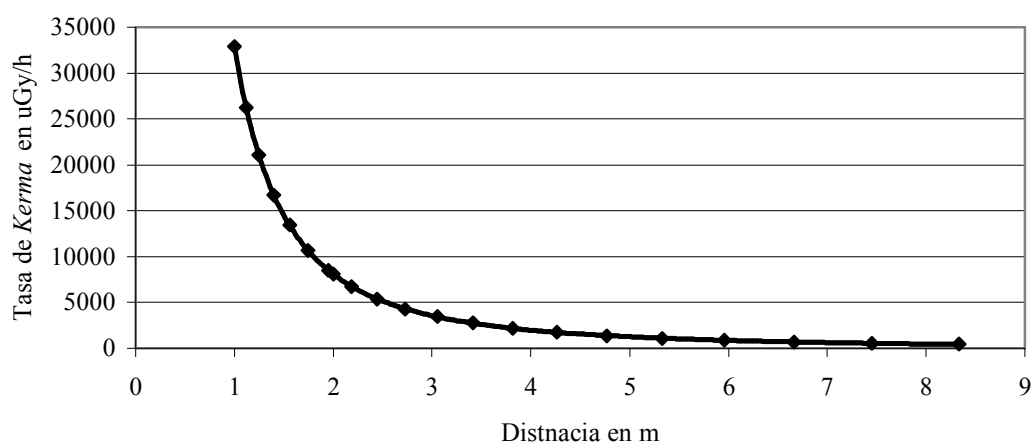
Figura 33. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia a 100kV



Para 120kV representada en la figura 34 se encontró la ecuación

$$K = \frac{30956.654}{(d - 0.044)^2} \text{ con un coeficiente de correlación } R = 1.000.$$

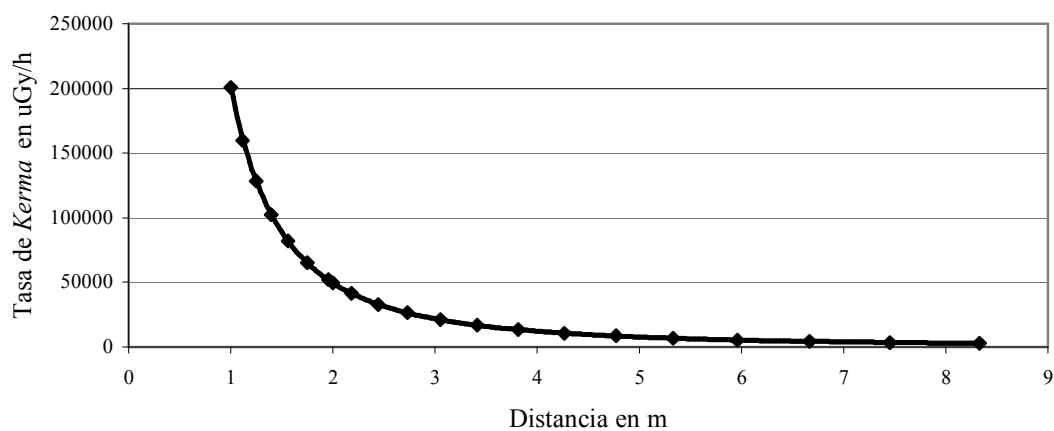
Figura 34. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia a 120kV



Para 150kV representada en la figura 35 se encontró la ecuación

$$K = \frac{191142.299}{(d - 0.0359)^2} \text{ con un coeficiente de correlación } R = 1.000.$$

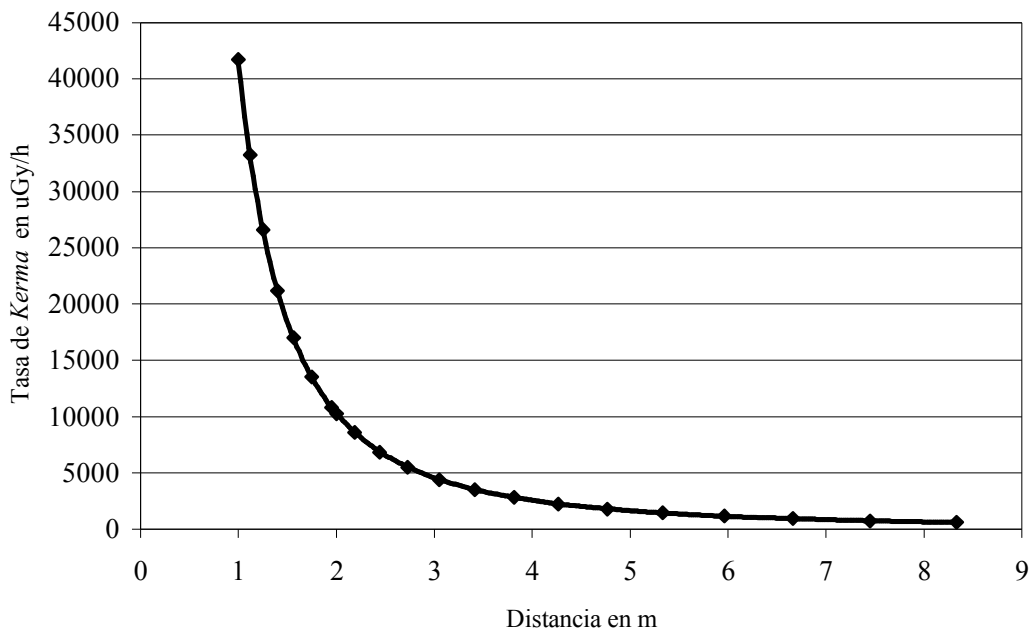
Figura 35. Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia a 150kV



Para 200kV representada en la figura 36 se encontró la ecuación

$$K = \frac{41753.712}{(d - 0.0014)^2} \text{ con un coeficiente de correlación } R = 1.000.$$

Figura 36. **Dependencia de la tasa de *Kerma* respecto a la distancia a 200kV**



### 5.5. Comprobación del campo de radiación

Se determinó el perfil horizontal y vertical del equipo de rayos X sólo para los kilo-voltajes 40, 60, 80, 100, 120, 150, y 200 según el procedimiento de los incisos 4.4.1. y 4.4.2. Los otros kilo-voltajes restantes no se realizaron ya que el equipo no lo permitía. Las lecturas obtenidas por los electrómetros fueron en  $\mu\text{C}/\text{min}$  se normalizaron a la lectura obtenida en el centro de la escala horizontal. El tamaño de los campos de radiación está definido por la curva del 50% de intensidad respecto al centro del campo.

### **5.5.1. Perfil horizontal**

El perfil horizontal para una distancia fuente-detector de 300 centímetros, se determinó un tamaño campo de 70.5 centímetros y para una distancia fuente-detector de 100 centímetros, un tamaño de campo de 23 centímetros. El perfil horizontal se vio influenciado por el efecto Talón, ya que el ánodo o blanco se yace sobre la horizontal. Cuando se utilice el equipo para cualquier calibración o medición será recomendable que se tome en cuenta este efecto, para que se pueda irradiar al máximo.

También es de notarse que el perfil horizontal tiene el mismo valor de intensidad, en una distancia de 300cm ó 100cm de la fuente, en sus extremos. Esto quiere decir, que el perfil empieza y decae en el mismo punto, no importando la distancia de la fuente al detector.

### **5.5.2. Perfil vertical**

Para perfil vertical se determinó un tamaño de campo de 22 centímetros. El perfil vertical resultó ser recto comparado con el horizontal. Esto nos indica que el equipo está irradiando constantemente en la vertical para una distancia vertical de 22 centímetros.

Figura 37. **Medición del perfil horizontal calidad N-40**

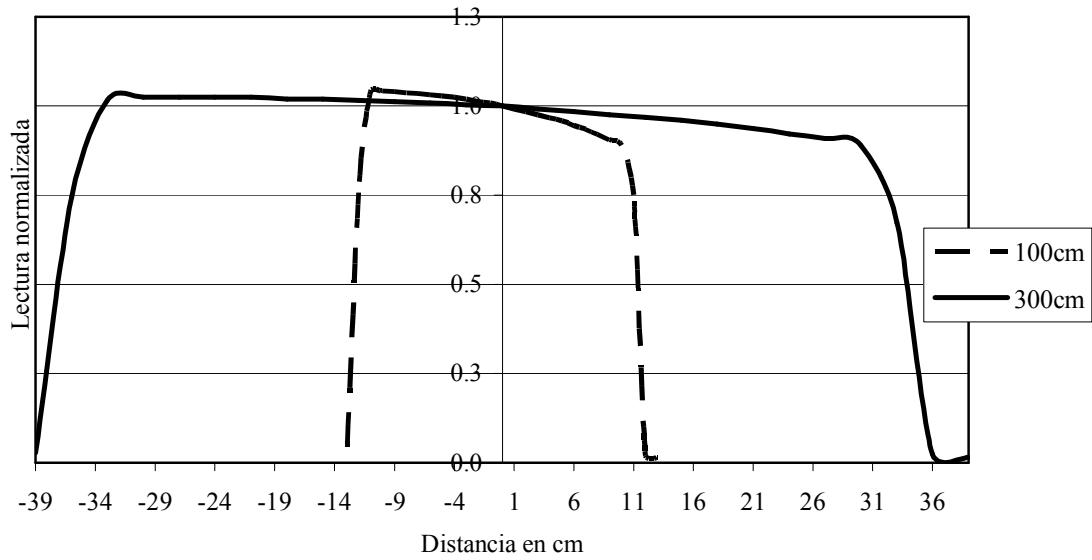


Figura 38. **Medición del perfil vertical calidad N-40**

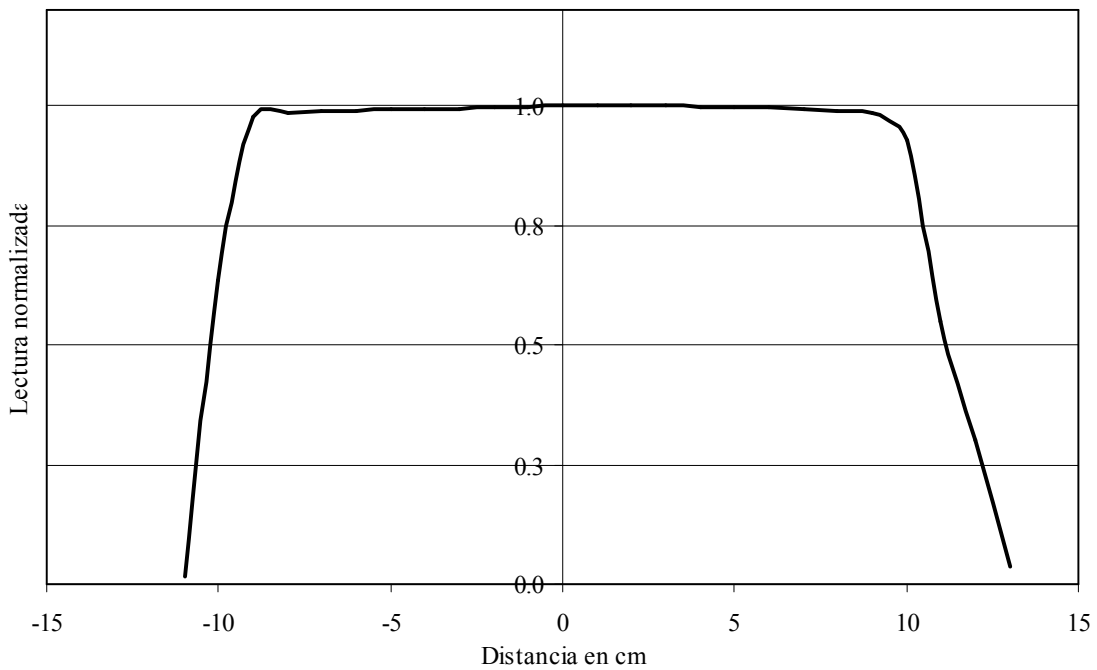




Figura 39. **Medición del perfil horizontal calidad N-60**

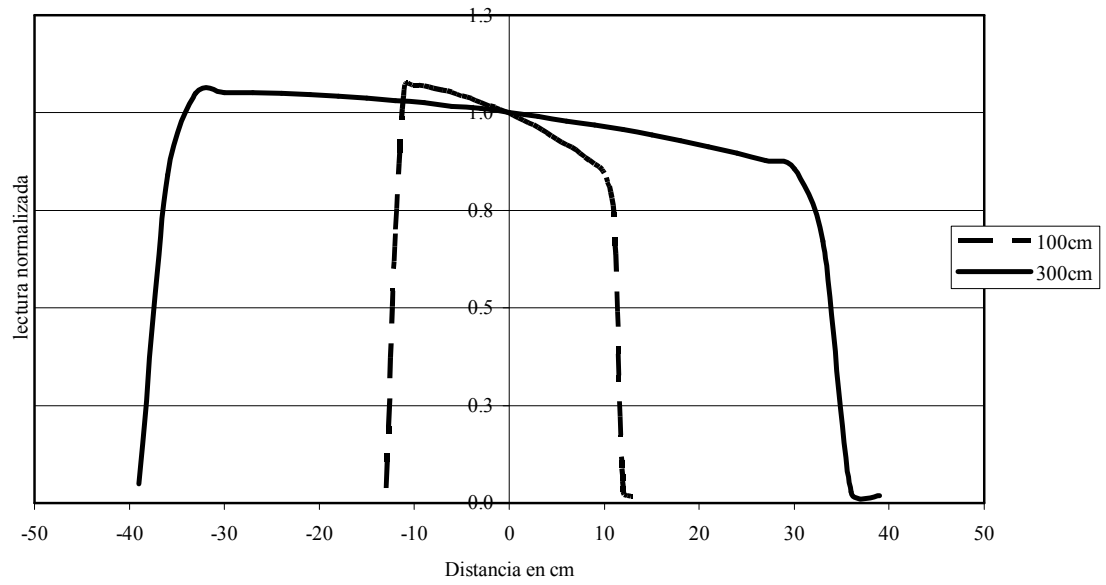


Figura 40. **Medición del perfil vertical calidad N-60**

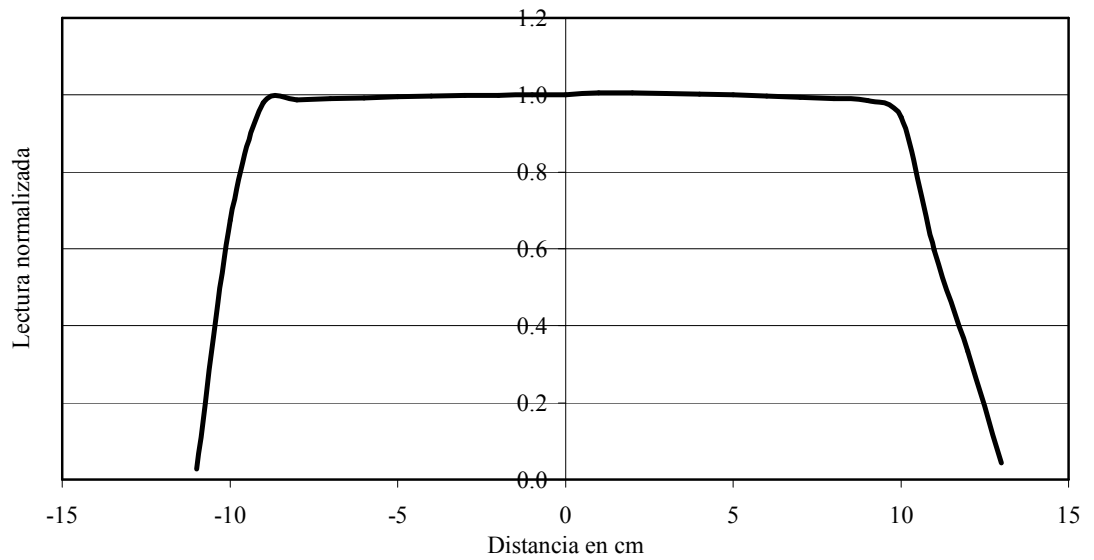


Figura 41. **Medición del perfil horizontal calidad N-80**

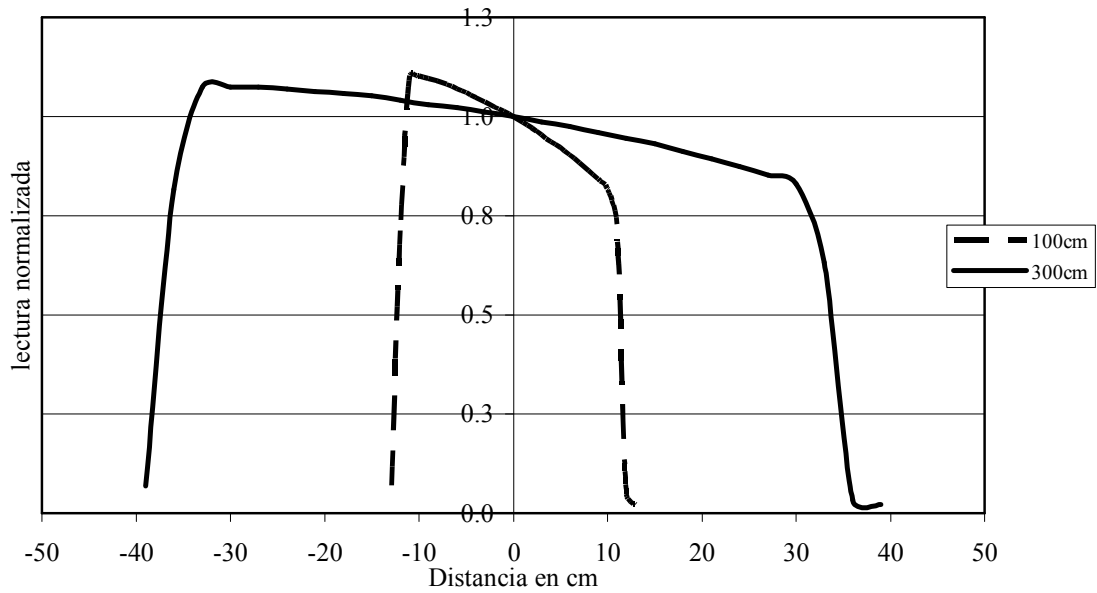


Figura 42. **Medición del perfil vertical calidad N-80**

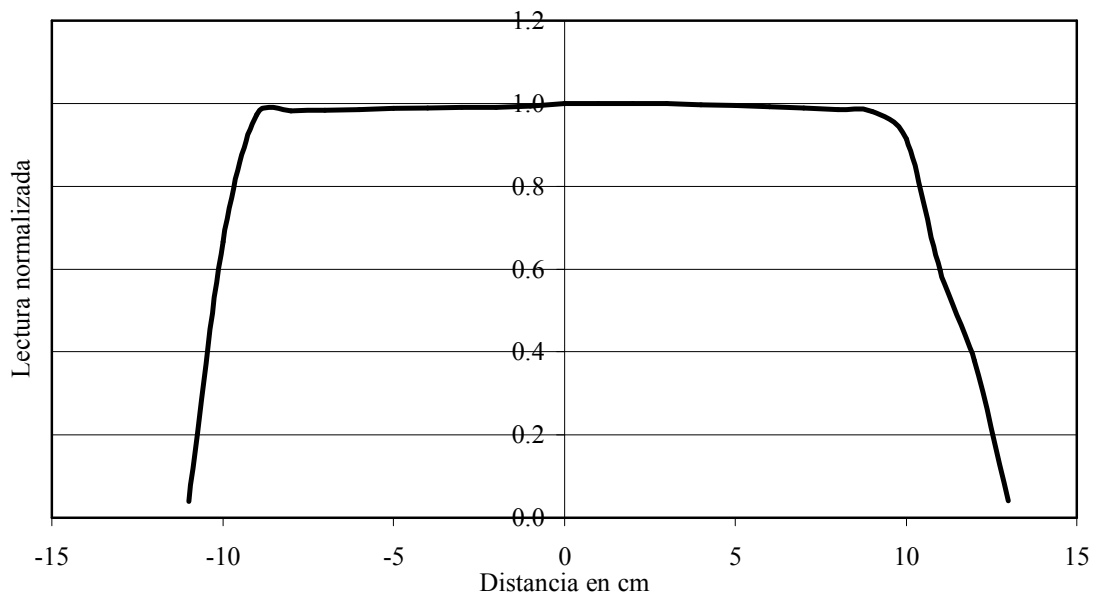


Figura 43. Medición del perfil horizontal calidad N-100

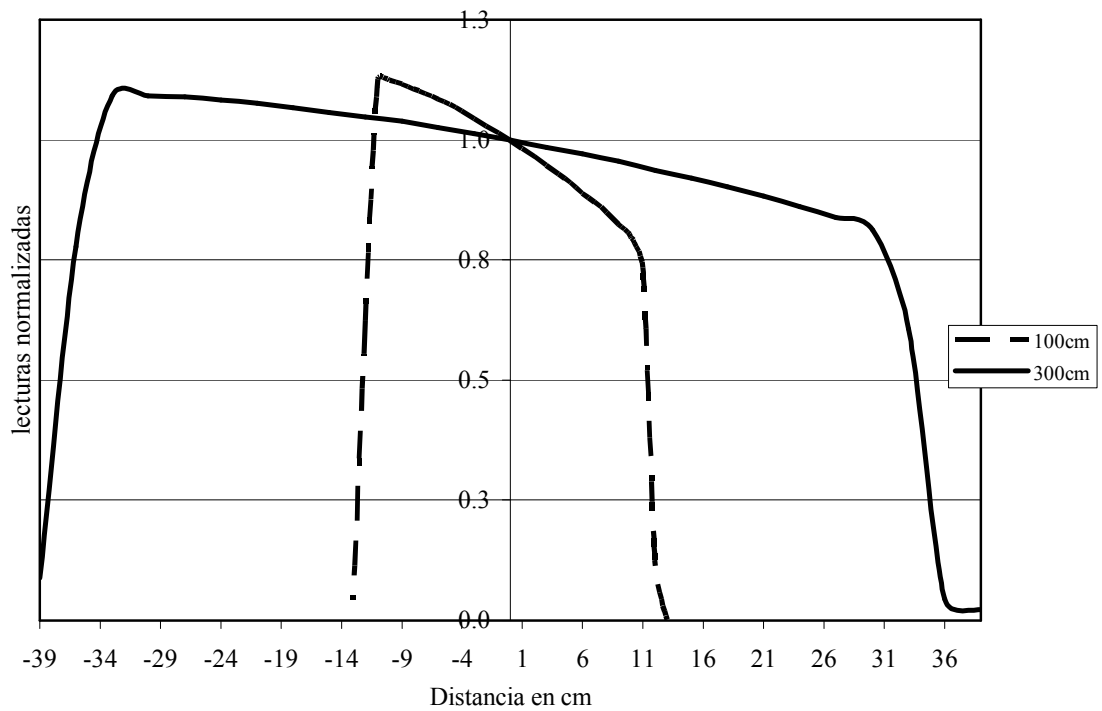


Figura 44. Medición del perfil vertical calidad N-100

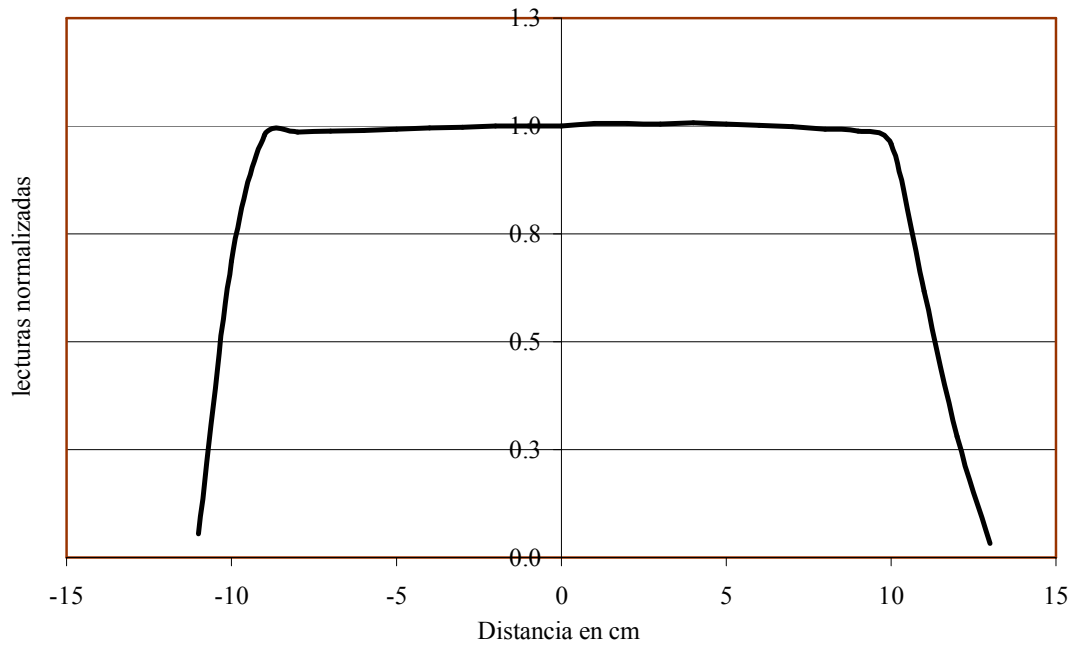


Figura 45. **Medición del perfil horizontal calidad N-120**

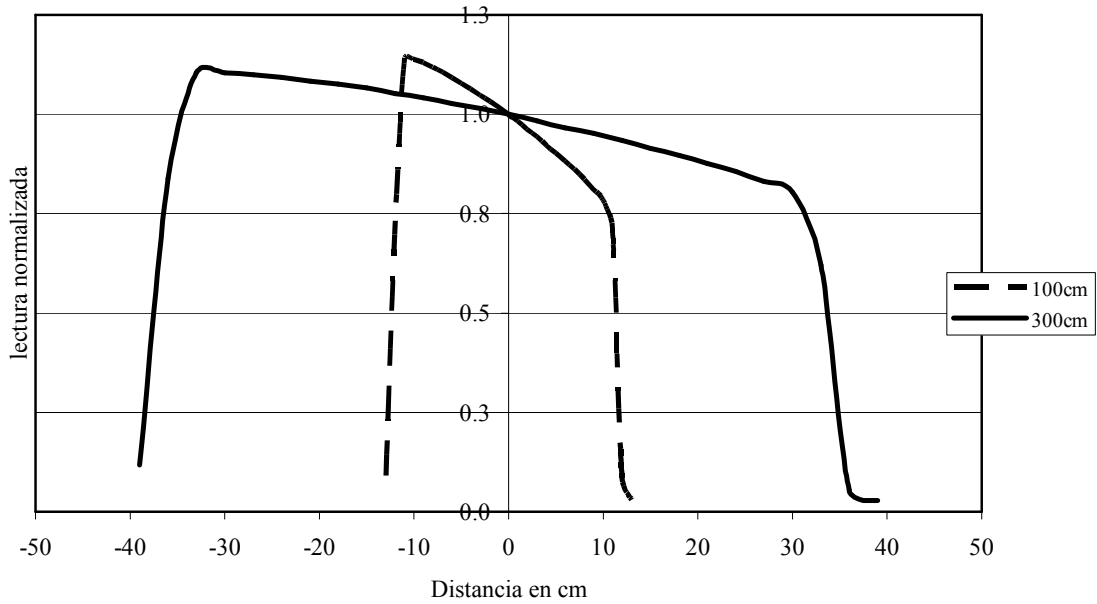


Figura 46. **Medición del perfil vertical calidad N-120**

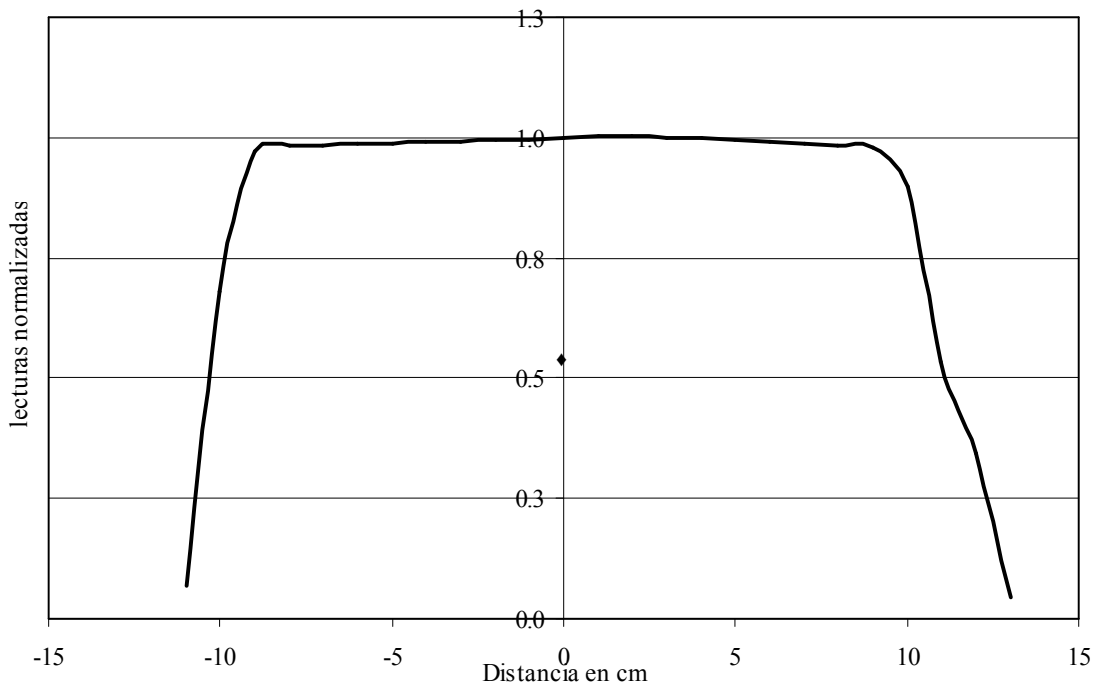


Figura 47. **Medición del perfil horizontal calidad N-150**

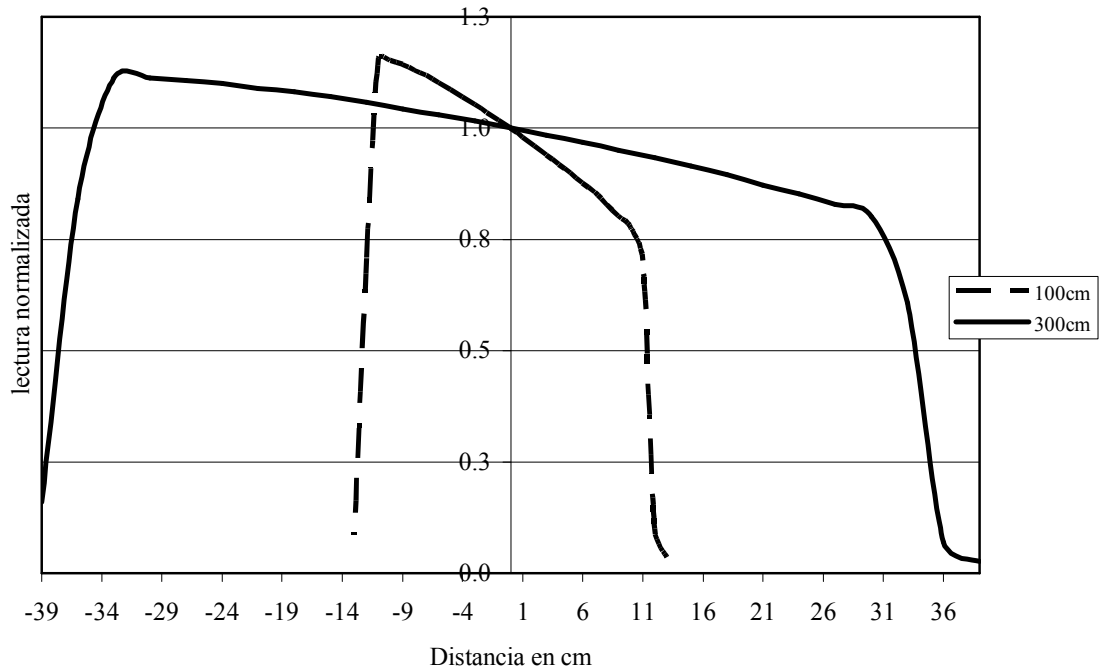


Figura 48. **Medición del perfil vertical calidad N-150**

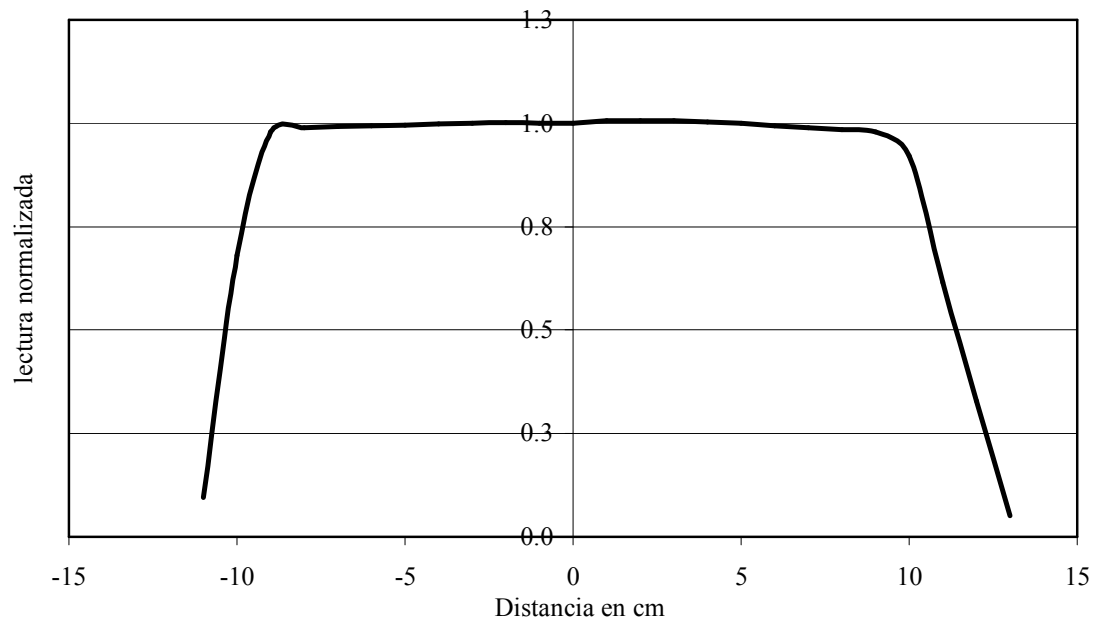


Figura 49. **Medición del perfil horizontal calidad N-200**

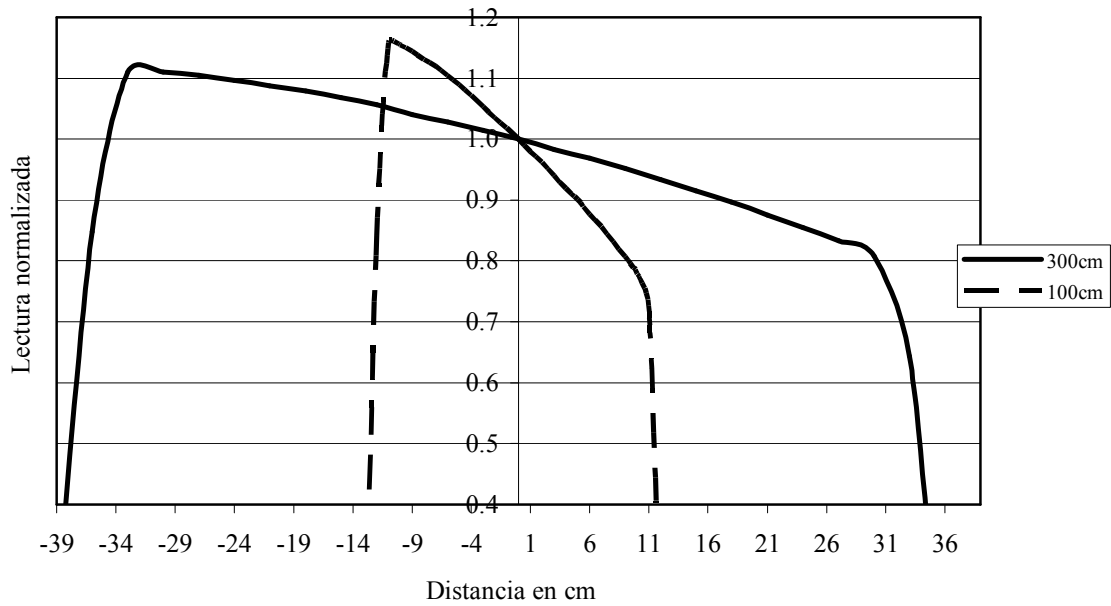
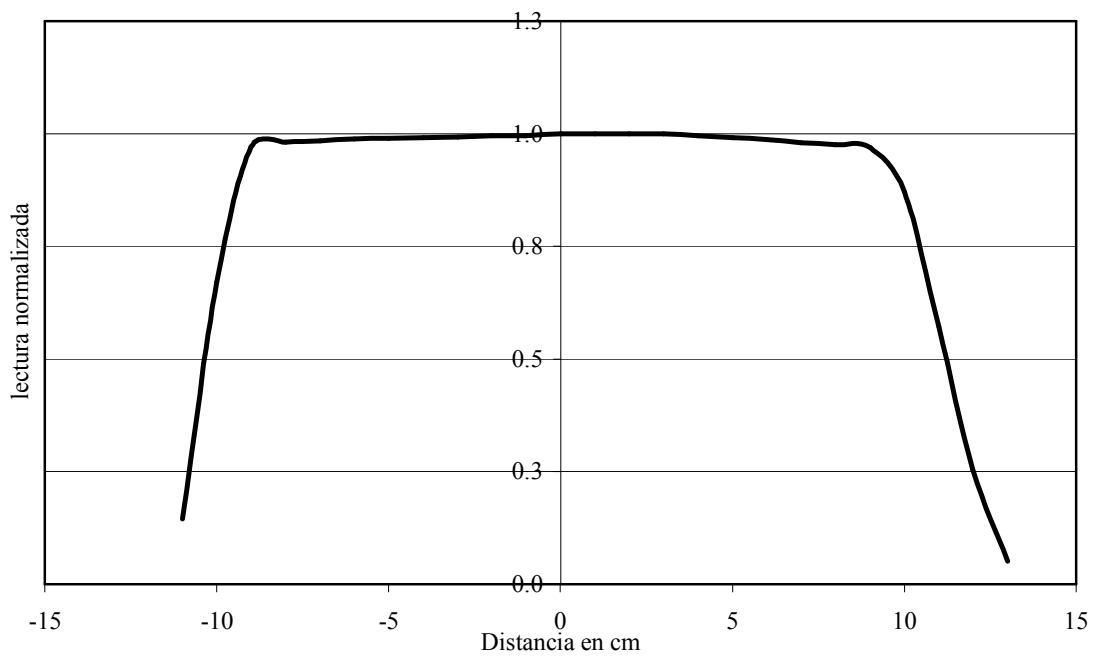


Figura 50. **Medición del perfil vertical calidad N-200**



## 5.6. *Kerma* en función de la corriente del tubo y de la distancia fuente-detector

A partir de las ecuaciones de tasa de *Kerma* en función de la corriente del tubo y de las de *Kerma* en función de la distancia fuente-detector, se obtuvieron, por medio de manipulaciones matemáticas, ecuaciones las cuales nos relacionan *Kerma* en función de la corriente del tubo y de la distancia. Se lograron funciones de dos variables para las calidades N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150 y N-200.

Las ecuaciones se representarán de la siguiente manera, en donde “K” es la tasa de *Kerma* en  $\mu\text{Gy/h}$ , “i” es la corriente del tubo en mili-amperios y “d” es la distancia fuente-detector en metros.

$$K_{40} = (-10.8i^2 + 796.63i) \cdot \left( \frac{1.807}{d - 0.2051} \right)^2 \quad (5.2)$$

$$K_{60} = (-11.52i^2 + 1401i) \cdot \left( \frac{1.8338}{d - 0.1371} \right)^2 \quad (5.3)$$

$$K_{80} = (-5.76i^2 + 716.04) \cdot \left( \frac{1.9114}{d - 0.0937} \right)^2 \quad (5.4)$$

$$K_{100} = (-2.88i^2 + 370.44i) \cdot \left( \frac{1.9364}{d - 0.0653} \right)^2 \quad (5.5)$$

$$K_{120} = (-2.52i^2 + 383.76i) \cdot \left( \frac{1.9553}{d - 0.0441} \right)^2 \quad (5.6)$$

$$K_{150} = (-10.08i^2 + 2884.32i) \cdot \left( \frac{1.957}{d - 0.0441} \right)^2 \quad (5.7)$$

$$K_{200} = (-2.16i^2 + 1040.04i) \cdot \left( \frac{1.9945}{d - 0.0018} \right)^2 \quad (5.8)$$

## **5.7. Posibles errores en la calibración del equipo de rayos X**

### **5.7.1. Precisión y exactitud**

La precisión es un factor importante en el funcionamiento de un instrumento. Un instrumento preciso producirá la misma salida cada vez que reciba una entrada idéntica. Precisión significa el grado de repetibilidad o el grado de reproducibilidad entre una medición independiente del mismo valor verdadero.

Cuando se realizaron las mediciones se encontró que el equipo de rayos X evaluado tenía para todas las mediciones una precisión del 99.93%. Este valor coincide con el valor especificado del equipo, en su manual de usuario.

La exactitud es un factor esencial en el funcionamiento de un instrumento. La exactitud se refiere a que tan cerca se encuentra una medición respecto al valor verdadero. Para nuestro caso el cual se trata de los rayos X, no se puede predecir con exactitud el valor verdadero de la radiación ya que ésta es un proceso aleatorio en la que la Física Cuántica establece su naturaleza.

En nuestro caso específico, la radiación de frenado, *Bremsstrahlung* es una función de probabilidad, de la cual no obtenemos un valor exacto. Esto quiere decir, que los valores obtenidos por medio de las mediciones son los valores reales.



### **5.7.2. Corrimiento del cero**

Un desplazamiento del cero se refiere a la situación en la cual la señal de salida del instrumento es considerada mayor o menor a la esperada. Para nuestro caso en especial, esto quiere decir que exista radiación aun cuando no se le esté inyectando corriente al tubo de rayos X, o que se le inyecte corriente al tubo y no exista radiación.

Antes de empezar cualquier medición se midió la radiación de fuga. Al medirla se pudo establecer que al no inyectarle corriente al tubo de rayos X, la radiación fue nula. Al empezar a aumentar la corriente en el mismo instante se pudo observar que la radiación aumentó con un incremento de corriente.

Esto es lógico porque al no haber corriente no existe el efecto Termoiónico por el cual se liberan electrones.

### **5.7.3. El kilo-voltaje aplicado al tubo**

Como se puede observar en la curvas de tasa de *Kerma* en función de la corriente, tasa de *Kerma* en función de la distancia y de los perfiles verticales y horizontales, a mayor kilo-voltaje las curvas tienden a estar mejor representadas.

El kilo-voltaje aplicado hace que los electrones viajen con mayor energía cinética desde el cátodo al ánodo, y por consiguiente habrán más electrones que alcancen al ánodo y se conviertan en rayos X. Se recomienda utilizar el equipo de rayos X con kilo-voltajes altos para obtener un mayor rendimiento del mismo.

## CONCLUSIONES

1. Los valores de la primera y segunda capa hemirreductora o *HVL* para los kilo-voltajes N-40 y N-60 del equipo evaluado no cumplen con el 5% de variación mientras que las calidades N-80, N-100, N-120, N-150 y N-200 están dentro de los límites que permiten los estándares internacionales.
2. La filtración inherente del equipo de rayos X fue de 0.134mm de aluminio con lo cual se cumple con el criterio de que no debe exceder 3.5mm de aluminio según la norma ISO 4037.
3. La variación de la tasa de *Kerma* con la corriente del tubo evaluado se representa para las calidades N-40, N-60, N-80, N-100, N-120, N-150 y N-200, como una curva polinomial de segundo orden.
4. La determinación de la dependencia de la tasa de *Kerma* con la distancia del equipo de rayos X evaluado, cumple con la Ley del Inverso Cuadrado a partir de la distancia de la fuente virtual.
5. El Efecto Talón, en el equipo de rayos X que se evaluó, modifica la planitud del haz en la horizontal, mientras que en la vertical no se ve afectado por dicho efecto.
6. El equipo de rayos X marca Pantak del Ministerio de Energía y Minas evaluado cumple con la Norma ISO 4037 y por consiguiente está apto para realizar la calibración de aparatos detectores de radiación.

## RECOMENDACIONES

1. El equipo de rayos X por tiempo de utilización, deterioro de materiales y condiciones ambientales puede resultar afectado en su funcionamiento, periódicamente se requiere la re-calibración del mismo.
2. La comprobación del campo de radiación se debe realizar posterior algún cambio o renovación en el equipo que pueda afectar la homogeneidad y simetría del mismo.
3. Al realizar algún tipo de trabajo con el equipo de rayos X se debe comprobar que todos los indicadores, dispositivos de enclavamiento, los movimientos y frenos del tubo de rayos X funcionen correctamente. También se debe realizar una inspección de los cables de alto voltaje y su protección.
4. Cuando se realicen trabajos de calibración de equipos detectores de radiación la distancia fuente-detector ideal debe ser de 2m a 6m. La corriente del tubo a utilizar dependerá de la potencia que pueda suministrar el equipo de rayos X.
5. El kilo-voltaje aplicado al tubo puede variar cuando se irradie por un tiempo prolongado, es necesario revisar que la variación no exceda de un 1%, ya que esto acarrea errores en las mediciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Association Francaise de Normalisation. **X and  $\gamma$  Reference Radiation for Calibrating Dosemeters and Dose Ratemeters and for Determining their response as a function of Photon Energy.** Paris, Francia: s.e., 1990.
2. Colectivo de autores del Centro de protección e higiene de las radiaciones. **Protección Radiológica en la aplicación de las técnicas nucleares.** La Habana, Cuba: s.e.,s.a.
3. Comisión Nacional de Protección Radiológica de la República de La Argentina. **Curso de Postgrado de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear.** s.l.: s.e., s.a.
4. Halliday, Resnick, Krane. **Física.** 4<sup>ta</sup> Ed. Volumen 2, México: Editorial CECSA, s.a.
5. IAEA-TECDOC-1151. **Aspectos físicos de la garantía de calidad en radioterapia: Protocolo de control de calidad.** Viena, Austria: s.e., 2002.
6. IAEA. **Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments.** Viena, Austria: s.e.,1996.
7. IAEA. **Calibration Certificate for Secondary Standard Ionization Chamber.** Viena. Austria: s.e., 1993.
8. ICRU REPORT No. 19. **Radiation Quantities and Units.** Washington, D.C: s.e., 1971.
9. Knoll Glenn. **Radiation Detection and Measurement.** 2<sup>da</sup> ed. EEUU: Editorial McGraw-Hill,1990.

10. Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Energía. **Curso de protección radiológica en el uso de rayos X en la práctica médica.** Guatemala: s.e., s.a.
  
11. Quixtan, M. Generación de Rayos X. Tesis Ing. Electrónica. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, abril 1981.