



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

SEGURIDAD RADIOLOGICA DE UN ACELERADOR LINEAL
DE ELECTRONES PARA ESTERILIZACION INDUSTRIAL.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

ISMAEL ALFREDO RODRIGUEZ FLORES



MEXICO, D.F.

EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente Prof. HUMBERTO ARRIOLA SANTAMARÍA
Vocal Prof. RAMÓN E. DOMÍNGUEZ BETANCOURT
Secretario Prof. RODOLFO TORRES BARRERA
1er. Suplente Prof. MARÍA DE LOS ÁNGELES MARTÍNEZ OLMEDO
2°. Suplente Prof. HÉCTOR EDUARDO JARDÓN VALDEZ

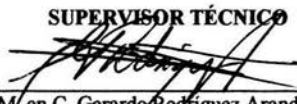
LUGAR DONDE SE ELABORO EL TEMA

Laboratorio de Química Nuclear
Edificio D de la Facultad de Química, UNAM
México, DF.

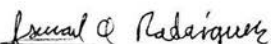
ASESOR


M. en C. Humberto Arriola Santamaría

SUPERVISOR TÉCNICO


M. en C. Gerardo Rodríguez Aranda

SUSTENTANTE


Ismael Alfredo Rodríguez Flores

Dedicatorias y Agradecimientos

A DIOS

Por dame la vida y enseñarme que cada cosa que existe en este mundo es por algo y que nada que se haga en este mudo para el prójimo es en vano.

A MIS PADRES

Por haberme apoyado día con día en la realización de este trabajo con sus consejos motivación y cariño.

A MI HERMANA

También por haberme apoyado en la realización de este trabajo con su motivación y ejemplo.

A MI ASESOR

M. en C. Humberto Arriola Santamaría por sus consejos, observaciones, correcciones y tiempo dedicado a este trabajo.

A MIS AMIGOS DE LA FACULTAD

Arturo, Jahaziel, Jessica, Diana, Nuria, Claudia, Raúl, Uriel, Paola, Gisela, Paco, Pilar, Ercis, Paty, Juan Carlos.

Víctor, Saúl, Gonzalo, Gollo, Juanga, Columba, Fermín, Omar, Alejandro, Vero, Beatriz, Ana, Sonia, Alicia.

Paty Bolaños, Fabiola, Femanda, Nadia, Michel, Israel, Alejandra, Dulce.

A todos los del SADAPI 09 de la generación 96 que me adoptaron y también a todos mis amigos que no he mencionado pero que tengo muy presente.

Por su apoyo y tiempo que convivimos en la carrera.

Seguridad Radiológica de un Acelerador Lineal de Electrones para Esterilización Industrial.

Contenido

Resumen y Objetivo.....	1
1. Introducción al Uso de Radiaciones Ionizantes para Esterilización.....	1
2. Antecedentes	
2.1. Irradiación Industrial con Rayos Gamma (Co^{60} y Cs^{137}).....	8
2.2. Fundamentos Generales de Aceleradores.....	14
2.3. Irradiación Industrial con Aceleradores de Electrones.....	24
3. Bases de Aceleradores Lineales	
3.1. Aceleradores Lineales de Electrodo.....	29
3.2. Aceleradores Lineales de Guía de Honda.....	31
4. Teoría de Blindajes para Radiación X y electrones.	
4.1. Interacción de la Radiación Electromagnética Ionizante con la Materia.....	35
4.2. Interacción de las Partículas Cargadas (electrones, radiación alfa, etc.) con la materia.....	37
4.3. Radiación Primaria, Radiación Reflejada, Radiación Reflejada en la Atmósfera, Laberintos y Dúctos.....	41
4.3.1. Radiación Primaria.....	41
4.3.2. Radiación Reflejada.....	46
4.3.3. Radiación Reflejada en la Atmósfera.....	48
4.3.4. Laberintos y Dúctos.....	49
5. Cálculo para el Blindaje de una Instalación con Acelerador Lineal.	
5.1. Método de Cálculo de Blindajes para Rayos X.....	51
5.1.1. Cálculo para Radiación Primaria.....	51
5.1.2. Cálculo para Radiación Reflejada.....	57
5.1.3. Cálculo para Radiación Reflejada en la Atmósfera.....	60
5.1.4. Cálculo de la Rapidez de Dosis Equivalente por Radiación Dispersa en Laberintos.....	61
5.2. Instalación Propuesta.....	62
5.3. Consideraciones.....	63

CONTENIDO

6. Consideraciones de Seguridad Radiológica y Dosimetría personal e Industrial.	
6.1. Instrumentación.....	72
6.2. Dosimetría Personal	76
6.2.1. Medición de la Dosis.....	79
6.3. Dosimetría Industrial.....	80
6.4. Sistemas de Seguridad.....	81
7. Resultados y Discusión	
7.1. Resultados.....	82
7.2. Discusión.....	82
Conclusiones.....	85
Bibliografía.....	89

Seguridad Radiológica de un Acelerador Lineal de Electrones para Esterilización Industrial.

Resumen

En este trabajo se discute el uso de un acelerador lineal de electrones para esterilización industrial y se hacen los cálculos necesarios para que todas las posiciones en las instalaciones tanto técnicas como administrativas del edificio del acelerador, reúnan los requerimientos de seguridad radiológica dados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) y por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS). Al final se propone una instalación que albergue tanto al acelerador, el cuarto de control, sala de irradiación, cuarto modulador, laboratorio de control de calidad, etc. con valores permitidos de dosis a personal y a público, con valores calculados de la dosimetría que deben de recibir los productos a irradiar y con la aplicación de la seguridad radiológica requerida en este tipo de instalaciones. Debido a que el haz producido por el acelerador es anisotópico, se toma en cuenta para el cálculo del blindaje.

Objetivo

Propuesta del blindaje de una instalación que albergue diferentes áreas de trabajo necesarias para una instalación de irradiación industrial con un acelerador lineal de electrones, con dosis adecuadas para el trabajo seguro del personal.

INTRODUCCION

Louis Pasteur inició el proceso de esterilización, logró demostrar que la producción de alcohol en la fermentación se debe a las levaduras y también demostró que la indeseable producción de sustancias (como el ácido láctico o el ácido acético) que agrian el vino se debe a la presencia de organismos como las bacterias, resolvió este problema demostrando que era posible eliminar las bacterias calentando las soluciones azucaradas iniciales hasta una temperatura elevada; Pasteur hizo extensivos estos estudios a otros problemas, como la conservación de la leche, y propuso una solución similar: calentar la leche a temperatura y presión elevadas antes de su embotellado, este proceso recibe hoy el nombre de pasteurización. Históricamente han existido diferentes formas de evitar que algunos alimentos se descompongan, como los procesos de esterilización por calor, el salado, el ahumado, por compuestos químicos, etc.

A partir del descubrimiento de la radiactividad, se mostró que su interacción con la materia producía ionización lo que lleva a la destrucción de microorganismos. También se ha encontrado que para distintos microorganismos existen diferentes dosis de radiación, ya que la eficiencia de este proceso depende del estado fisiológico de los microorganismos, su concentración en un cultivo, la composición química del medio ambiente como presencia de oxígeno; la presencia de agua y otros compuestos químicos, la temperatura etc. La relación entre el número de microorganismos sobrevivientes con el número total antes de la irradiación se expresa a través del *coeficiente de inactivación*. Se ha visto que la *Salmonella typhi* Ty 2 para lograrse un coeficiente de inactivación de 10^{-8} en una solución fisiológica, una dosis menor que 1 KGy (100rad) es suficiente para esta inactivación; por otro lado si la misma bacteria se congela o si se encuentra en una preparación lipolizada, son necesarias para lograr el mismo coeficiente de inactivación dosis de 2.2 y 5.6 KGy respectivamente. ⁽¹¹⁾

La primera fuente de irradiación de cobalto-60 a escala industrial se usó en Australia en 1959 para eliminar esporas de ántrax de las pacas de pelo de chivo importadas, una planta de cesio-137 fue abierta en Lyon, Francia en 1960 destinada para la esterilización de unidades médicas. ⁽⁷⁾

Otra forma de producir radiación ionizante es en el uso de aceleradores, el primer acelerador que se usó para estos objetivos fue en 1957 por una compañía estadounidense para la esterilización de suturas quirúrgicas; ésta tecnología se desarrolló a partir de la radioterapia.

En la actualidad el uso tanto de fuentes de cobalto-60, cesio-137 y de aceleradores como fuentes de radiación ionizante para usos de esterilización esta ampliamente difundida a nivel mundial.

La radiación electromagnética como la gamma o los rayos X al interactuar con la materia disminuye su intensidad, por lo que **la materia puede atenuar la radiación y por lo tanto funcionar como blindaje**; esta atenuación de la intensidad de radiación se comporta de acuerdo a la siguiente expresión:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

Donde:

I = intensidad de radiación con blindaje

I₀ = intensidad de radiación sin blindaje

μ = Coeficiente de atenuación lineal cm⁻¹

x = espesor de blindaje en cm

Los materiales según su numero atómico (equivalente al numero de electrones) presentan diferente capacidad de atenuación de la radiación electromagnética (gamma o rayos X).

La radiación electromagnética como la gamma o los rayos X es tan pequeña que puede viajar por los espacios vacíos del átomo hasta encontrarse con un electrón de un átomo. La probabilidad de que ocurra esto se expresa a través del **coeficiente de atenuación lineal μ** y está en función de los siguientes factores:

- **Del numero atómico** (igual al numero de protones). A mayor cantidad de electrones, mayor probabilidad de interacción.
- **De la energía** de la radiación. A menor energía mayor probabilidad de interacción.
- **De la densidad** del material.

Por otro lado, la cantidad de electrones también depende del espesor del material usado como atenuador (x). Por lo que a mayor espesor x de blindaje mayor es la atenuación.

El coeficiente de atenuación lineal μ depende de la densidad del material y del estado físico de este; por lo que en la literatura encontramos valores del **coeficiente de atenuación másico μ/ρ** que tiene unidades de cm^2/g . Para obtener el coeficiente de atenuación lineal a partir del másico solo hay que multiplicar por la densidad del material.

A continuación se presentan coeficientes de atenuación másico μ/ρ [cm^2/g] para algunos materiales con su respectiva gráfica en función de la energía del fotón:

Energía MeV	Coeficiente		
	Al	Fe	Pb
0.01	25.8	172	132
0.015	7.66	55.7	112
0.02	3.24	25.1	83.4
0.03	1.03	7.88	27.9
0.04	0.514	3.46	13.1
0.05	0.334	1.84	7.17
0.06	0.255	1.13	4.47
0.08	0.189	0.55	2.12
0.1	0.162	0.342	5.62
0.15	0.134	0.184	1.99
0.2	0.12	0.139	0.906
0.3	0.103	0.107	0.385
0.4	0.0921	0.0921	0.221
0.5	0.084	0.0829	0.154
0.6	0.0777	0.0761	0.12
0.8	0.0682	0.0664	0.0856
1	0.0613	0.0596	0.0689
1.5	0.05	0.0486	0.0509
2	0.0431	0.0425	0.045
3	0.0353	0.0361	0.0416
4	0.0311	0.0331	0.0415
5	0.0284	0.0315	0.0424
6	0.0266	0.0306	0.0435
8	0.0244	0.0299	0.046
10	0.0232	0.0299	0.0487
15	0.022	0.0309	0.0553
20	0.0217	0.0322	0.0611
30	0.022	0.0347	0.0701
40	0.0225	0.0367	0.076
50	0.0231	0.0384	0.0806
60	0.0236	0.0397	0.0843
80	0.0244	0.0418	0.0899
100	0.0251	0.0432	0.0936

Tabla 1.1 Coeficientes de atenuación másico μ/ρ [cm^2/g] para fotones en Aluminio, Fierro y Plomo.

Energía MeV	Coeficiente	
	Agua	Concreto
0.01	4.99	26.5

0.015	1.48	8.01
0.02	0.711	3.45
0.03	0.337	1.12
0.04	0.248	0.559
0.05	0.214	0.361
0.06	0.197	0.273
0.08	0.179	0.2
0.1	0.168	0.171
0.15	0.149	0.14
0.2	0.136	0.125
0.3	0.118	0.107
0.4	0.106	0.0957
0.5	0.0966	0.0873
0.6	0.0894	0.0807
0.8	0.0785	0.0708
1	0.0706	0.0637
1.5	0.0575	0.0519
2	0.0493	0.0447
3	0.0396	0.0365
4	0.034	0.0319
5	0.0303	0.029
6	0.0277	0.027
8	0.0243	0.0254
10	0.0222	0.0231
15	0.0194	0.0216
20	0.0181	0.0211
30	0.0171	0.0211
40	0.0168	0.0215
50	0.0167	0.0218
60	0.0168	0.0222
80	0.017	0.023
100	0.0172	0.0236

Tabla 1.2 Coeficientes de atenuación másico μ/ρ [cm^2/g] para fotones en Agua y Concreto.

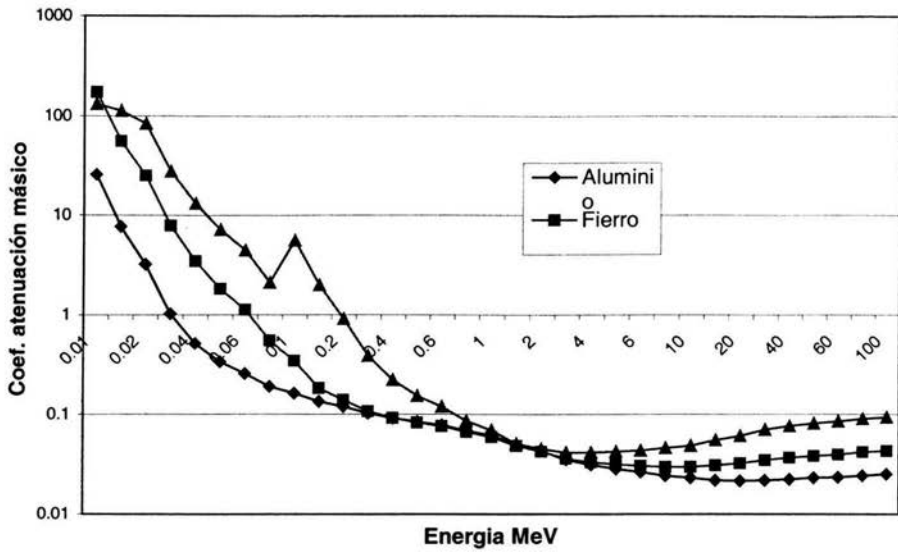


Figura 1.1 Coeficiente de atenuación másico μ/ρ [cm^2/g] para atenuación en aluminio, hierro y plomo en función de la energía del fotón.

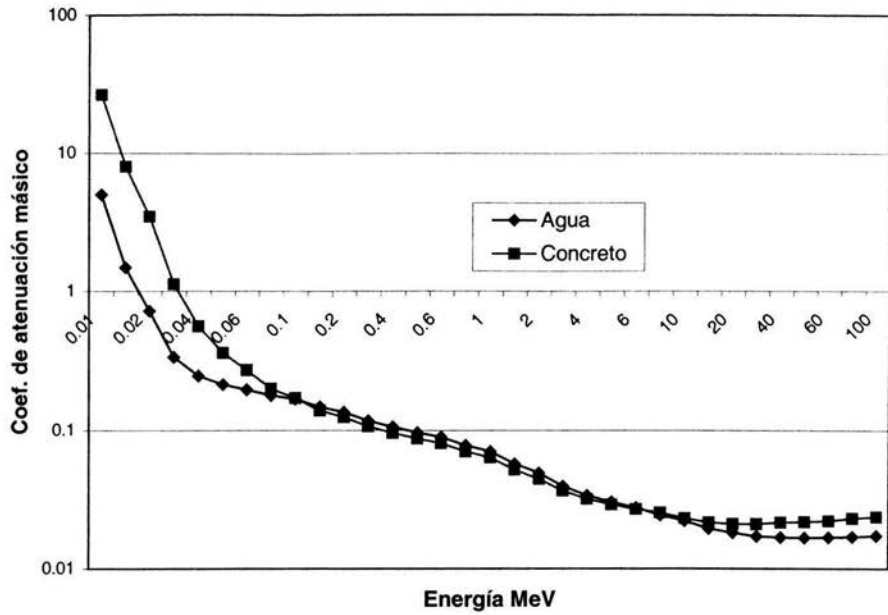


Figura 1.2. Coeficiente de atenuación másico μ/ρ [cm^2/g] para atenuación en agua y concreto en función de la energía del fotón.

2.- ANTECEDENTES

2.1 Irradiación Industrial con Rayos Gamma (Co^{60} y Cs^{137})

El Cobalto 60 y el Cesio 137 son isótopos radiactivos que se caracterizan por emitir energía en forma de rayos llamados Gamma(g).

El cobalto 60 se obtiene a partir del cobalto en su estado natural llamado cobalto 59, cuando es expuesto a un flujo de partículas llamadas neutrones. Los neutrones normalmente son parte constitutiva de los átomos que componen la materia.

El cesio tiene mas isótopos que cualquier otro elemento cuyas masas van desde 112 a 151. El Cesio 133 es el único isótopo natural y el Cesio 137 se obtiene a partir de productos de fisión del Uranio 235 en un reactor nuclear.

La radiación Gamma que emiten estos dos isótopos radiactivos es energía en forma de ondas electromagnéticas, tal como lo es la luz, las microondas, los rayos X, etc.

Estas formas de energía pueden ser controladas y usadas para cubrir importantes necesidades de los seres humanos, y son de hecho utilizadas cotidianamente en un amplio espectro de aplicaciones, tales como telecomunicaciones, hornos de microondas, diagnóstico y tratamiento de enfermedades (Rayos-X y gamma), ó para el procesamiento de productos y sustancias que requieren un medioambiente libre de microorganismos (Rayos Gamma).

Los procesos de irradiación emplean esta forma particular de ondas electromagnéticas, o sea la radiación Gamma, que se conoce también como radiación ionizante. Este término es utilizado para describir estas ondas, puesto que ellas provocan en el material que contactan la formación de partículas cargadas eléctricamente, llamadas "iones".

2.1.1. Aplicaciones

I.- Esterilización Industrial

El tratamiento con radiaciones ionizantes es un método físico utilizado para lograr la esterilización de materiales empleados en el cuidado de la salud, para la descontaminación de alimentos, de materias primas y productos industriales.

El proceso implica la exposición de los productos o sustancias, ya sea en su envoltorio final o a granel, a la radiación ionizante. Esto se lleva a cabo en un recinto especial, llamado cámara de irradiación, por un período de tiempo específico para cada caso en particular.

Estas ondas penetran totalmente en los productos expuestos, incluidos aquellos embalados en capas múltiples. Este proceso se considera inocuo tanto para los productos y sustancias como para los consumidores de los mismos, ya que esencialmente, la energía simplemente pasa a través del material expuesto, pero a diferencia de los tratamientos químicos, no deja ningún tipo de residuo. Además, no se requiere la "cuarentena" del material luego del procesamiento, por lo que el mismo puede ser liberado para la venta inmediatamente después de terminada la aplicación.

Los diversos productos y sustancias son tratados con radiación ionizante emitida por una fuente radiactiva comúnmente de cobalto-60 o cesio-137 en instalaciones conocidas como irradiadores o plantas de irradiación. En estas instalaciones, el material es cargado en un dispositivo de transporte que lo conduce a lo largo de la planta, y en su recorrido circula por la cámara de irradiación, donde, como vimos, es expuesto a la radiación ionizante. Dicha cámara se mantiene aislada del exterior mediante paredes de hormigón armado, el que sirve como blindaje para los rayos Gamma.

Algunos de los productos tratados con radiación ionizante para esterilización son:

- **Productos farmacéuticos:** Los productos farmacéuticos y los ingredientes utilizados en su elaboración pueden ser tratados exitosamente con radiación ionizante a fin de mantenerlos esterilizados.
- **Cosméticos:** Cremas, gel y polvos de uso cosmético, en aquellos casos en que la integridad del producto puede estar comprometida por contaminación microbiana, son tratados en forma creciente con radiación ionizante.
- **Productos embalados:** La aplicación de radiación ionizante asegura la esterilidad de los productos embalados en materiales tales como nylon, polietileno o metal. Si estos embalajes son herméticos, los productos transportados o almacenados en ellos permanecerán estériles hasta tanto el embalaje sea abierto y el material quede expuesto al aire.
- **Productos médicos y veterinarios:** Actualmente, el principal uso de la radiación ionizante a escala mundial lo constituye, por su magnitud, la esterilización de productos para medicina, para el cuidado de la salud y para veterinaria. **El 60 % del material médico desechable que se utiliza en el mundo es esterilizado con radiación ionizante.** Entre los elementos procesados se incluyen materiales desechables de uso quirúrgico, tales como instrumental, guantes, jeringas, gasas y suturas, etc

II.- Medicina

La utilización de radiación ionizante en el tratamiento de enfermedades oncológicas constituye actualmente una práctica que ha alcanzado amplia difusión

en nuestro país y en el mundo entero, tanto por su eficacia como por ser inherentemente segura.

Se la conoce como radioterapia, y consiste en la exposición del tejido tumoral a la radiación ionizante. Para ello, se utilizan unidades especiales, que están provistas de un cabezal, y de dispositivos para controlar en forma exacta el grado de exposición que cada caso en particular requiere para un adecuado tratamiento de la enfermedad.

Las aplicaciones en radioterapia se llevan a cabo en numerosas instituciones hospitalarias públicas y privadas. Cabe destacar que en el país se encuentran actualmente en funcionamiento muchas unidades de radioterapia

III.- Aplicaciones Industriales

Las primeras aplicaciones comerciales de la radiación ionizante se remontan a los principios de la década del '60.

Se encuentran actualmente en operación en el mundo unas 160 plantas de irradiación, localizadas en más de treinta países, brindando una amplia gama de servicios a un creciente número de industrias.

Algunas de las aplicaciones industriales mas relevantes de la radiación ionizante son:

A) Preservación de Alimentos

Los agentes del deterioro de los alimentos constituyen una dura competencia para la subsistencia de millones de seres humanos. Las Naciones Unidas estiman que un cuarto a un tercio de la producción mundial de alimentos se pierde debido a pestes, insectos, bacterias, hongos y enzimas que los consumen, degradan y hasta destruyen.

Técnicas como la aplicación de radiación ionizante para preservar los alimentos, se muestran a continuación:

- **La inhibición**

Uno de los procesos biológicos de mayor importancia en el deterioro de ciertos alimentos es el brote que se produce en los tubérculos y los bulbos, causando disminución de peso y calidad en **papas, cebollas, zanahorias y remolachas**, por citar solamente algunos casos de mayor relevancia económica. El tratamiento con radiación ionizante es capaz de inhibir total y definitivamente el brote, permitiendo de esta forma extender el período de almacenamiento sin pérdida de peso y calidad, e incrementando, consecuentemente, la disponibilidad de los citados productos en el mercado.

- **La desinfección**

La desinfección con radiación ionizante de **huevos, pescados y carnes frescas** puede ser el único medio práctico de controlar alimentos contaminados por bacterias, ya que permite eliminar todos los tipos conocidos de salmonella y otras bacterias patógenas, sin efectos colaterales y sin afectar la naturaleza misma del alimento, como lo hace, por ejemplo, el tratamiento térmico en planta.

- **La desinfestación**

A pesar de los medios de control utilizados, principalmente insecticidas y fumigantes, las pérdidas producidas por el consumo que efectúan los insectos en granos, harinas y legumbres secas mientras se encuentran almacenados, constituyen un porcentual nada despreciable de cada cosecha. La aplicación de radiación ionizante combate eficazmente la población de insectos de un depósito, no sólo produciendo la muerte o la incapacidad de reproducción de los adultos, sino también extendiendo su acción a las larvas y a los huevos. Similar acción puede cumplir en la desinfestación de **frutas y hortalizas**, controlando plagas tales como la mosca de la fruta, evitando el establecimiento de cuarentena y la prohibición de transporte nacional e internacional. La desinfestación con radiación ionizante facilita la comercialización de alimentos frescos a nivel mundial.

- **La pasteurización**

Las bacterias y los hongos contribuyen fundamentalmente al acortamiento del período útil de los alimentos. En el caso de los **alimentos frescos**, es imposible utilizar la pasteurización térmica por cuanto el producto pierde su condición de frescura.

La pasteurización con radiación ionizante prolonga notablemente el período de frescura de los alimentos perecederos, reduciendo las pérdidas por maduración y descomposición.

La radiación ionizante simplemente pasa a través de los alimentos, y, al igual que otras técnicas de preservación, tales como la cocción, el enlatado ó el congelamiento, produce en los mismos, cambios moleculares pequeños e inocuos. Constituye un "proceso frío", ya que no incrementa significativamente la temperatura (1-2 grados) de los alimentos procesados, por lo cual se mantienen más frescos que con otras técnicas. Además, no deja residuos tóxicos, tal como acontece con los tratamientos químicos con pesticidas y plaguicidas, y los alimentos pueden ser transportados, almacenados ó consumidos inmediatamente después de tratados. La radiación ionizante no puede, bajo ninguna circunstancia, producir radiactividad ni causar daños a los alimentos.

Los alimentos tratados con esta técnica, además de conservarse en buen estado por periodos de tiempo mas prolongado, mantienen en mayor proporción su sabor, textura y valor alimenticio original que aquellos que son pasteurizados, esterilizados con calor o enlatados.

La radiación ionizante es herramienta que mejora sensiblemente la capacidad para preservar los alimentos, y al mismo tiempo reducir la incidencia de la transmisión de enfermedades originadas en los mismos.



Este símbolo ha sido establecido internacionalmente para identificar a los productos alimenticios tratados con radiación ionizante.

B) Aplicaciones sanitarias

- **EFLUENTES CLOCALES**

El tratamiento con radiación ionizante de los efluentes cloacales de los conglomerados urbanos, realizado en instalaciones diseñadas a tal efecto, garantiza la total eliminación de los riesgos de transmisión de enfermedades causadas por agentes patógenos. En efecto, elimina bacterias y virus, destruye larvas, parásitos y quistes amébicos, y causa la extinción de cualquier agente infeccioso. Se evita a su vez la formación de derivados organoclorados, perjudiciales para la salud, al constituirse en una alternativa confiable e inocua a la utilización de productos químicos.

- **RESIDUOS HOSPITALARIOS**

La actividad hospitalaria genera cantidades significativas de diferentes tipos de residuos peligrosos para la salud. La utilización de radiación ionizante constituye una alternativa económica y confiable para esterilizar los residuos infecciosos, ya que la incineración de los mismos enfrenta reparos ambientales y mayores costos.

C) Otros Usos

- **Productos químicos:** La formación de ligaduras cruzadas en los polímeros plásticos produce mejoras en sus propiedades físicas. En general, los plásticos tratados con radiación ionizante son más durables y más resistentes tanto a las altas temperaturas como a la acción del fuego. Teniendo en cuenta que tanto la industria del automóvil como la de la construcción tienen demandas cada vez mayores de piezas de plástico de tamaño considerable,

existe un interés creciente en la utilización de radiación ionizante, ya que con ella se pueden tratar componentes de espesores y densidades elevado.

D) Nuevas Aplicaciones

A medida que progresan las investigaciones, se encuentran nuevas aplicaciones para la radiación ionizante.

Cabe mencionar, entre otras, el procesamiento de lana cruda para eliminar parásitos, el de gemas de topacio para resaltar su color, la descontaminación de documentación archivada y de piezas arqueológicas, la preservación de la madera por destrucción de insectos y moho, la descontaminación de colmenas, como asimismo la esterilización de residuos biológicos contaminantes recolectados en los puertos y aeropuertos internacionales, provenientes de los viajes de barcos y aeronaves.

2.2. Fundamentos Generales de Aceleradores

2.2.1. Aceleradores de corriente directa

Estos consisten en mantener un cuerpo a alto potencial respecto a tierra, por medio de la rectificación de la corriente alterna o por el transporte mecánico de electricidad desde tierra a la terminal de alto voltaje, y el empleo del campo eléctrico producido para la aceleración de partículas. Todos ellos constan de:

- Fuente de iones
- Terminal de alto voltaje
- Tubo acelerador
- Equipo de control del haz
- Equipo analizador para el estudio de los productos de la radiación

Son empleados en la investigación de la estructura nuclear debido a las siguientes características:

- La sección transversal del haz de partículas es pequeña
- La corriente puede mantenerse constante
- Se puede producir un haz pulsado
- Las partículas del haz tienen prácticamente la misma energía
- La energía puede variar en forma continua en un intervalo muy amplio
- El intervalo de valores de energía que cubren es el que se necesita para realizar numerosas investigaciones nucleares.

También la ventaja de estos aceleradores es que son de alta intensidad de haz, alta estabilidad de energía (en algunos casos, mejores que 0.1%) y buena colimación del haz. ⁽⁷⁾

Algunos de ellos se emplean para acelerar electrones y producir así corrientes de hasta 10 mA a 4 MeV y haces de 40 KW que se emplean en la irradiación de plásticos y derivados del petróleo para mejorar sus propiedades físicas y químicas, en la irradiación de alimentos para su preservación y para producir rayos X muy penetrantes.

Algunos de los aceleradores de corriente directa o continua se describen a continuación:

- **Generador Van de Graaff**

La parte fundamental consta de una banda aislante que gira sobre unos rodillos (**P₁** y **P₂**), uno dentro de la terminal de alto voltaje y el otro conectado a tierra. Por medio de una fuente de alto voltaje y un peine de puntas **P** se carga la banda con un efluvio de corona. Estas cargas son llevadas mecánicamente por la banda al interior de la terminal de alto voltaje, en donde son colectadas por medio de otro peine de agujas **P** conectado al terminal; la escobilla **pn** retira las cargas negativas inducidas que existen sobre la banda (ver figura 2.1). La terminal de alto voltaje puede ser una

esfera hueca de diámetro grande, del orden de 2 m o mayor. La construcción del aparato permite que la esfera esté aislada del resto del aparato.

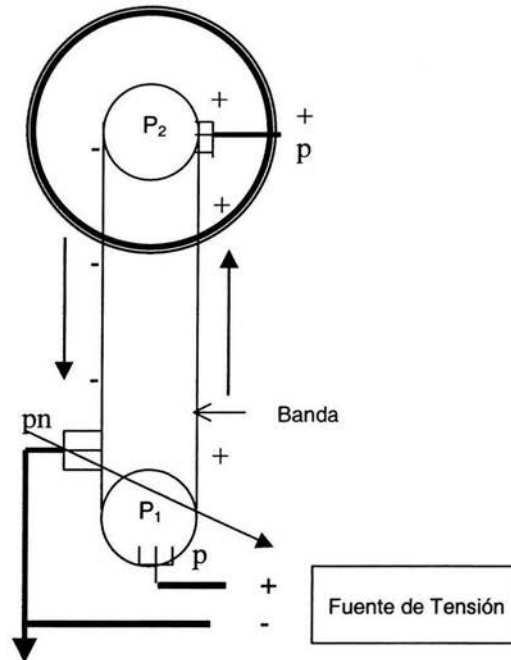


Fig. 2.1 Generador de un acelerador Van de Graaff

Si Q es la carga depositada en la superficie de la terminal, su potencial respecto a tierra es:

$$V = \frac{Q}{C}$$

Donde C es la capacitancia del sistema.

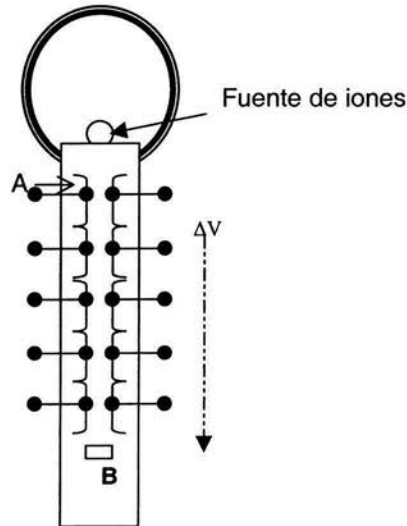
En la práctica no es posible obtener voltajes mayores que unos pocos millones de voltios, ya que las condiciones que limitan la carga sobre la superficie de la terminal y por consiguiente su potencial V , son la proximidad de otros objetos relacionados con el diseño del laboratorio donde está situado, y el potencial disruptivo del aire próximo a la superficie de la terminal, provocado por el intenso campo eléctrico que hay alrededor de esta.

Con el fin de mejorar el diseño del generador y reducir su tamaño físico para una condición de potencia dada, el generador se sitúa dentro de un tanque hermético fabricado de acero, en el cual el aire se encierra a una presión de 10 atm. A presiones altas el aire puede resistir campos eléctricos intensos sin que ocurran descargas disruptivas.

El aire del tanque puede sustituirse para mejorar sus condiciones de operación por mezclas de nitrógeno y bióxido de carbono; hexafluoruro de azufre; mezclas de aire con tetracloruro de carbono; freón etc. El gas debe de estar bien seco pues basta una pequeña cantidad de agua para reducir sus propiedades aislantes.

En cada acelerador existe un dispositivo que suministra los iones que ingresan al tubo de aceleración, este dispositivo se le conoce como fuente de iones y se basa sobre el siguiente principio de funcionamiento: una ampolleta especial que contiene hidrógeno, ó deuterio, ó helio de muy alta pureza que suministra una pequeña cantidad de gas de interés para formar los iones afines. Debido al gradiente de baja presión del tubo acelerador este gas penetra hacia este, e incide directamente sobre un filamento de tungsteno calentado al rojo, o bien, sobre un arco voltaico, o un campo de radiofrecuencia. Cualquiera de estas excitaciones produce la ionización del gas, produciendo respectivamente iones H^+ , H^{++} , He^{+++} , que son acelerados por el campo eléctrico del tubo acelerador.

El tubo acelerador está dividido en secciones por medio de anillos metálicos (A), para producir un campo eléctrico casi uniforme desde la terminal hasta la base. En esta forma se reducen notablemente las descargas y se produce un enfoque del haz en la parte superior que se mantienen durante la aceleración del tubo (Ver figura 2.2)



2.2 Tubo Acelerador

Por medio de los divisores de voltaje, cada anillo o sección disminuirá su voltaje un valor constante ΔV , para llegar del valor máximo de potencial de la esfera, al valor cero en el extremo opuesto del tubo acelerador; así cada sección del tubo acelerador decrece un valor ΔV , y cada sección será mas negativa que su precedente. De esta manera las secciones van atrayendo a los iones, adquiriendo

estos, cada vez, mayor energía cinética debido a la aceleración que suministra cada sección sobre los iones.

Este acelerador tiene la desventaja de que las dimensiones y el costo aumentan enormemente con la energía de salida.

Otros aceleradores que trabajan con este principio son el Acelerador Tandem, que tiene la ventaja entre otras, en que la fuente de iones se encuentra fuera del tanque y a bajo potencial; el Acelerador Pelletron cuya banda se ha sustituido por cadenas formadas por pequeños cilindros metálicos (pellets) unidos por espaciadores aislantes.

Estos cilindros se cargan eléctricamente en el lado de tierra y se descarga por simple contacto eléctrico dentro de la terminal de alto voltaje; el Acelerador Cockcroft-Walton tiene un circuito que multiplica y rectifica el voltaje, este circuito que se presenta multiplica por 6 el voltaje pico de entrada (ver fig. 2.3), el voltaje del terminal será la suma de los voltajes de los condensadores C_2 , C_4 y C_6 .

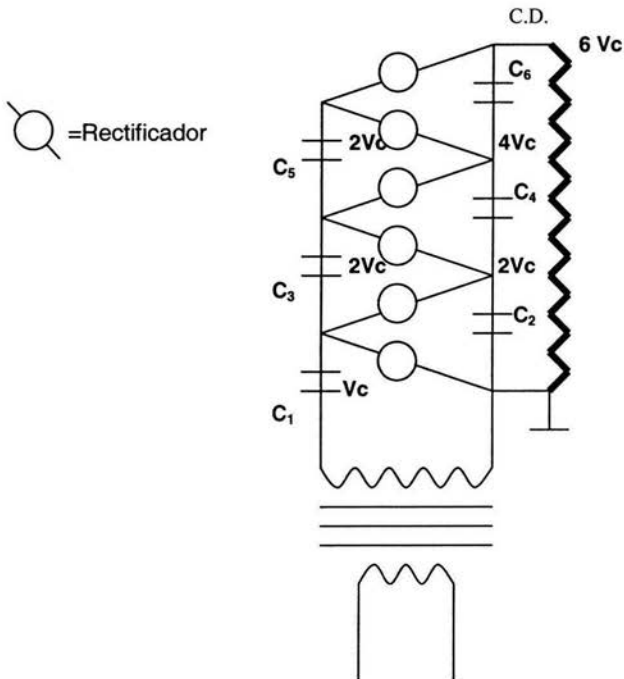


Fig. 2.3. Esquema de un multiplicador de voltaje Cockcroft-Walton. V_c = Tensión pico del secundario

Una variación de los multiplicadores de voltaje en la manera de conectar los condensadores es empleada en el llamado Acelerador Dynamitron. En este caso el voltaje aplicado al condensador C_4 es prácticamente el doble del aplicado al C_2 y sobre el C_6 actúa todo el voltaje producido.

2.2.2 Aceleradores Circulares

La idea de la aplicación múltiple de voltaje condujo a varios investigadores a tratar de obtener un acelerador mas compacto, el ciclotrón, empleando campos magnéticos que obliguen a las partículas a describir arcos de círculo.

En 1940 se diseñó un electroimán que permito acelerar electrones de acuerdo con la ley de inducción magnética de Faraday, este acelerador recibió el nombre de betatrón.

Posteriormente, en 1945, hicieron su aparición los sincrotrones, en que se emplean cavidades de resonancia, como en los aceleradores lineales y trayectorias circulares para acelerar partículas a miles de MeV.

- **El Betatrón**

Este es usado para acelerar electrones. El diseño esquemático del betatrón se muestra en la Figura 2.4. Este acelerador consiste en un electroimán (cuyos polos tienen la forma de cono sin vértices), alimentado por corriente alterna de una frecuencia usualmente de 50 a 200 cps. En el hueco del electroimán es puesta una cámara toroidal al vacío, en el cual los electrones se hacen circular. En este acelerador el campo magnético (cuyas líneas de fuerza son mostradas por líneas punteadas) tiene un doble propósito:

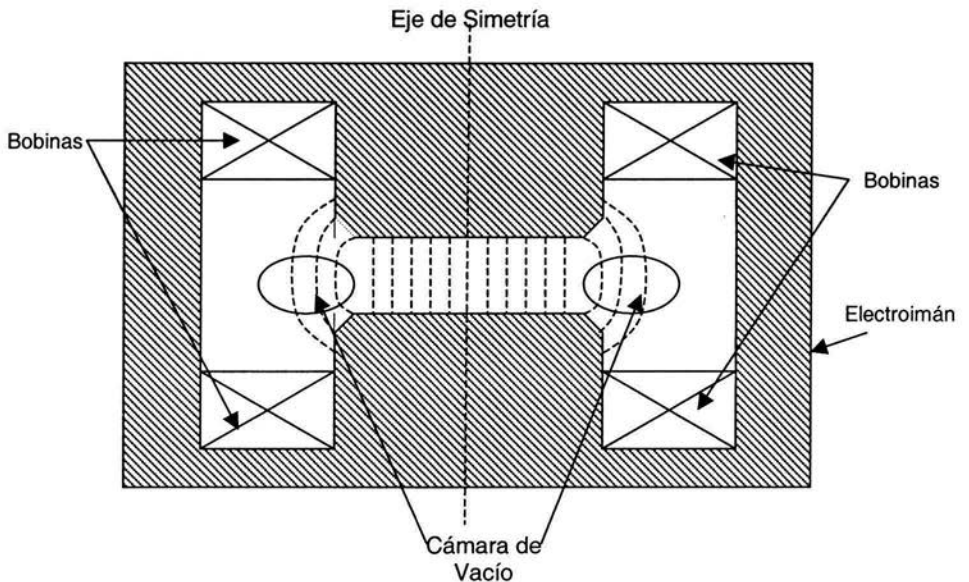


Fig. 2.4 Sección transversal de un betatrón

1. El flujo magnético relacionada a la cámara toroidal cambia en el tiempo, e induce un campo eléctrico cuyas líneas de fuerza son círculos ortogonales al eje simetría: uno de estos círculos es la "órbita central" del toroide. Este campo eléctrico acelera los electrones.
2. El campo magnético presente en la cámara al vacío ejerce una fuerza de Lorentz en los electrones, directa hacia el centro, entonces tienden a conservar estos una órbita circular.

Conceptualmente el betatrón puede ser considerado como un transformador, donde la corriente primaria es la corriente alterna la cual excita al electroimán y la corriente secundaria es la corriente de electrones circulando en la cámara al vacío.

El acelerador tiene una operación pulsada con la misma frecuencia que la corriente. Los electrones son inyectados cuando el campo magnético es cercano a cero.

El betatrón se usa para energías entre 5 y 300 MeV, aproximadamente. Para bajas energías los aceleradores de corriente directa son más convenientes, para altas energías la gran cantidad de hierro requerido para hacer el electroimán es demasiado costoso. Por la misma razón este aparato no es usado para acelerar iones, por ejemplo protones de 30 MeV, el radio requerido será 8 veces más largo que para electrones de la misma energía.

Prácticamente los betatrones han cedido su primacía a los aceleradores lineales, porque en éstos el haz es externo y puede dirigirse con facilidad a diversos puntos de la instalación, y por que es fácil controlar la energía de salida. Sin embargo, el betatrón fue de gran importancia histórica en el desarrollo de grandes aceleradores, pues su diseño permitió mantener un haz de partículas en una órbita circular durante millones de vueltas.⁽¹⁾

• CICLOTRÓN

El principio del ciclotrón fue descubierto por F. O. Lawrence en 1930, y probado experimentalmente por primera vez por F. O. Lawrence y N. S. Livingston en 1931, en la Universidad de California, en Berkeley.

Este acelerador se usa para acelerar iones a una energía de unos pocos millones de electrón-volts este, el principio de funcionamiento es parecido al del betatrón y se describe a continuación:

En este las partículas son aceleradas por un campo eléctrico de radiofrecuencia (frecuencia de 10 a 30 MHz) pero en lugar de moverse a lo largo de una línea recta como un acelerador lineal estas siguen una trayectoria espiral, guiado por un campo magnético constante y prácticamente uniforme.

Las partículas se mueven adentro de una cámara al vacío de forma de un cilindro liso. Esta encierra dos electrodos cóncavos en forma de "D" ver figura 2.5. El voltaje de radiofrecuencia se aplica entre los electrodos de manera que hay un campo eléctrico alterno entre las "Des", pero no dentro de estas.

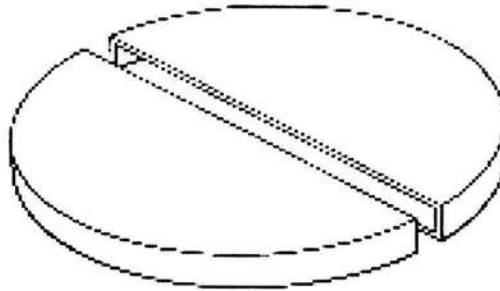


Figura 2.5. Forma de los electrodos de un Ciclotrón (Des)

La cámara al vacío es puesta entre los polos de un largo electroimán el cual produce un campo magnético uniforme perpendicular al plano de las des ver figura 2.6.

La fuente de iones se encuentra en el centro de la cámara al vacío así que los iones, dejando la fuente a baja velocidad son acelerados en el hueco que hay entre las "Des" antes de entrar a una de estas.

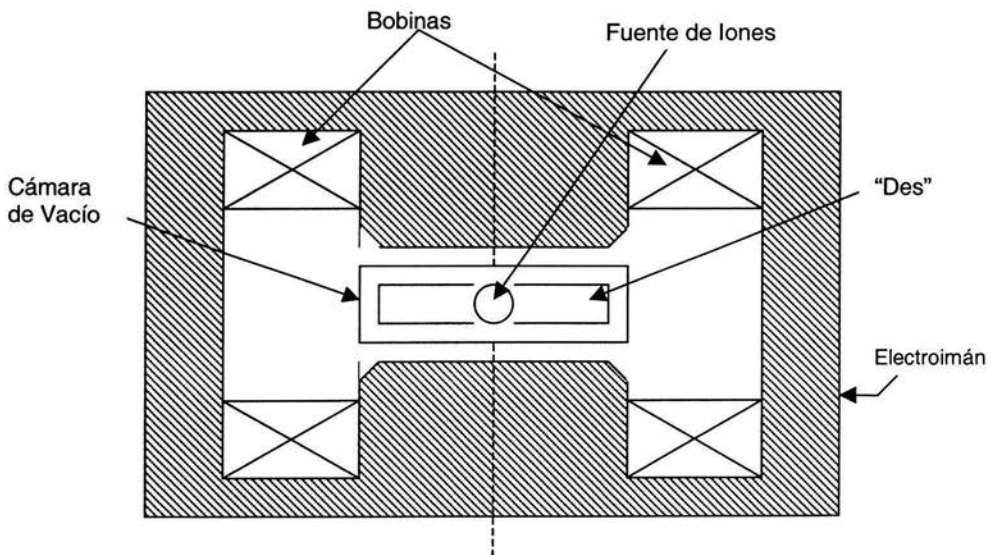


Figura 2.6 Cámara al vacío puesta entre dos polos de un electroimán

Aquí el campo magnético hace que estas sigan una órbita semicircular con velocidad constante, hasta que cruzan de nuevo el hueco. Si en el mismo tiempo el campo eléctrico invierte su dirección, las partículas son otra vez aceleradas, después en la otra "De" los iones siguen un semicírculo de radio más largo que el anterior y así sucesivamente. La órbita resultante tiene la forma mostrada en la figura 2.7. Esta operación del acelerador es posible si el tiempo requerido para que las partículas describan cada semicírculo es prácticamente constante y si la frecuencia angular de el generador de radiofrecuencia se escoge de manera que el tiempo de transición dentro de las "Des" es igual a la mitad del periodo del campo de oscilación ($T/2$). De esta manera la partícula siempre encuentra el campo eléctrico entre las "Des" con la misma fase y estas ganan la misma cantidad de energía cada que pasan por ahí.

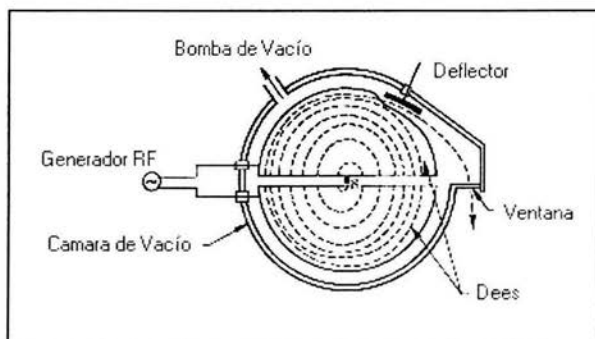


Figura 2.7 Plano esquemático de la Cámara de Vacío del Ciclotrón

El límite de energía práctico de un ciclotrón estándar es alrededor de 20 MeV para protones y un poco más para deuterones.

En un ciclotrón no se puede acelerar electrones ya que la energía en reposo de estos es muy pequeña.

SINCROCICLOTRÓN

El sincrociclotrón, o ciclotrón de frecuencia modulada, es una variante del ciclotrón, el cual supera la energía límite de éste, lo cual es debido a los cambios relativistas de masa.

La construcción entera del sincrociclotrón es similar que la del ciclotrón, la mayor diferencia es que la frecuencia del generador es modulada, esto quiere decir que hace cambios periódicamente y el acelerador se usa durante las veces cuando la frecuencia está disminuyendo. De este modo la relación 1 a 30 puede hacerse para mantener constante la masa cuando este aumentando con la energía y el tiempo requerido para describir un semicírculo adentro de las "Des" también este aumentando. Por lo que no todas las partículas dejan la fuente hasta alcanzar el

final de la aceleración, pero solo son emitidas cuando la frecuencia tiene el valor justo al valor del campo magnético en la región de la fuente, así que durante la aceleración la variación resultante de la "masa relativista" y la variación asignada a la frecuencia son siempre consistentes.

Es obvio que en un sincrociclotrón las partículas no se distribuyen a lo largo de la trayectoria entera como un ciclotrón, pero forman un único grupo, las cuales están listas en el centro y moviéndose a lo largo de un espiral compacto con la velocidad aumentando. Los grupos dejan el centro a velocidad igual a la velocidad de la modulación de la frecuencia (del orden de 100 por segundo) y entonces el haz producido por el acelerador es pulsado a la misma velocidad, Teniendo la ventaja con respecto al ciclotrón de una larga reducción de la intensidad promedio del haz.

Otra diferencia parcial importante entre el ciclotrón y en sincrociclotrón es que en este último las partículas salen a un número mucho mas grande de vueltas (del orden de 10000 en lugar de 100) esto quiere decir, que la espiral es mas compacta y de éste modo es posible usar un voltaje de aceleración mas bajo (del orden de 10 KV en lugar de 100 KV).

Los sincrociclotrones no pueden ser usados para acelerar electrones, porque los rangos requeridos de modulación de frecuencia podrían ser muy largos.

En 1971 se reportó unos 20 aceleradores de este tipo⁽¹⁾, pero ya no se fabrican por haber otros mas ventajosos, como por ejemplo, los ciclotrones de enfoque por sectores. Sin embargo, los sincrociclotrones representaron un paso importante en el desarrollo de los sincrotrones de electrones y de protones.⁽¹⁾

2.3 Irradiación Industrial con Aceleradores de Electrones.

Un acelerador de electrones es un equipo eléctrico generador de radiación ionizante de haces de electrones o rayos X; la radiación que emite, de alta energía posibilita la realización de cambios físicos y químicos en el nivel deseado en los materiales que son sometidos a estas radiaciones, además de no poseer fuentes radiactivas, es seguro de operar.

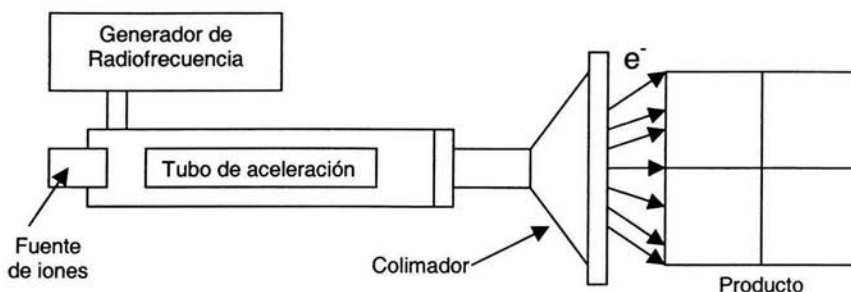


Figura 2.1 Acelerador de electrones industrial.

El tratamiento por haz de electrones también se le llama ionizante, dado que su energía es lo suficientemente alta para desalojar los electrones de los átomos y moléculas y convertirlos en partículas cargadas eléctricamente, que se denominan iones. Sin embargo, no es lo suficiente como para producir cambios en los núcleos de los átomos, por lo que el material irradiado con electrones o rayos X nunca se hace radiactivo.

Es importante hacer notar que si interponemos un blanco (lugar donde se impactan los electrones) entre la salida de los electrones y el material a irradiar se producirán rayos X característicos y/o de frenado, este último conocido como efecto Bremsstrahlung; estas radiaciones se deben a la interacción que tienen los electrones a tales velocidades con la materia.

2.3.1 Aplicaciones

Al igual que las radiaciones gamma y los rayos X los electrones acelerados también tienen la propiedad de ionizar la materia por lo que sus aplicaciones son muy semejantes a las de irradiación con rayos gamma con algunas innovaciones que a continuación daremos:

I.- Descontaminación de Efluentes

La radiación mediante haces de electrones es una tecnología innovadora y versátil, aplicable no solo al tratamiento de efluentes gaseosos, si no también a desechos líquidos y sólidos, por lo cual su incorporación es de mucha utilidad.

Algunos de los problemas ambientales que pueden ser abordados mediante esta tecnología son los siguientes:

- Gases de combustión de plantas termoeléctricas: remoción simultánea de SO_2 y NO_x .
- Gases efluentes de incineradores: remoción simultánea de SO_2 , NO_x HCL y material particulado.
- Remoción de compuestos orgánicos tóxicos desde efluentes gaseosos (COV, PCB, etc).
- Remoción de compuestos tóxicos desde efluentes industriales líquidos o desde aguas contaminadas.
 - Compuestos orgánicos volátiles, COV
 - Compuestos cianurados
 - Residuos de pesticidas, herbicidas
 - Metales pesados
- Tratamiento de aguas cloacales y barros de plantas de tratamiento sanitario de efluentes.
- Tratamientos de higienización o descontaminación de residuos de aeropuertos, establecimientos hospitalarios, etc.
- Tratamiento de lodos

Esta tecnología es aplicable a grandes volúmenes de efluentes, no genera subproductos tóxicos y es aplicable a un amplio rango de soluciones, hasta lodos con un 5% de sólidos.

II.- Mejoramiento de productos industriales

En otro campo de aplicación la tecnología de irradiación con haces de electrones se aplica para el desarrollo de productos o materiales avanzados como polímeros reticulados usados como aislantes para cables y alambres, polímeros termocontráctiles, maderas polimerizadas, curado de recubrimientos superficiales sobre variados sustratos, vulcanización de gomas, etc. En esta área de desarrollo de nuevos materiales, la incorporación de tecnologías de irradiación por haces de electrones permite generar productos de alto valor agregado (por ejemplo, plásticos o maderas mejoradas) favoreciendo su producción y la apertura de nuevos mercados de exportación.

III.- Medicina

En medicina se utilizan los aceleradores de electrones en el tratamiento de varios tipos de cáncer, este tratamiento es conocido como radioterapia y consiste en que los haces de electrones actúen sobre la célula tumoral impidiendo su crecimiento, su reproducción y provocando finalmente su muerte. La eficiencia de la radioterapia depende principalmente de dos factores: la periodicidad del tratamiento y de la técnica aplicada.

La radioterapia puede tener dos orientaciones, la radical que es cuando se pretende curar completamente al enfermo y la paliativa que pretende aliviar el cuadro clínico del enfermo, este último se da cuando la enfermedad esta muy avanzada.

Se ha encontrado que haces de electrones de algunos MeV de energía, son útiles para tratar lesiones superficiales cuya profundidad se encuentra a pocos centímetros de la superficie del cuerpo.

La ventaja de los electrones radica principalmente en su rápida pérdida de energía (por interacción coulombiana en el medio) lo que produce una alta razón de dosis conforme penetran en el tejido. Hacia el fin de la trayectoria del electrón, la razón de dosis disminuye drásticamente.

Otra de las ventajas de los haces de electrones de baja energía es la poca contaminación por rayos X que se obtiene.

Los haces de electrones han sido usados para diferentes lesiones malignas de la piel, en particular la micosis fungoide ha respondido bien a este tipo de tratamientos. Frecuentemente son irradiadas grandes superficies de la piel y en algunos casos se involucra toda la superficie del cuerpo.

IV.- Esterilización Industrial

La irradiación tiene un uso industrial consolidado en numerosos países del mundo para la preservación de alimentos; esterilización de material médico-quirúrgico, cosméticos, productos farmacéuticos, material de empaque, aparatos ortopédicos, injertos de tejido biológico, bandejas, etc.

El principio de la ionización es sencillo: se emite un baño de electrones de alta energía, que interactúa con la nube de electrones de los propios átomos del producto; los átomos pierden momentáneamente su estado neutro y reaccionan de nuevo entre sí para volver a estabilizarse. Este efecto es letal para cualquier microorganismo vivo, con lo que el producto queda estéril.

En vez de recurrir a una serie de isótopos radiactivos de materiales como cobalto o cesio, método comúnmente usado, se recurre a un haz de electrones procedentes de la red eléctrica general, acelerados en una máquina hasta que alcanzan una energía de hasta 10 millones de electronvoltios. El acelerador de electrones, es el corazón de una instalación de este tipo y puede ser adquirido con el proveedor correspondiente.

En México exististe algunas plantas de esterilización de este tipo. La ventaja de recurrir a la irradiación por electrones, es entre otras cosas, por los "problemas medioambientales" que plantea la gestión de los isótopos radiactivos.

El cobalto-60 y el cesio-137 producen radiación gamma, esta radiación se caracteriza por su gran penetrabilidad a la materia, que produce la dosis a una razón relativamente baja y presenta un decaimiento a razón constante y predecible. En una instalación con haz de electrones, la razón de dosis es muy alta y no produce residuos (desechos radiactivos).

En instalaciones de este tipo se esterilizan productos comerciales. La mayoría pertenecen a empresas del sector sanitario: gasas y compresas, guantes, mascarillas, sábanas de quirófano, suturas, dializadores, sondas, etc.

Pero hay aplicaciones menos obvias: los alimentos y la cama de los animales de laboratorio, los envases de cosméticos, los corchos de las botellas de vino. Una botella de buen vino puede estropearse por los microorganismos en el corcho.

La esterilización por este método no produce ningún cambio en el material, pero erradica las posibles bacterias y hongos.

Otro ejemplo son las hortalizas que se pueden esterilizar de esta forma para evitar que, tras un viaje largo, proliferen los insectos. Tanto los corchos como las hortalizas y el material sanitario son sometidos a un haz de electrones dentro de sus cajas. Éstas se ponen sobre una banda transportadora de varios metros, que las lleva al haz de electrones, donde se ionizan en apenas unos minutos.

El tiempo de exposición a la radiación que es lo que determina la dosis recibida varía en función del producto y es un parámetro que depende de la uniformidad de dosis, la densidad del producto a esterilizar y de la razón de dosis.

A continuación se presenta en la tabla 2.1 las ventajas y desventajas que se tienen en la irradiación para esterilización industrial con fuentes de radiación gamma (Co^{60} y Cs^{137}) y en la tabla 2.2 las ventajas y desventajas que presenta esta irradiación con electrones:

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Ionización Gamma	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerte penetración del rayo electromagnético y en la materia • Fiabilidad de la fuente que irradia naturalmente 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte, mantenimiento, almacenamiento de fuentes radiactivas • Pérdida anual de la actividad de irradiación del 12% • Rendimiento débil de la utilización de la ionización que alcanza muy excepcionalmente el 30% • Tratamiento continuo pero sobre un volumen permanente elevado de material, lo que suprime cualquier flexibilidad de cambio de dosis y de lote. • Emisión permanente de irradiación

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de la esterilización por irradiación gamma

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Electrones Acelerados	<ul style="list-style-type: none"> • Fuente eléctrica de producción de electrones que sólo funciona cuando se necesita • Excelente rendimiento de utilización de la ionización, pudiendo alcanzar desde el 60%(tratamiento por una cara) hasta el 80%(tratamiento por dos caras) • Tratamiento continuo en acondicionamiento unitario, gran posibilidad de cambio de lote y/o dosis • Producto esterilizado disponible en pocos minutos • Posibilidad de control unitario en cada unidad de acondicionamiento • Alta capacidad de dosis, algunos kGy/segundo que limitan los riesgos de degradación de los polímeros • Ausencia de impacto ambiental. • Ahorro de costos de instalación y operación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Penetración limitada de este rayo corpuscular constituido por electrones acelerados de 10 MeV. Por tanto, necesita generalmente una despaletización y una repaletización de los productos a tratar y tratados • Cadena de tratamiento elevada, que exige o personal de manipulación suficiente, o equipos de manipulación automatizados.

Tabla 2.2 Ventajas y desventajas en la esterilización con electrones acelerados.

3. Bases de Aceleradores Lineales

3.1. Aceleradores Lineales de Electrodo

Los primeros aceleradores de este tipo (también llamados LINAC) se basaban en el principio de aceleración múltiple, empleando un voltaje alterno de radiofrecuencia de algunas decenas de kilovoltios.

En 1925 Ising publicó la idea de acelerar iones empleando radiofrecuencia, y en 1928, Wideroe operó el primer acelerador lineal, y aceleró con él iones de sodio y potasio a una energía correspondiente al doble del voltaje aplicado, que era de 25 Kilovoltios.

La figura 3.1 muestra el esquema de un acelerador de esta tipo. Los electrodos estaban formados por cilindros metálicos cada vez más largos, todos los impares conectados a uno de los terminales del oscilador de radiofrecuencia y todos los pares al otro. Suponiendo que los iones positivos provenientes de una fuente de iones, como las empleadas en los aceleradores de corriente directa, se mueven dentro del primer electrodo. Por encontrarse en una cavidad, no están sometidos a ninguna fuerza, pero al asomarse a la región entre el primer y segundo electrodo, estarán sometidos a un campo eléctrico alterno (variable). Si en ese momento el primer electrodo es positivo y el segundo es negativo, el campo eléctrico los impulsará favorablemente aumentando su velocidad y su energía. Mientras se mueven dentro del segundo electrodo no están sometidos a fuerza alguna. Como la frecuencia del oscilador es fija, se puede diseñar la longitud de los electrodos a fin de que mientras el ion atraviese el electrodo, cambie la polaridad del voltaje de manera que al asomarse el ion entre el segundo y tercer electrodo, la carga del segundo sea ahora positiva y la del tercero negativa para que el ion reciba un nuevo impulso y su energía y su velocidad aumenten, y esto se repita en todos los casos.

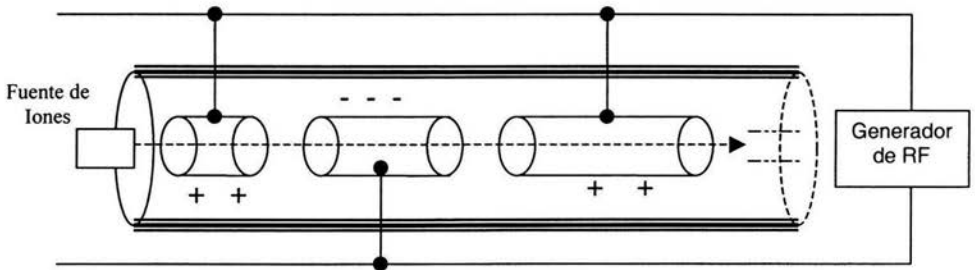


Figura 3.1 Esquema de un acelerador lineal de electrodos

Como la frecuencia de oscilación es constante, también lo será el tiempo que debe permanecer la partícula dentro de cualquier cavidad para que reciba impulsos favorables, y como la velocidad va siempre en aumento, se requiere que los electrodos sean cada vez más largos para que el tiempo empleado en recorrerlos sea siempre el mismo.

La longitud del electrodo (L) para que un ion entre en el tubo cuando este es negativo y salga de el cuando es positivo, será.

$$L = v \times \frac{T}{2}$$

En donde v es la velocidad del ion y $T/2$ la mitad del período, o sea el tiempo que el oscilador tarda en cambiar la carga de un cilindro de negativa a positiva.

De acuerdo con la ecuación:

$$E_c = qEs = qV$$

Donde E es el campo eléctrico que sufre la partícula con carga q y s la longitud que recorre la partícula al estar sometida a ese campo.

La energía cinética E_c que adquiere una partícula cargada q después de n impulsos será, para un caso no relativista

$$E_c = nVq = m \frac{v_n^2}{2}$$

De la ecuación anterior se obtiene:

$$v_n = \sqrt{\frac{2nVq}{m}}$$

Donde V representa el voltaje pico aplicado y v_n la velocidad alcanzada por la partícula.

Entonces la longitud del electrodo "n" será:

$$L_n = \sqrt{\frac{2nVq}{m}} \times \frac{T}{2}$$

De acuerdo con la teoría de la relatividad, ningún electrón o partícula puede alcanzar una mayor velocidad a la de la luz en el vacío, $c = 300\,000$ km/seg, por lo que la longitud de los tubos no seguirá aumentando sin límite, y tenderá el valor máximo de:

$$L = c \times \frac{T}{2}$$

El experimento de Wideröe fue reportado por Lawrnce en la Universidad de Berkeley, California, y de él obtuvo la idea inicial de la cual desarrolló el concepto de ciclotrón. D. H. Sloan, también estudiante de Berkeley, extendió el acelerador lineal

de iones a 10 y más electrodos. Hacia 1931 Sloan y Lawrence habían acelerado iones de mercurio a una energía de 1.25 MeV, pero su aplicación a la física y medicina nuclear fue insignificante.

Hacia 1939 se habían logrado acelerar iones de hidrógeno molecular hasta una energía de 350 KeV, mientras que, en esa fecha, los Van de Graaff aceleraban iones de ese tipo a varios millones de electrón-voltios y los ciclotrones a muchos millones.

Con el desarrollo del radar, la situación cambió radicalmente, pues se construyeron fuente de muy alta frecuencia, de elevada potencia y circuitos eficientes para operar altas energías.

3.1 Aceleradores Lineales de Guía de Onda

Recientemente se ha desarrollado aceleradores lineales de partículas que utilizan radiofrecuencia con generadores de campos eléctricos, se les conoce como RF LINAC. Estos funcionan bajo el siguiente principio; Si una onda electromagnética puede ser colocada en el interior de un tubo al vacío, las partículas que viajan en el eje del tubo guía siempre experimentarán una fuerza de aceleración debido a un campo eléctrico, ver la figura 3.2. Para esta aplicación se utilizan generadores de alta frecuencia con potencia de varios cientos de watts, (Magnetrón o Klystron).

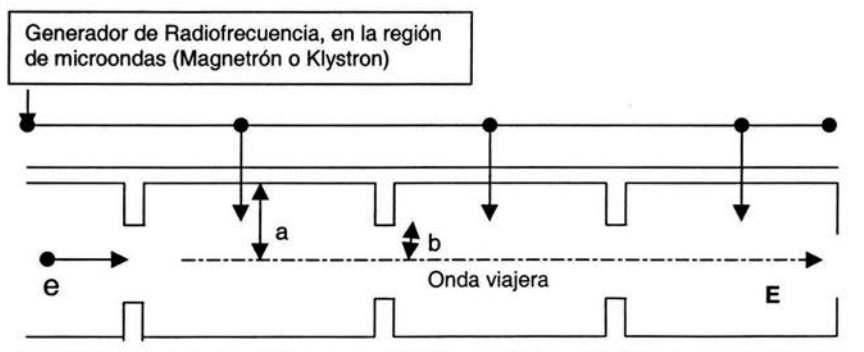


Figura 3.2 Tubo Guía de un RF LINAC

Es un hecho conocido que los "rf linacs", son una de las mejores herramientas para acelerar partículas cargadas en el intervalo de MeV hasta GeV.

En los aceleradores de radio frecuencia (rf linacs), el campo eléctrico y magnético oscila a muy alta frecuencia en el intervalo de 10^6 a 10^9 hertz, similares a los transmisores de radar: Estos campos son confinados en regiones (cavidades) acotadas del espacio por materiales conductores, usualmente cobre, lo cual permite mantener la energía radiante en una dirección, de hecho, el linac ha sido diseñado para contener la distribución de los campos eléctricos dentro de la estructura y la distribución de las partículas dentro del haz, tal que las partículas son expuestas a

los campos eléctricos cuando estos están en la dirección de la aceleración y son protegidas cuando estos campos están en la dirección de la desaceleración.

Desde su diseño original, una parte fundamental del acelerador rf fue el tubo guía. Este es el corazón del acelerador y se encuentra físicamente en el eje del equipo. Las partículas son expuestas a **campos eléctricos aceleradores** cuando la dirección del campo está en la dirección del eje del tubo guía y del movimiento de las partículas, y por diseño estructural, estos electrones están protegidos cuando el campo está en sentido contrario al movimiento. Conforme las velocidades de las partículas se incrementan, la longitud del tubo también debe incrementarse para mantener la sincronía entre la velocidad de las partículas y la fase aceleradora del campo eléctrico de rf.

Para introducir los electrones al acelerador, como se ha mencionado con anterioridad, es posible utilizar una fuente de iones o un acelerador previo, por ejemplo el acelerador Van der Graff. Otro método desarrollado recientemente, utiliza rayos laser; la luz polarizada de un laser es dirigida a una superficie cuidadosamente preparada de arseniuro de galio. Los electrones son expulsados de la superficie por la luz laser y dirigidos hacia el acelerador por una diferencia de potencial. Como la luz del laser es polarizada, los electrones que se producen tienen sus espines (el momento angular) alineados en una dirección particular, lo cual beneficia su viaje a través del tubo guía impulsados por ondas electromagnéticas.

Inmediatamente después de sufrir la primera aceleración los electrones entran a un tubo de cobre largo, el que contiene discos con un agujero central circular. Esta geometría dentro del tubo guía forma cavidades resonantes, del tamaño adecuado para la transmisión de la señal de microondas. Por diseño, típicamente el tubo guía tiene un diámetro de 0.77λ , dimensiones en el que la onda guiada tendría espacio suficiente para desplazarse libremente.

Por alimentar poderosas señales electromagnéticas transversales al tubo guía, en el intervalo de las microondas, dentro de las cavidades resonantes, **se producen pulsos de campos eléctricos**, que efectivamente viajan dentro del tubo guía, ver la figura 3.3, y suministran aceleración para los electrones que viajan "montados" en estos campos.

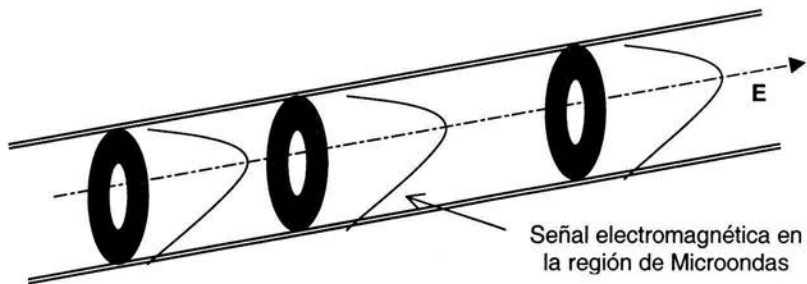


Figura 3.3 Tubo Guía en donde se producen pulsos de campos eléctricos.

Los electrones se montan en los campos eléctricos producidos por las microondas semejante a los "surfers" que se montan en las olas marinas, eTransporte y aceles decir se montan en una "onda viajera", ganando energía en cada instante por la presencia del campo eléctrico. El haz de electrones es en realidad una serie de pequeños paquetes que están justo a tiempo para entrar en el máximo del campo eléctrico ver figura 3.4, cuando este está dirigido en el modo que puede acelerarlos, con las siguientes características: cuando un electrón se retrasa ligeramente del máximo de campo eléctrico, "sentirá" una mayor aceleración que lo integrará al paquete de electrones, caso contrario, si se adelanta "sentirá" una menor aceleración y también se integrará al campo, por este hecho los paquetes siempre estarán compactados como una unidad.

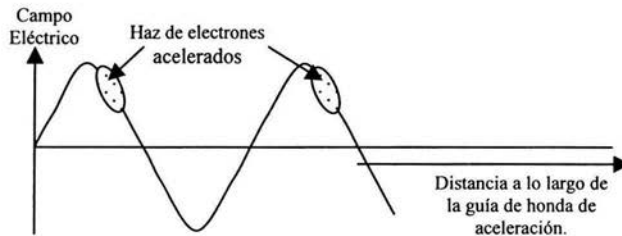


Figura 3.4 Transporte y aceleración de electrones por las ondas viajeras electromagnéticas a lo largo de la guía de onda del acelerador.

El incremento de la longitud de la separación entre las cavidades del tubo guía es debido al incremento de la velocidad del electrón. Si el tiempo de viaje a través del tubo guía es exactamente el mismo tiempo entre cavidades entonces la distancia entre ellas debe modificarse proporcionalmente al incremento de la velocidad.

Podemos describir el concepto anterior de modo más técnico. Las cavidades responden a la entrada de la microonda resonando de un modo particular, produciendo un modo de frecuencia que tiene una componente del campo eléctrico a lo largo del eje del tubo guía, es decir a lo largo del acelerador, y un campo magnético cilíndrico a lo largo de la parte interna del tubo guía. El campo eléctrico es el necesario para acelerar los electrones a través del tubo guía. También existe un campo magnético que suministra una fuerza hacia el centro del acelerador el cual compensa la fuerza de repulsión coulombiana entre los muchos electrones que pertenecen al paquete. El espaciado entre cavidades y la frecuencia del oscilador es seleccionada para que los electrones viajen a velocidades muy cercanas a la velocidad de la luz, y es solamente en la cavidad donde el campo eléctrico es el adecuado para dirigir y acelerar los electrones a través del tubo guía.

El campo electromagnético puede también entonarse para formar ondas estacionarias, semejantes a las que se produce en una cuerda de guitarra, con ciertos puntos que no vibran, llamados nodos, y otros que vibran con máxima amplitud. Las cavidades del tubo actúan como resonadores. Estas dos ondas estacionarias pueden considerarse como la superposición de dos ondas viajeras

que se mueven en dirección opuesta, una partícula cargada puede viajar en una de ellas.⁽¹⁾

Los aceleradores lineales de este tipo también se emplean en la aceleración de iones positivos, usando tubos dentro de una gran cavidad de resonancia.

Por último, al final del tubo se pueden montar diversos dispositivos de acuerdo a la utilidad que se desean dar a los electrones, en uno de estos casos, se pueden proyectar sobre un material de alta Z, para producir rayos X.

La buena aceptación que han tenido estos aceleradores se debe principalmente a que se puede variar la energía de los electrones y a que el haz de éstos al salir del tubo acelerador, puede dirigirse fácilmente a diferentes partes de una instalación según las distintas aplicaciones. Además el tamaño del haz puede controlarse por medio de campos eléctricos y magnéticos. Estas características favorables han limitado mucho el empleo de otro acelerador, el betatrón, que hace algunos años se empleaba en numerosos laboratorios para acelerar electrones.

En las ciencias médico-biológicas se emplea en irradiación de productos y en terapia médica.⁽¹⁾

4.- TEORÍA DE BLINDAJES PARA RADIACIÓN X Y ELECTRONES

4.1. Interacción de la radiación electromagnética ionizante con la materia

La radiación electromagnética ionizante (rayos X y gamma) interactúan con la materia en alrededor de 8 formas algunas de ellos son: Efecto Fotoeléctrico, Efecto Compton, Producción de par, Dispersión Rayleigh o Coherente y efectos fotonucleares, etc. de estas formas de interacción las tres primeras son las más importantes en el intervalo de energías de 0.01 y 100 MeV su importancia relativa depende de la energía del fotón y el número atómico del material absorbedor.

A continuación se dará una pequeña descripción de estos tres efectos.

A) Efecto Fotoeléctrico

Este efecto, se debe a la interacción de un fotón gamma o X incidente sobre los electrones de un átomo absorbedor, el fotón desaparece totalmente porque cede toda su energía a un electrón el cual es expulsado de su órbita con gran energía cinética, es decir, un fotoelectrón (ver figura 4.1). El origen más probable de un fotoelectrón son las capas electrónicas más cercanas al núcleo o sea, K y L. Este efecto es el modo predominante de interacción para rayos gamma o rayos X de baja energía y para materiales absorbedores de alto número atómico.

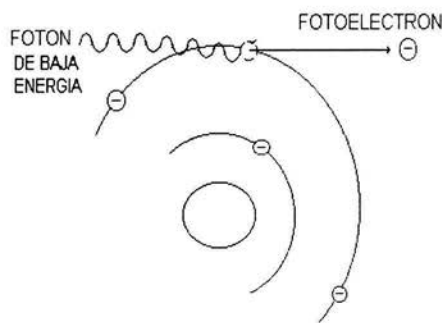


Figura 4.1. Efecto Fotoeléctrico

B) Efecto Compton

En este efecto el fotón interactúa con un electrón orbital cediéndole sólo parte de su energía a la vez que es desviado en un ángulo θ , ver figura 4.2. Mientras mayor es el ángulo de desviación, mayor es la energía cedida al electrón (aunque la relación no es lineal). Esta energía cedida al electrón va desde casi cero a grandes fracciones de energía del rayo X o γ . La energía que no es cedida al electrón la conserva el fotón desviado.

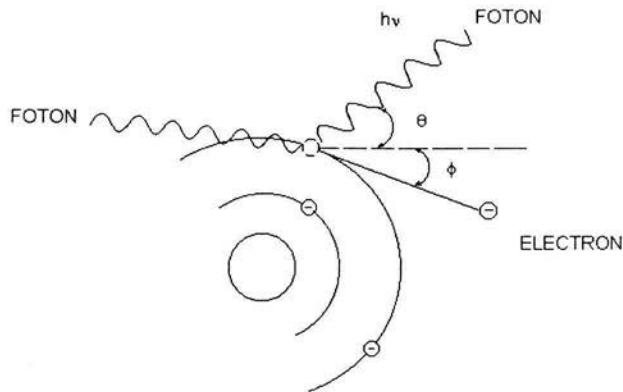


Figura 4.2. Efecto Compton

C) Producción de Pares

Si la energía de los rayos x o gamma excede el doble de la energía equivalente a la masa del electrón 1.022 MeV, entonces se puede llevar a cabo el proceso de producción de pares (este proceso solo es probable para fotones de alta energía). En esta interacción el fotón desaparece debido a que al acercarse al núcleo interacciona con el campo eléctrico de este, y se transforma en un par electrón-positrón que salen en dirección opuesta, ver figura 4.3. Por ejemplo, si la energía del fotón es de 5 MeV, 1.022 MeV se usarían para producir el par, y 3.078 MeV se transformarían en energía cinética del electrón y del positrón. El electrón y el positrón ceden su energía al medio, pero mientras el electrón se recombina en el medio, el positrón toma un electrón del medio para producir la aniquilación de pares.

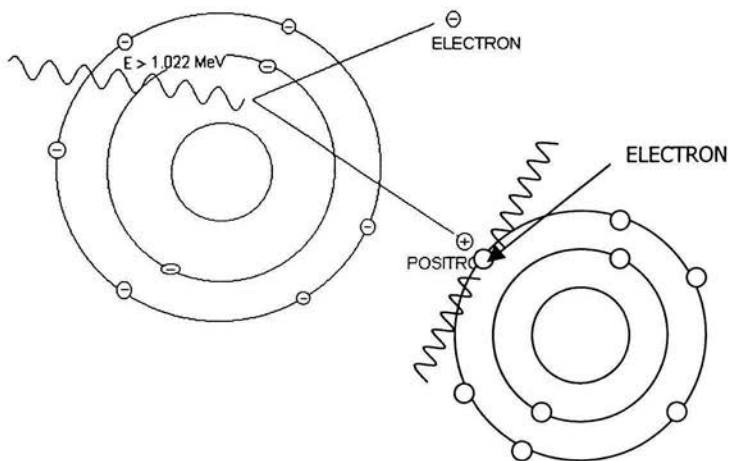


Figura 4.3. Producción de Pares y aniquilación de pares respectivamente

4.2. Interacción de las partículas cargadas (electrones, iones, radiación alfa, etc.) con la materia.

Las partículas cargadas como los electrones, las alfa, los iones positivos pesados, etc interactúan con la materia por fuerzas coulombianas del tipo $F = K_o \frac{q_1 q_2}{r^2}$; éstas partículas al interactuar con la materia producen una serie de efectos que son función del tipo de partícula, de su energía y del medio material en el que sufre la interacción.

En general, cuando un haz de partículas cargadas interactúa con la materia, tiene lugar una serie de procesos que ocasiona atenuación del haz incidente. Este fenómeno se puede producir por degradación energética, dispersión, captura o transformación de las partículas primarias.

Cuando una partícula cargada penetra en un medio material, experimenta una serie de colisiones con los átomos constituyentes. Sin embargo, dado "el vacío" relativo existente en el interior del átomo, las colisiones mecánicas por choque directo entre la partícula y los electrones o núcleos del medio, son poco probables. En realidad, el proceso predominante es la COLISIÓN COULOMBIANA: proceso de interacción debido a las fuerzas eléctricas producidas entre la partícula incidente y los electrones y núcleos del medio absorbente. Esta interacción produce una pérdida casi continua de la energía de la partícula, hasta llegar a detenerla.

A continuación se describen los procesos mediante los cuales las partículas pierden su energía al interactuar con el medio material:

A) Colisión elástica

En este tipo de colisión, se conserva tanto la energía cinética como la cantidad de movimiento. En estos casos, la partícula se desvía de su trayectoria, cediendo parte de su energía en forma de energía cinética. En estas colisiones, no se produce en el medio ninguna alteración, ni atómica ni nuclear.

B) Colisión inelástica

Aquí se conserva la cantidad de movimiento, pero NO la energía cinética. La partícula, al sufrir estas colisiones con los átomos del medio, modifica su estructura electrónica, produciendo excitación, ionización o disociación.

C) Colisión con emisión de radiación electromagnética

Si la partícula cargada se frena por la acción de una deceleración tangencial, o se desvía de la trayectoria por la acción de una aceleración normal, se emite radiación electromagnética.

Evidentemente las partículas pueden sufrir también colisiones con los núcleos atómicos, produciendo reacciones nucleares, pero estos procesos son relativamente poco probables, y por tanto, no suelen considerarse en los procesos de interacción.

La materia debido a estas colisiones se puede ionizar, excitar, disociar, y/o producir radiación de frenado, a continuación se da una descripción de estos procesos:

- **Ionización:** Si en los choques de la partícula con los electrones atómicos, la energía transferida es superior a la "energía de enlace" (energía de ionización) del electrón, este abandona el átomo y por lo tanto se crea un par ión-electrón. En este proceso de ionización podemos encontrarnos con **ionizaciones primarias y secundarias**, la primera se debe al choque de las partículas incidentes y la segunda se debe a que los electrones que salen expulsados de la primera ionización tienen la energía suficiente para producir más ionizaciones. La **ionización específica** (I_e) es el número de pares ión-electrón producidos por la partícula incidente, por unidad de recorrido de material; ésta ionización varía a lo largo del recorrido de la partícula, alcanzando un valor máximo hacia el final de la trayectoria, cuando la velocidad es relativamente baja. A partir del máximo, la ionización específica disminuye drásticamente, debido a la neutralización de la carga positiva de la partícula, por electrones del medio absorbente.
- **Excitación:** Cuando en la colisión de la partícula incidente con un electrón atómico, la energía transferida es insuficiente para producir ionización, el electrón impactado no puede ser expulsado del átomo, pero sí puede ser promovido a una órbita de mayor energía. Tal electrón excitado devolverá la energía en forma de radiación electromagnética, en las llamadas transiciones con emisión de radiación electromagnética, o bien degradándose a calor.
- **Disociación:** Cuando la energía cedida a una molécula por una partícula alcanza cierto valor crítico, puede producirse el fenómeno de *disociación* o *radiólisis*. Tal proceso, consiste en la ruptura de enlaces químicos moleculares, y produce transformaciones químicas en las sustancias irradiadas. Los efectos más intensos de la radiólisis se producen en moléculas con uniones covalentes, cuya disociación crea *radicales libres*. Un ejemplo típico lo tenemos en el caso de la radiólisis del agua que tras generarse radicales libres (caracterizados por una gran reactividad química) desemboca en la formación de agua oxigenada e hidrógeno molecular.
- **Radiación de Frenado o Bremsstrahlung:** Cuando una partícula incidente de masa M y carga " q " (carga elemental) penetra en el campo eléctrico de un núcleo atómico con carga Q experimenta la acción de una fuerza eléctrica y por tanto de una aceleración que resulta ser proporcional a qQ/M . De acuerdo con las leyes de la electrodinámica clásica, una partícula cargada al ser acelerada, emite radiación electromagnética ver figura 4.3, cuya intensidad es proporcional al cuadrado de la aceleración, esto es:

$$I = c \frac{q^2 Q^2}{M^2}$$

donde c es una constante de proporcionalidad, I es la intensidad de radiación electromagnética emitida. La energía de los fotones de frenado tiene valores comprendidos entre cero y la energía cinética de la partícula al producirse la colisión, correspondientes a procesos de frenado tanto más intensos cuanto

menor sea la distancia entre la trayectoria inicial de la partícula y el núcleo (parámetro de impacto).

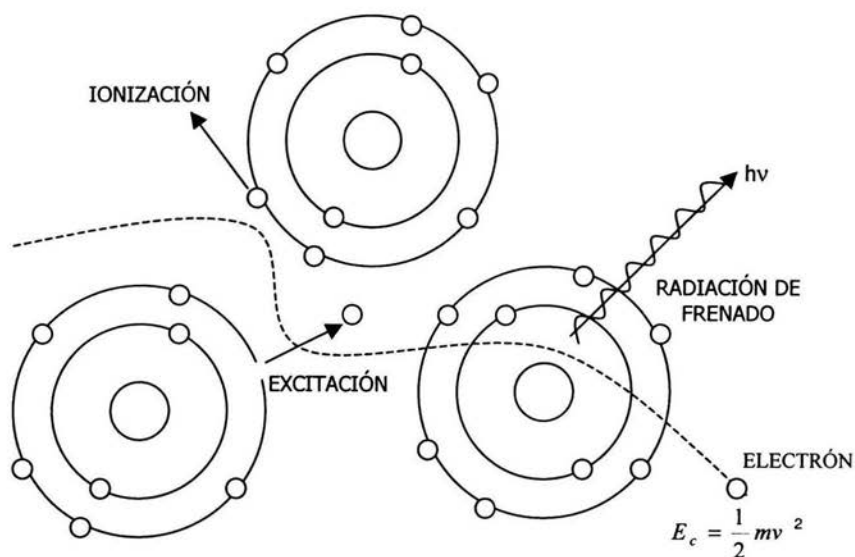


Figura 4.4 Interacción de una partícula (electrón) con los átomos del medio absorbente. Pendiente

La energía de los fotones de frenado tiene valores comprendidos entre cero y la energía cinética de la partícula al producirse la colisión, correspondientes a procesos de frenado tanto más intensos cuanto menor sea la distancia entre la trayectoria inicial de la partícula y el núcleo (parámetro de impacto).

Una magnitud muy importante en la descripción cuantitativa de la pérdida de energía, es el **poder de frenado**, que se define como la pérdida de energía de la partícula por unidad de longitud. La pérdida de energía de una partícula al interactuar con el medio depende de las ionizaciones y excitaciones que haga a su paso así como de pérdidas por emisión de radiación electromagnética. El poder de frenado por radiación es despreciable en el caso de las partículas pesadas, pero tienen una gran importancia para electrones. Es importante hacer notar que en todas las interacciones que tienen las partículas cargadas con la materia, la pérdida de energía es proporcional con la densidad y el número atómico del medio de interacción así como del tipo de partícula de que se trate y su energía.

Para el caso de electrones la pérdida de energía al interactuar con un medio material obedece aproximadamente a una expresión de la forma:

$$\left[-\frac{dE}{dx} \right]_{\text{radiación}} = c\rho ZE_c$$

Donde c es una constante, ρ es la densidad del medio, Z es el número atómico del medio y E_c es la energía cinética del electrón.

Dado que el poder de frenado depende de la densidad del medio, para evitar esta dependencia se mide el recorrido de las partículas y los espesores de los absorbentes, no en unidades de longitud, sino de masa por unidad de superficie. Tal magnitud recibe el nombre de **espesor másico**, X_m , en Kg/m^2 para el S.I.. A un recorrido de espesor lineal x corresponde un espesor másico X_m dado por:

$$X_m = x\rho$$

Así por ejemplo, el poder de frenado másico se define como:

$$\left[\frac{dE}{dx_m} \right] = \frac{1}{\rho} \left[\frac{dE}{dx} \right]$$

Es importante señalar que debido a la pérdida de energía por radiación, no toda la energía cedida al absorbente por la partícula, será absorbida en el medio de interacción, ya que en general, la energía cedida es menor que la energía absorbida o transferida. A la energía transferida por unidad de recorrido se le denomina también **transferencia lineal de energía (LET)**.

Otro parámetro importante de tomar en cuenta en la interacción de las partículas cargadas con la materia es el **alcance que tienen las partículas**. Se define el alcance de una partícula cargada en su interacción en un medio natural, como la máxima distancia de penetración en el medio absorbente. En el caso de partículas pesadas, el alcance coincide con la longitud de la trayectoria, ya que ésta es muy aproximadamente rectilínea. Sin embargo, en el caso de electrones, la trayectoria es muy sinuosa, por lo que el alcance resulta ser muy inferior a la longitud de la trayectoria.

Si se considera un gran número de partículas, el concepto de alcance presenta ciertas dificultades para su definición. Si las interacciones de todas las partículas de un haz colimado (trayectorias paralelas para todas las partículas) fueran idénticas, al representar el número de partículas, N , que franquean un espesor absorbente, d , se obtendría una "distribución rectangular": todas las partículas tendrían la misma penetración. Sin embargo, como cada colisión es independiente de las restantes, la pérdida de energía sufre fluctuaciones estadísticas con el resultado de que la distribución real deja de ser "rectangular" y aparece un punto de inflexión. Para subsanar esta dificultad se hace una extrapolación de los datos.

4.3 Radiación primaria, Radiación reflejada, Radiación reflejada de la atmósfera, Laberintos y ductos.

4.3.1 Radiación Primaria (su energía y su rapidez de emisión)

El haz de radiación directa que proviene de la fuente de radiación se conoce como radiación directa o radiación primaria. En un acelerador de electrones, el haz de electrones que se proyecta sobre el blanco es **radiación primaria**. El choque de los electrones en el blanco induce la radiación X o de frenado (bremsstrahlung) haciendo que el blanco sea una fuente de radiación y **las emisiones que parten de ésta serán también radiación primaria** ver figura 4.5.

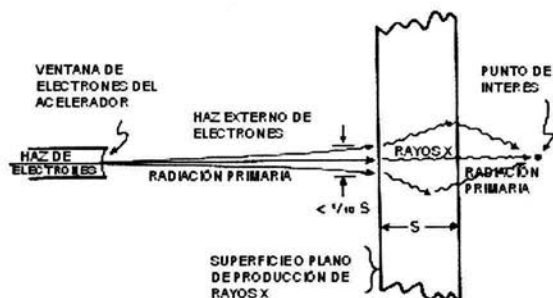


Figura 4.5 Ejemplos de flujos de radiación primaria

El flujo de radiación y la energía del haz primario son cantidades que establece las características propias de la fuente de radiación. Así en un radioisótopo, la actividad y su estado energético definen estos parámetros para la radiación emitida. En un tubo de rayos X el kilovoltaje y la corriente aplicada así como el material del que está hecho la combinación ánodo-filtro, definen el flujo y la energía del haz. En el caso de los aceleradores lineales de electrones, la energía cinética alcanzada por las partículas aceleradas y el material blanco con las que éstas chocan definirían en principio el espectro de energía de las haces primarios; la corriente aplicada en el cañón de electrones define en principio el flujo máximo posible de electrones o de rayos X producidos.

La rapidez de fluencia de partículas o de fotones (Φ) que es conocida prácticamente como intensidad de radiación en un flujo de radiación primaria, debe conocerse en todos los casos pues es primordial en el cálculo de blindajes. Para el caso de una muestra radiactiva esta rapidez de fluencia puede determinarse mediante:

$$\Phi = An/a \quad (1)$$

Donde:

A es la actividad de la fuente en desintegraciones/segundo (Bq)
n es la abundancia de desintegración de partículas (partículas/desintegración)
a: área transversal al flujo de radiación.

En el caso de un acelerador de electrones no es tan sencillo pues si bien puede calcularse la rapidez de fluencia en condiciones ideales, el dato real depende de una cierta cantidad de factores de diseño del sistema que considera entre otras cosas la eficiencia de producción de electrones del cañón, la eficiencia de aceleración de electrones en el tubo de aceleración y las características físicas y químicas del material blanco así como su geometría como factores principales, adema de que el haz tiene espectro continuo de energía y no es isotrópico.

El flujo de electrones que choca contra el blanco en un acelerador de electrones queda definida por la corriente aplicada en el cañón. Así por ejemplo:

Si la Intensidad de corriente es igual a 1mA entonces $\Phi = 6.2418 \times 10^{15}$ eletrones/seg ya que 1 A = 1 coulumb/segundo y la carga de un electrón (q_e) es igual a 1.6022×10^{-19} .

La eficiencia de producción de rayos X en el blanco depende principalmente del ángulo de incidencia de los electrones, de la energía de los electrones y del numero atómico (Z) del blanco. En ciertos casos el fabricante de estos sistemas proporciona el dato a través del rendimiento del equipo que indica la intensidad de rayos X o electrones a un metro de la salida del acelerador. Este dato puede presentarse en unidades de rapidez de dosis absorbida por unidad de corriente o rapidez de dosis equivalente por unidad de corriente. Existen gráficas que muestra la rapidez de dosis absorbida debida a rayos X a un metro del blanco por unidad de corriente; los valores en estas gráficas se presentan en función de la energía y del ángulo de los rayos X producidos debido a la incidencia de los electrones, en el siguiente capítulo se mostrarán este tipo de gráficas.

En estas gráficas, la rapidez de dosis absorbida reportada a un metro es para blancos de alto Z y son utilizados regularmente por su eficiencia de producción de rayos X. Cuando el haz de electrones se utiliza como el haz útil, deberá considerarse la producción de rayos X en el material donde éstos se impactan.

A fin de evaluar el blindaje por el lado desfavorable*, debemos considerar el material de impacto (blanco) en el que más se produzcan rayos X; así por ejemplo, si el haz de electrones se utilizara para irradiar productos orgánicos de cierto espesor, debemos evaluar la cantidad de electrones que atraviesan el producto irradiado y eventualmente se impactarían en el material posterior.

La producción de rayos X se evaluaría entonces en el blanco donde la intensidad producida sea considerablemente mayor.

Teniendo como ejemplo una instalación dedicada a irradiar con electrones productos orgánicos de densidades similares a la del agua, dentro de un cuarto de irradiación construido con concreto, y observando que la producción de rayos X en el producto es despreciable sobre la que se genera por el impacto de electrones en el concreto, consideraríamos al concreto como blanco. Con ello no serviría directamente la información presentada en las gráficas mencionadas pues el concreto no es de alto Z. En este sentido se tiene datos que han evaluado la diferencia de producción de radiación para materiales de bajo Z. El NCRP-51 (NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements) por ejemplo, menciona que la emisión de rayos X en la dirección frontal (0°) varía ligeramente en función de Z, por ejemplo con electrones de energías bajas (1.25 a 2.35 MeV), esta variación es aproximadamente proporcional a $Z^{1/2}$. Para energías altas (hasta 100 MeV), esta aproximación también es razonable. La rapidez de emisión a 0° de las gráficas mencionadas sería multiplicada por los siguientes factores según los materiales blancos indicados:

BLANCO	Z	FACTOR
FIERRO O COBRE	26 o 29	0.7
ALUMINIO (CONCRETO)	13	0.5

La rapidez de emisión de rayos X en la dirección lateral (90°) es mas dependiente de Z, particularmente a energías bajas del electrón (<10MeV). En este caso, los factores que se aplican son los siguientes:

BLANCO	Z	FACTOR
FIERRO O COBRE	26 o 29	0.5
ALUMINIO (CONCRETO)	13	0.3

En protección radiológica es común hacer estimaciones suponiendo las variables que presentan mayor dosis al personal a fin de encontrar el tiempo, la distancia y el blindaje que presente condiciones por debajo del límite de dosis establecido. Esas suposiciones son llamadas "el lado desfavorable".*

Con energías del electrón mayores a 10 MeV y en la dirección de 90° , se puede usar la rapidez de emisión indicada en las graficas mencionadas para todos los materiales blancos.

La energía de los rayos X generados en el blanco, presenta un espectro continuo (ver figura 4.6) que tendrá como máximo valor, la energía que tiene el haz de electrones que se impactan, la cual se asume que es monoenergética para un valor definido específicamente por el acelerador.

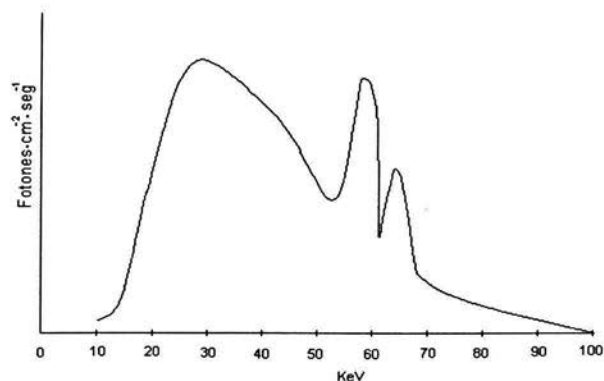


Figura 4.6 Espectro continuo de energía que se forma al impactarse electrones con un blanco.

La distribución de la energía concerniente al blanco (incluyendo su magnitud en función del ángulo), es de gran importancia para determinar las características de atenuación de la radiación (recordemos que los coeficientes de atenuación son función de la energía). En algunas ocasiones puede no conocerse el espectro de energía con lo cual ciertas gráficas de transmisión se grafican en términos de la energía de la partícula acelerada y del espesor del blanco en el cual impacta.

El espectro de rayos X a 90° es de mas baja energía que el espectro de rayos X a 0° . Así observamos datos que indican que a 90° debe asumirse una energía equivalente para el electrón incidente que no es precisamente la que tiene el haz de electrones que impactan. Ver figura 4.7

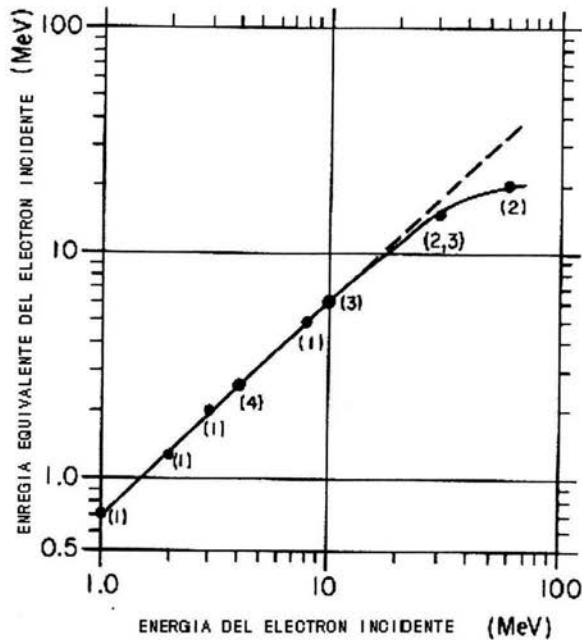


Figura 4.7 Energía equivalente del electrón para analizar la transmisión de rayos X emitidos en la dirección de 90° desde un blanco de alto Z, como una función de la energía del electrón incidente. Referencia NCRP 51 (1).

Si bien la energía máxima del espectro continuo de rayos X queda definida por la energía del electrón incidente, la mayoría de los fotones tiene energías cuya magnitud se encuentra en el orden de un tercio a un medio de esta energía máxima. En simplificaciones de cálculo podemos entonces suponer que la energía representativa del haz de rayos X producido, es un medio de la energía máxima del espectro continuo y manejar el cálculo como un haz monoenergético. El NCRP 51 considera la energía máxima como valor monoenergético, siendo estrictos deberíamos calcular el valor de energía espectral.

4.3.2 Radiación reflejada

Los rayos X producidos dentro del recinto utilizado como blindaje por efecto de las dispersiones del haz primario constituyen la radiación reflejada, a ésta radiación también se le llama radiación dispersa y se debe a la interacción que tiene la radiación con la materia. Este tipo de radiación es de mucha importancia en los aceleradores y deben considerarse en el diseño de los laberintos y ductos así como en el cálculo de barreras de protección (blindajes).

Los rayos X reflejados y retroreflejados pueden ser de baja energía y rapidez de dosis absorbida, pero pueden ser los de mayor influencia en el cálculo de blindajes en ciertas circunstancias donde el blindaje local atenúa los rayos X primarios de 90° y de 180° , por ejemplo en radioterapia o en radiografía.

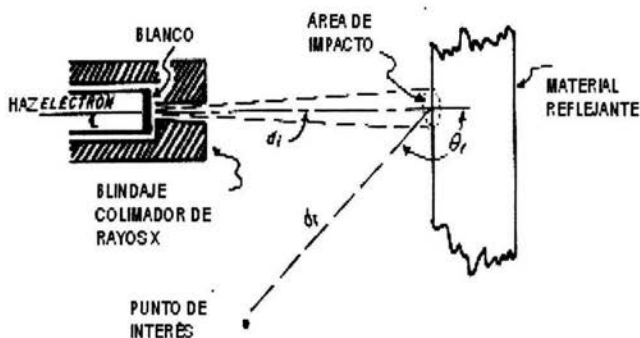


Figura 4.8 Geometría de reflexión de rayos X para una incidencia perpendicular

Considerando la figura 4.8, tres parámetros son de importancia en el cálculo de barrera de protección para rayos X reflejados:

- La rapidez de dosis absorbida de rayos X reflejados.
- La distancia entre el material reflejante y el punto de interés.
- Las características de transmisión de los rayos X reflejados a través del material utilizado como blindaje.

Nuevamente en este tema observamos fuertes dependencias de la rapidez de dosis absorbida (inciso a) con el ángulo de incidencia del haz precedente, la energía de éste, el área de impacto en el material reflejante y la densidad de éste. Estas características (a excepción del área de impacto) se engloban en el **coeficiente de reflexión α** .

En el siguiente capítulo se encontrarán graficados valores de α_x como una función de la energía del fotón monoenergético incidente (de 0.1 a 10 MeV) para distintos ángulos de reflexión en concreto y hierro. Para el plomo se tiene un valor

conservador como límite superior de $\alpha_x = 5 \times 10^3$ para cualquier energía y ángulo de reflexión.

Para estimar α_x para un espectro de rayos X que se impacta en el material reflejante se requerirá suponer que la *energía efectiva monoenergética* del espectro es cerca de la mitad de la energía del electrón que produce el rayo X.⁽⁸⁾

Para abundar acerca de la energía a considerar en la radiación reflejada cuando se calculan blindajes (es decir cuando se investiga el valor del *Factor de Transmisión*), debemos considerar lo siguiente:

1. Rayos X que provienen de electrones con energías menores a 0.5 MeV.- Se hace la suposición que la transmisión de la radiación reflejada a través de un blindaje es la misma que la que presenta el haz de rayos X que Incide sobre el material reflejante.
2. Rayos X que provienen de electrones con energías entre 0.5 y 3 MeV.- En este rango de energía, los rayos X reflejados, se producen predominantemente por la dispersión Compton, especialmente en materiales de bajo Z. Por lo tanto, la energía máxima del rayo X reflejado no puede ser mayor que la calculada por la relación de dispersión Compton. Conservadoramente, podríamos estimar la transmisión de la radiación reflejada para estos casos con las siguientes energías:

<i>Ángulo de reflexión</i>	<i>Energía que se supone</i>
90°	0.5 MeV
180°	0.25 MeV

3. Rayos X que provienen de electrones con energías entre 3 y 10 MeV.- En este rango de energía deberá considerarse el efecto de aniquilación de pares. Por consiguiente, deberán usarse curvas de transmisión para 0.5 MeV para ángulo de 90° o mayores.
4. Rayos X que provienen de electrones con energías mayores a 10 MeV.- Para este caso, la información disponible respecto a las características de rayos X reflejados no es adecuada como para proporcionar mas que recomendaciones conservativas para estimar tanto el factor de transmisión como el coeficiente de reflexión. Ubicándose en la situación desfavorable (lado seguro), los valores de α_x serían equivalentes a los de fotones de 10 MeV en concreto ordinario, y de 1×10^{-2} en magnitud para el hierro. Se asume que la transmisión para estas energías es la misma que la que presentarían los rayos X primarios (es decir los originados en el choque de los electrones) producidos en dirección lateral (90°).

4.3.3 Radiación reflejada de la atmósfera

En el diseño de instalaciones de aceleradores, éstas deben de estar cerradas y separadas a cierta distancia de otras construcciones; la pregunta que frecuentemente se origina es respecto a la magnitud del blindaje que se requiere para el techo del área de radiación. Suponiendo un techo ordinario, por ejemplo, uno diseñado solo para protección contra el clima, este techo proporciona poca protección contra la radiación en la dirección superior (hacia arriba), en este caso hay una gran probabilidad de que la radiación reflejada de la atmósfera exceda la rapidez de dosis equivalente límite H_M . A esta radiación reflejada se le conoce como "skysane"⁽⁸⁾ ver figura 4.9.

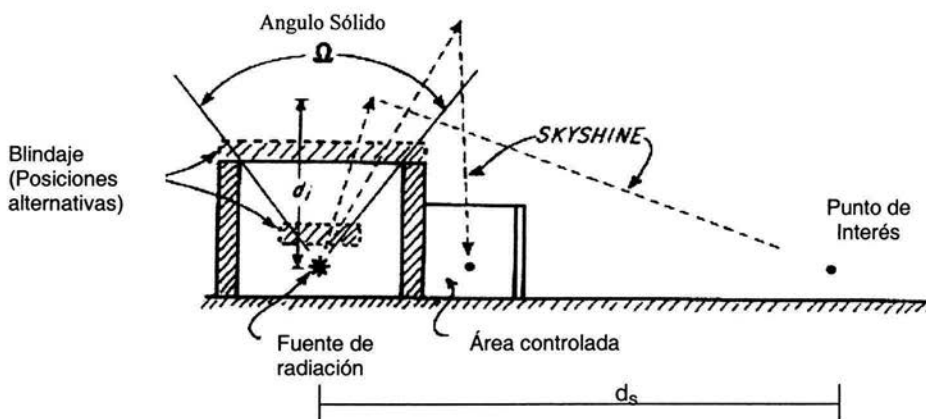


Figura 4.9 Radiación reflejada de la atmósfera "skysane"

El espesor del blindaje para radiación reflejada de la atmósfera puede ser calculado por el mismo método que se usa en el caso de la radiación primaria, pero cuando la radiación reflejada de la atmósfera domina la situación, entonces tenemos que tomar en cuenta que la rapidez de dosis absorbida D_{1s} que se tiene a una distancia (d_s) y el ángulo sólido (Ω) que forma la radiación primaria dirigida hacia arriba, esto para calcular el coeficiente de transmisión del techo B_{xs} debida a la radiación reflejada de la atmósfera.

El blindaje obtenido puede colocarse a la altura del techo o directamente sobre la fuente de rayos X con una área lateral suficiente para cubrir el ángulo sólido Ω .⁽⁸⁾

4.3.4 Laberintos y ductos

- **Laberintos**

Los laberintos sirven para protegernos de la radiación dispersa (reflejada) que se escapa de las regiones de irradiación cerradas, estas radiaciones pueden ser electrones, radiaciones gamma y/o rayos X. Los laberintos se usan particularmente en instalaciones de aceleradores de electrones y generadores de rayos X. Así como también en instalaciones con fuentes de radiación gamma de alta actividad.

Las dimensiones (largo, ancho, espesor y alto) y forma de los laberintos esta determinado por la trayectoria de la radiación primaria y dispersa (reflejada) y de la dosis que de ésta se pueda recibir al final. También depende del acceso de personal a la sala de irradiación, movimiento del equipo, del costo y del espacio disponible en ese lugar, por lo que se deben adecuar a las necesidades que se tienen.

El costo del blindaje depende en gran medida de las necesidades de la instalación, de la aplicación que se va dar a la fuente de radiación ionizante, de las etapas que sean necesarias para atenuar la radiación adecuadamente, de las dimensiones del laberinto, del material de blindaje (normalmente se usa concreto ordinario), etc. Por economía en la construcción o espacio, es recomendable poner un "blindaje adicional" para atenuación adicional y/o atenuación de la radiación.

La dosis que se recomendada en este trabajo para la construcción del blindaje es la dosis que puede recibir el público que es de 0.25 mR/h (Art. 37 RGSR), si por algún motivo esto no es posible podemos diseñar el laberinto con una dosis de 2.5 mR/h que es la que puede recibir un POE (Art. 41 RGSR), se puede interponer una puerta plomada con suficiente espesor a la entrada del laberinto para reducir la dosis a niveles adecuados.

Para el cálculo de blindaje es indispensable tomar como base la trayectoria mas corta que toma la radiación dentro del laberinto a esta trayectoria se le conoce como **trayectoria crítica** (ver línea punteada que da hacia el punto A' en el la figura 4.7). Dependiendo de la energía y de la "rapidez de emisión" de la radiación incidente sobre el primer material reflejante pueden requerirse en el laberinto etapas adicionales para lograr al final la dosis recomendada. En la medida de lo posible la "abertura interna" del laberinto no debe ser expuesta a las radiaciones que son emitidas directamente del blanco, por el contrario debería ser expuesto solo a radiación reflejada de las barreras primarias de blindaje.

Es necesario considerar el área de impacto para el cálculo de laberintos. En este sentido se debe estimar el área del primer impacto para la primera reflexión. En las reflexiones sucesivas se sabe que una relación de área altura/ancho entre 1 y 2 se mantiene aproximadamente constante para el cálculo de las paredes en el laberinto subsecuente.

En cualquier diseño de laberinto, la suma de los espesores de pared en la trayectoria de la radiación al punto de interés, deberá ser equivalente al espesor de la barrera de blindaje calculado como si fuera primaria.

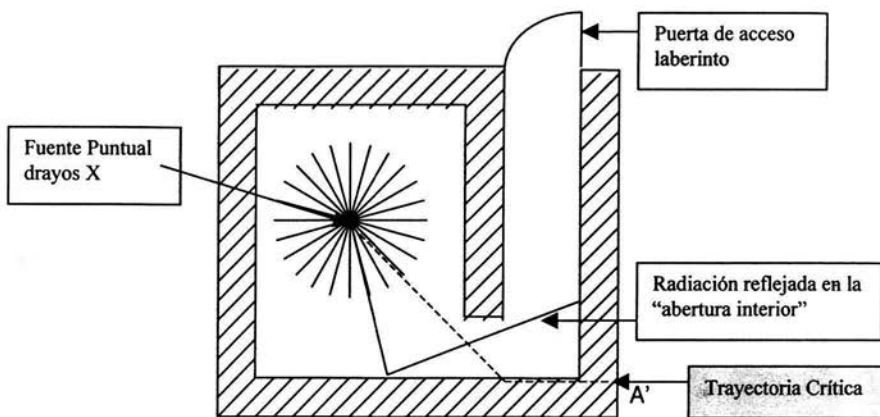


Figura 4.10 Laberinto que sirve como blindaje de una fuente puntual de rayos X

Ductos

Los ductos son necesarios en las instalaciones radiactivas para el cableado eléctrico, para la tubería de agua, para sistemas de extracción e inyección de aire, por lo que es necesario tomar en cuenta como interactúa la radiación en estos ductos.

En el capítulo siguiente se describen las ecuaciones que se utilizan para cálculo de blindajes en instalaciones de irradiación con electrones de cada uno de los casos descritos anteriormente.

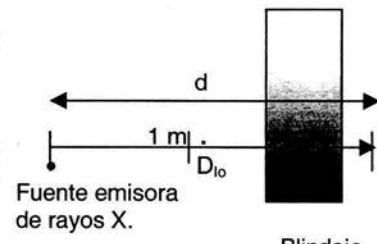
5. Cálculo para el Blindajes de una Instalación con Acelerador Lineal

5.1 Método de cálculo de blindajes para rayos X

La atenuación de rayos X sigue un comportamiento exponencial. Con cada fracción de espesor de material, la rapidez de dosis se disminuye en una pequeña fracción y teóricamente nunca llega a cero. Por ello es necesario determinar la razón de transmisión de los rayos X en el blindaje que pueda reducir la rapidez de dosis equivalente hasta los límites permisibles apropiados H_M . A esta razón la llamaremos *factor de transmisión* B_x . A partir del conocimiento del factor de transmisión y mediante el conocimiento de la energía de los rayos X, se puede conocer el espesor de blindaje necesario para alcanzar dicha relación de transmisión, para ello es necesario contar con *gráficas de transmisión* adecuadas. Por ejemplo, la publicación 51 del NCRP, proporciona varias gráficas de este tipo para distintos materiales de blindaje propuestos. El cálculo de B_x requiere el conocimiento del flujo de radiación que se pretende atenuar (intensidad, energía, etc). Debemos partir principalmente del establecimiento del tipo de radiación X de que se trata, esto es, primaria o reflejada.

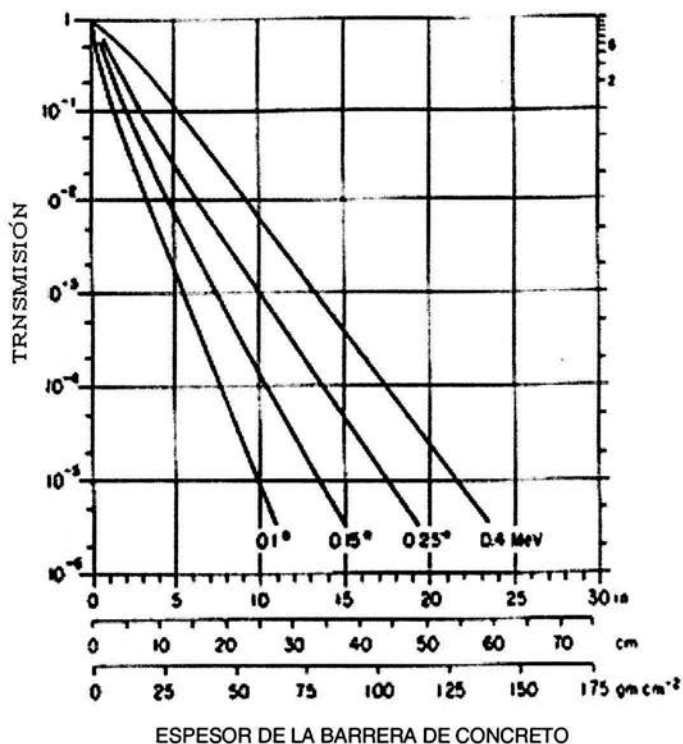
5.1.1 Cálculo para radiación primaria.

Cuando la radiación primaria domina la situación de blindajes, entonces, para una fuente puntual de rayos X, tenemos las siguientes expresiones:

5.1.1.-RAYOS X PRIMARIOS.		
Ecuación.	DESCRIPCIÓN	APÉNDICE
$B_x = 1.67 \times 10^{-5} \frac{H_m d}{D_{10} T} \dots(A)$  <p>Fuente emisora de rayos X.</p> <p>Blindaje</p>	<p>Fracción de transmisión del blindaje para rayos X, esta gobierna el espesor del blindaje.</p>	<ul style="list-style-type: none"> El espesor del blindaje se puede obtener por medio de las curvas de transmisión para una geometría de haz ancho Figura 5.1 y 5.2 Ver figuras 5.3 y 5.4 para obtener la rapidez de dosis absorbida \dot{D}_{10}.

$\dot{H}_{Id,x} = \frac{\dot{D}_{10} BxT}{(1.67 \times 10^{-5})d^2} \leq \dot{H}_m \dots(B)$	<p>Rapidez de dosis equivalente en un punto de referencia, esta no debe de exceder la rapidez de dosis equivalente máxima permisible \dot{H}_m a ésta ultima también se le conoce como rapidez de dosis limite.</p>	<p>No existe</p>
$n = \log_{10} \frac{I}{B_x} \dots(C)$	<p>Numero de capas decirreductoras (CDR'S) del material que es requerido para disminuir la radiación a niveles límite.</p>	<p>No existe</p>
$s = T_1 + (n-1)Te \dots(D)$	<p>Espesor de la barrera del blindaje, que relaciona la primera capa decireductora (T_1) donde ocurren los cambios mas significativos y la capa decireductora en equilibrio (Te) que es la subsiguiente capa decireductora y tiene un valor aproximadamente constante.</p>	<p>Valores de T_1 y Te para concreto ordinario están graficados como función de la energía de los electrones incidentes ver Figura 5.4</p>

Curvas de transmisión de rayos X producidos en Concreto por electrones de 0.1 a 0.4 MeV (Condición de haz Ancho)



Figuras 5.1 Transmisión a través de concreto (densidad 2.35 g/cm³) de rayos X producidos por electrones de 0.1 a 0.4 MeV, bajo la condición de haz ancho. Energías de electrón designadas por un asterisco (*) fueron acelerados por voltajes de honda de pulsos. En las energías de electrón que no están marcadas, los electrones fueron acelerados por un generador de potencial constante. Estas curvas fueron tomadas del NCRP Report No. 51, (Ref. 8).

Curvas de transmisión de rayos X producidos en Concreto por electrones de 0.5 a 176 MeV (Condición de haz Ancho)

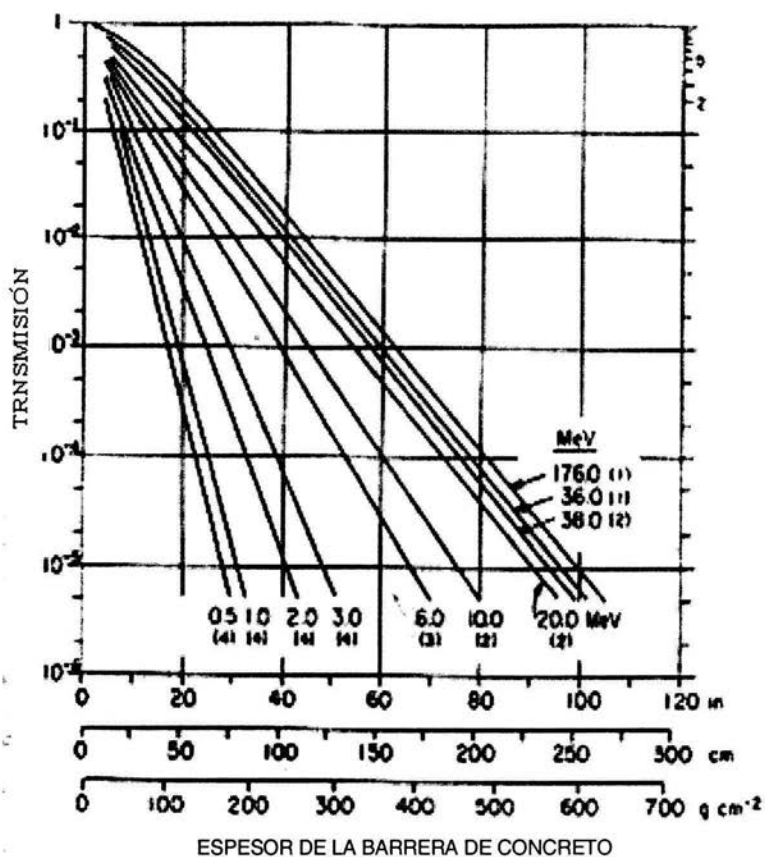


Figura 5.2 Transmisión de rayos X a través de concreto (densidad 2.35 g/cm³) bajo la condición de haz ancho. Estas curvas fueron tomadas del NCRP Report No. 51, (Ref. 8).

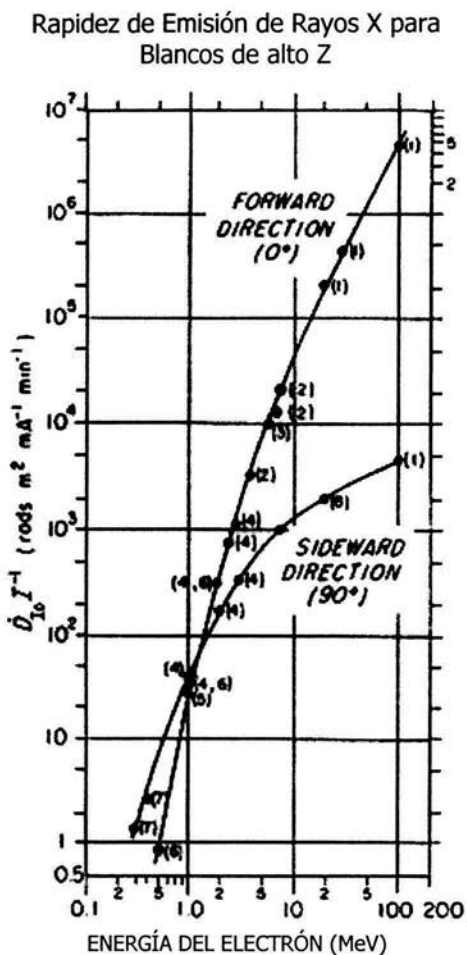


Figura 5.3. Rapidez de emisión de rayos X en al dirección frontal (0°) y en la dirección lateral (90°) para blancos de alto Z. Estas curvas fueron tomadas del NCRP Report No. 51, (Ref. 8).

Distribución Angular de los Rayos X Emitidos de Blancos de Alto Z

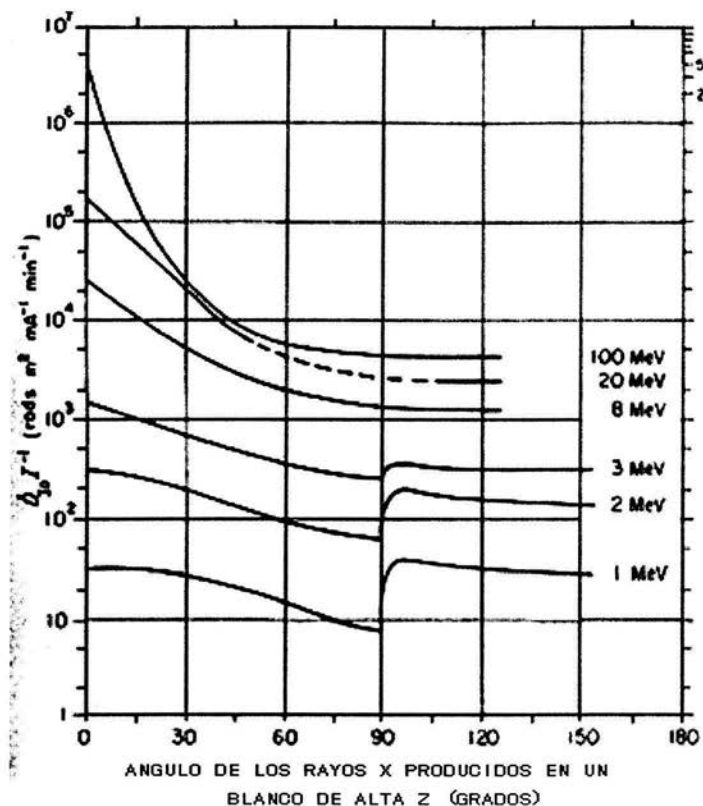


Fig. 5.4. Distribución angular de la rapidez de dosis de rayos X (medida a un metro del blanco) producidos por electrones que inciden sobre un material grueso de alta densidad ($Z > 73$). El cambio brusco a 90° en las curvas de baja energía se debe a la autoabsorción en el blanco. A causa de la geometría extendida de este, las medidas a altas energías dan como resultado curvas suaves a 90° . Estas curvas fueron tomadas del NCRP Report No. 51, (Ref. 8).

Esesor de la Capa Decirredutora para Rayos X producidos en concreto.

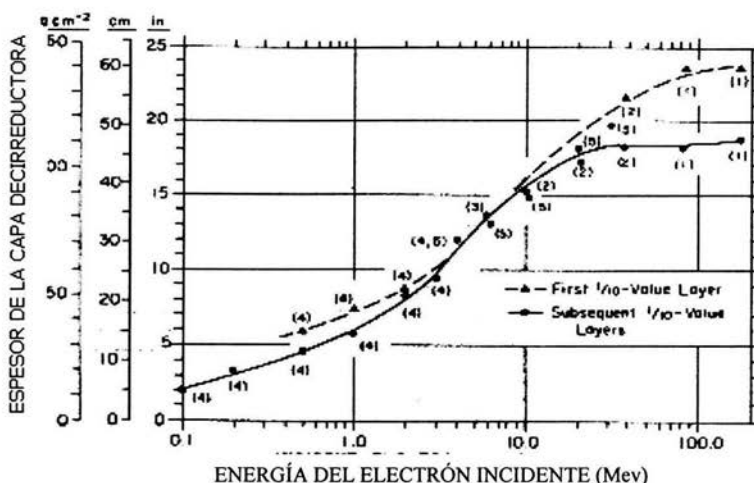


Figura 5.5 Valores de capas decirredutoras para haces abiertos de rayos X en concreto como una función de la energía del haz de electrones que los producen. La curva punteada refieren a la primera capa decirredutora. La curva continua refiere a las subsecuentes capas decirredutores (“en equilibrio”).

5.1.2 Cálculo para radiación reflejada.

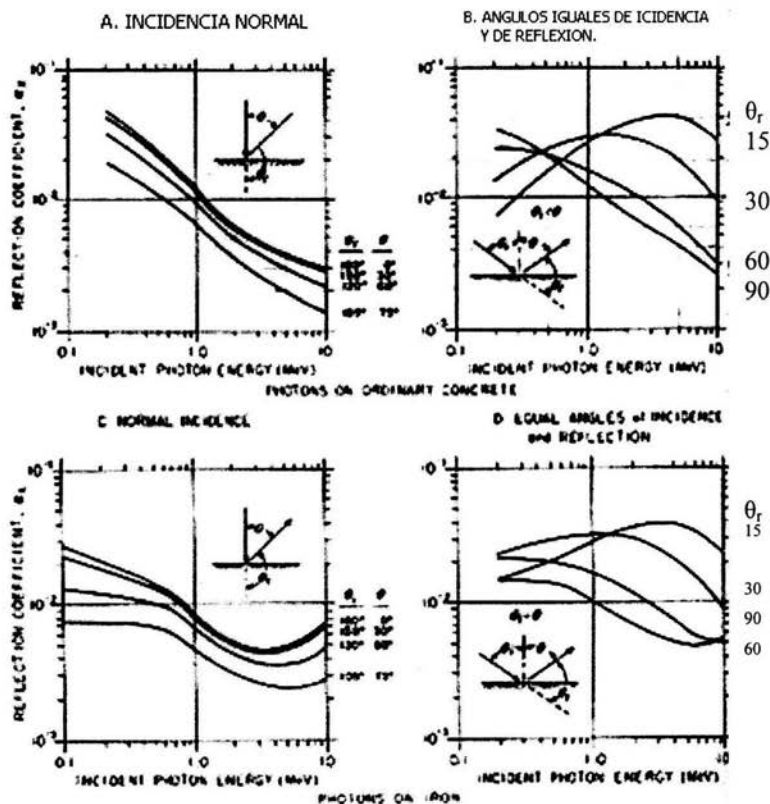
Cuando la radiación reflejada domina la situación de blindajes, entonces, para una fuente puntual de rayos X, tenemos las siguientes expresiones:

5.1.2.- RAYOS X REFLEJADOS O SECUNDARIOS		
ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN	APÉNDICE
$\dot{D}_{1,r_o} = \frac{\dot{D}_{1,o} \alpha_x A}{d_i^2} \dots(E)$ <p>Punto de Interés</p> <p>Blindaje</p>	<p>Rapidez de dosis de los rayos X en función del material reflector.</p>	<p>Para obtener el coeficiente de reflexión α_x ver Figura 5.6, esta en función de la energía de los rayos x incidente, el ángulo reflexión y el material reflejante.</p>

CONTINUA 5.1.2.		
ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN	APÉNDICE
$B_{x,r} \leq (1.67 \times 10^{-5}) \frac{\dot{H}_m d_i^2 d_r^2}{\dot{D}_{lo} \alpha_x AT}$... (F)	Fración de Transmisión cuando los rayos x reflejados dominan la situación; ésta ecuación es una modificación de la ec. (A) reemplazando \dot{D}_{lo} por \dot{D}_{l,r_o} .	Para obtener el espesor de la barrera de blindaje con esta Fracción de Transmisión ver figura 5.1 y 5.2
$\dot{H}_{l,r} = \frac{\dot{D}_{lo} \alpha_x AB_{x,r} T}{(1.67 \times 10^{-5}) d_i^2 d_r^2} \leq \dot{H}_m$... (G)	Rapidez de dosis equivalente , cuando los rayos X reflejados dominan la situación del blindaje.	
Nota 5.1: <ol style="list-style-type: none"> Para rayos X con electrones con energías de 0.5 a 0.3 MeV las reflexiones ocurren predominantemente el efecto Compton, especialmente para materiales de baja Z. Por lo tanto la máxima energía de los fotones de rayos X reflejados no es mayor de los valores que pueden ser calculados de la relación del efecto Compton.⁽⁶⁾ Para rayos X con electrones con energías de 3 a 10 MeV la radiación por aniquilación de pares debe ser tomada en cuenta. Por lo tanto, la curva de 0.5 MeV en la Figura 5.2 podrá ser utilizada para todos los ángulos reflejantes de 90° o mayores.⁽⁶⁾ 		
$n = \log_{10} \frac{I}{B_{x,r}} \dots (H)$	Numero de capas decirredictoras (CDR'S) , tomando en cuenta la fracción de transmisión cuando hay reflexión de rayos X	No existe
$s = T_1 + (n - 1)Te \dots (I)$	Espesor de la barrera del blindaje , tomando en cuenta el numero de capas decirredictoras calculadas con la ecuación anterior.	Valores de T_1 y T_e para concreto ordinario graficados en Figura 5.4, ahora deben seleccionarse en función de la energía de los rayos X reflejados.
$h\nu' = \frac{m_o c^2}{1 - \cos \phi + \frac{I}{\alpha}}$	Energía del fotón dispersado , donde $m_o c^2 = 0.51 \text{ MeV}$, ϕ = ángulo entre la dirección de dispersión y del fotón incidente.	

CONTINUA 5.1.2.		
ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN	APÉNDICE
$\alpha = \frac{h\nu_o}{m_o c^2}$	Relación entre la energía del fotón incidente ($h\nu_o$) y 0.51 MeV.	

Coefficientes de Reflexión para Rayos X Monoenergéticos en Concreto y Fierro.



Figuras 5.6. Valores del coeficiente de reflexión en concreto, y fierro. Se presentan distintos casos de ángulos de incidencia. (Fuente: NCRP-51)

5.1.3 Cálculo para radiación reflejada en la atmósfera

5.1.3.- PROTECCIÓN CONTRA LA RADIACIÓN REFLEJADA EN LA ATMÓSFERA		
ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN	APÉNDICE
$\dot{D}_{Io,s} = \frac{(2.5 \times 10^{-2}) \dot{D}_{Io} \Omega^{1.3}}{d_s^2}$... (J)	Razón de dosis absorbida de los rayos reflejados de la atmósfera a una distancia d_s (rads m ² /min) (ver figura 4.9)	No Existe
$B_{x,s} \leq (0.67 \times 10^{-3}) \frac{Hm d_i^2 d_s^2}{\dot{D}_{Io,s} \Omega}$... (K)	Fracción de transmisión cuando la protección contra la radiación reflejada de la atmósfera es dominante. Se obtiene remplazando la ecuación A por $\dot{D}_{Io,s}$ y tomando en cuenta el ángulo sólido Ω , a una distancia d_s (ver figura 4.9).	
Nota 5.2: El blindaje obtenido puede colocarse a la altura del techo o directamente sobre la fuente de rayos X con una área lateral suficiente para cubrir el ángulo sólido Ω . ⁽⁸⁾		
$\Omega = \frac{S}{R^2}$	Ángulo sólido, donde S es el área del casquete esférico de radio R.	No existe
$d\Omega = \frac{ds}{R^2}$	Diferencial del ángulo sólido	No existe
$ds = R^2 \sin \theta d\phi d\theta$	ds en coordenadas esféricas	No existe
$\Omega = \iint \sin \theta d\theta d\phi$	Ángulo sólido en coordenadas esféricas. Donde los límites son de 0 a 2π para ϕ y de 0 a θ_f para θ .	No existe
Nota 5.3: θ_f ángulo máximo con que puede salir la radiación del techo, proporcional a la distancia que hay del colimador a las paredes y altura del techo.		
$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta_f)$	Ecuación integrada del ángulo sólido.	No existe

5.1.4 Cálculo para la rapidez de dosis equivalente por radiación dispersa en laberintos.

5.1.4. – LABERINTOS		
ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN	APÉNDICE
$\dot{H}_{I,RJ} = \frac{\dot{D}_0 \alpha_1 A_1 (\alpha_2 A_2)^{j-1}}{(d_i * d_{r1} * d_{r2} * \dots * d_{rj})^2}$ <p>...(L)</p>	<p>Aproximación de la Rapidez de dosis equivalente a la salida del laberinto.</p> <ul style="list-style-type: none"> • α_1: Coeficiente de reflexión para rayos X incidentes en el primera barrera reflejante. • α_2: Es el coeficiente de reflexión para rayos X de 0.5 MeV reflejados en las barreras subsecuentes. • A_1: Área de impacto de los rayos X en la primera barrera reflejante. • A_2: Es el área transversal del laberinto (asumir que es aproximadamente constante a través del laberinto, con una razón de altura/peso entre 1 y 2) • $d_{r1}, d_{r2} \dots d_{rj}$: Son las distancias centrales a lo largo de la longitud del laberinto; la razón $d_r/A_2^{1/2}$ debe hallarse entre 2 y 6. • j: Se refiere al j-eximo proceso de reflexión. 	<p>Para obtener el coeficiente de reflexión α_x ver Figura 5.6.</p>
<p>Nota 5.4: El diseño de laberintos para la atenuación de rayos X puede ser calculado como caso especial de reflexión, descrito en punto 5.1.2. En la medida de lo posible, la abertura interior de un laberinto de rayos X no deberá estar expuesta a los rayos X que son directamente emitidos del blanco, mas bien deberá estar expuesta solamente a la radiación reflejada de las barreras del blindaje.</p>		

CONTINUA 5.1.4.		
ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN	APÉNDICE
$\dot{D}_{l,r_2} = \frac{\dot{D}_{l_0} \alpha_1 A_1 \alpha_2 A_2}{(d_i d_{r_1} d_{r_2})}$... (M)	Rapidez de dosis de los rayos X para laberintos. Partiendo de la ecuación E.	

5.2 Instalación propuesta

Se propone la construcción de una instalación que cuente con el cuarto del acelerador, el cuarto de control, el laboratorio de control de calidad, el cuarto del generador de radiofrecuencia y la sala de irradiación del producto; a continuación se muestra un diagrama de la instalación propuesta (figura 5.7):

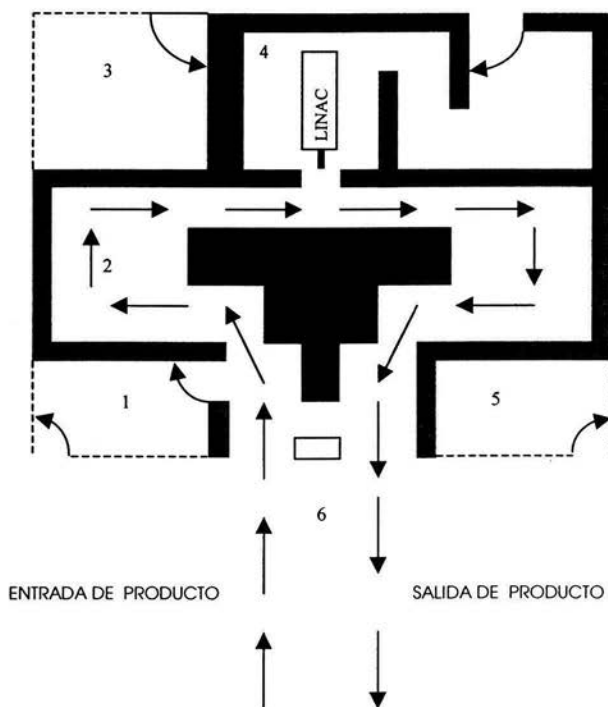


Figura 5.7. Diagram de la instalación propuesta.

La siguiente tabla 5.1 nos muestra las áreas que representa la figura anterior:

AREAS	Nombre
1	Cuarto de control
2	Sala de irradiación
3	Cuarto del generador de RF
4	Cuarto del acelerador
5	Cuarto de control de calidad
6	Área de entrada y salida del producto.

Tabla 5.1 Nombre de las áreas de la instalación propuesta:

5.3. Consideraciones

1.- El Reglamento General de Seguridad Radiológica (Art. 21 RGSR) considera que un límite de Dosis Equivalente de **50 mSv al año para** el Personal Ocupacionalmente Expuesto (**POE**) considerando irradiación uniforme a cuerpo total es seguro.

Para No Ocupacionalmente Expuesto o Público en General

Al Personal No Ocupacionalmente Expuesto que trabaja en la proximidad de zonas controladas que ocasionalmente por cuestiones de trabajo entran a una zona controlada, son considerados individuos del Público en General. El límite **para Público en General será la décima parte de los valores indicados para POE** en situaciones normales (Art. 37 RGSR).

2.- Se asume un tiempo de exposición anual de 2000 h/año

Si se considera una jornada laboral de 8 horas al día y una semana de 5 días entonces tenemos:

$$\left(8 \frac{h}{dia}\right) \left(5 \frac{dias}{semana}\right) = 40 \frac{h}{semana}$$

Si consideramos un año de 50 semanas entonces tenemos;

$$\left(40 \frac{h}{semana}\right) \left(50 \frac{semanas}{año}\right) = 2000 \frac{h}{año}$$

3.- Estas consideraciones corresponden a una dosis de $50\text{mSv}/2000\text{h} = 0.025 \text{ mSv/h}$ lo que es equivalente a 2.5 mrem/h .

4.- Se propone un acelerador lineal de electrones que opere a 10 MeV con una potencia promedio de 8 KW que le corresponde una corriente de 0.8 mA.

- 5.- Se asume que el haz se frena en un blanco de espesor óptimo, en el cual se produce la máxima emisión de rayos X.
- 6.- La rapidez de emisión de rayos X se obtiene de las figuras 5.3 ó 5.4 (para blancos de alto número atómico). En la dirección frontal (0 grados) y en la dirección lateral (90 grados) con electrones acelerados a 10 MeV, entonces de la gráfica 5.3 obtenemos:

$$D_{10} I^{-1}(0) = 50000 \frac{\text{radsm}^2}{\text{mA min}}$$

$$D_{10} I^{-1}(90) = 1500 \frac{\text{radsm}^2}{\text{mA min}}$$

Como estas gráficas están en función de la intensidad de corriente del equipo que es de 0.8 mA entonces para este equipo tenemos una dosis equivalente a un metro del blanco de:

$$D_{10}(0) = 50000 \frac{\text{radsm}^2}{\text{mA min}} \times 0.8 \text{mA} = 40000 \frac{\text{radsm}^2}{\text{min}}$$

$$D_{10}(90) = 1500 \frac{\text{radsm}^2}{\text{mA min}} \times 0.8 \text{mA} = 1200 \frac{\text{radsm}^2}{\text{min}}$$

- 7.- El factor de ocupación (T) se refiere a la fracción de tiempo que permanece el personal en la dirección de la radiación después de la barrera de blindaje. En la tabla 5.2 se muestran valores usados frecuentemente en el cálculo de blindajes de este factor:

Factor de Ocupación	Área
1	Áreas siempre ocupadas tales como: cuartos de trabajo, oficinas, laboratorios, talleres y lugares ocupados en edificios cercanos.
1/4	Áreas parcialmente ocupadas tales como: corredores, salones de descanso y estacionamientos.
1/16	Áreas ocasionalmente ocupadas tales como: salas de espera, sanitarios, escaleras y áreas fuera del edificio usada solo para peatones o tráfico vehicular.

Tabla 5.2 Valores del factor de ocupación para diversas áreas.

En este trabajo se toma un factor de ocupación igual a la unidad para todas las direcciones, con excepción de la loza de la instalación que se tomo de 1/16. Si bien no a todas las direcciones les corresponde un factor de ocupación de 1, el cálculo de blindaje se realiza por el lado desfavorable.

8.- El espesor de la barrera de blindaje se calcula utilizando la ecuación A:

$$B_x = 1.67 \times 10^{-5} \frac{\dot{H}_m d^2}{\dot{D}_{10} T}$$

En la cual:

B_x: Es la fracción de transmisión del blindaje.

H_m: Es el límite de rapidez de Dosis Equivalente en mR/h.

d: Es la distancia en metros de la fuente de rayos X al punto de interés.

D₁₀: Es la rapidez de Dosis Absorbida a un metro de la fuente.

T: Es el factor de ocupación el cual se asume como 1 (ver tabla 5.1.)

Sustituyendo para T=1, H_m=0.25 mR/h (Público en General) y D (calculada anteriormente) entonces:

$$B_x = 1.67 \times 10^{-5} \frac{\dot{H}_m d^2}{\dot{D}_{10} T} = 1.67 \times 10^{-5} \frac{0.25 \times d^2}{40000 \times 1} = 1.043 \times 10^{-10} d^2 \quad \text{de } 0 \text{ a}$$

90 grados

$$B_x = 1.67 \times 10^{-5} \frac{\dot{H}_m d^2}{\dot{D}_{10} T} = 1.67 \times 10^{-5} \frac{0.25 \times d^2}{1200 \times 1} = 3.479 \times 10^{-9} d^2 \quad \text{de } 90 \text{ a}$$

180 grados

Después de determinar la distancia de la fuente de rayos X a un punto en particular, debemos determinar el espesor de blindaje. Es común encontrar el espesor de las barreras de blindaje en términos de las CAPAS DECIRREDUCTRAS (CDR'S); una CDR corresponde a la cantidad de blindaje requerido para reducir la dosis una décima parte. Definiendo n como el número de capas decirreductoras (ecuación C)

que se obtiene de la definición de CDR $B_x = \frac{1}{10^n}$:

$$\text{Por lo que } n = \log_{10} \frac{1}{B_x} \quad (\text{ecuación C})$$

Sustituyendo:

Para una distancia de 9.2 m en la dirección de 0 grados (**Dirección A**) tenemos una B_x = 8.828 × 10⁻⁹ (ver anexo 1):

$$n(0) = \log_{10} \frac{1}{8.828 \times 10^{-9}} = 8.05$$

Para una distancia de 8.15m en la dirección de 90 grados (**Dirección B**) tenemos una $Bx = 2.339 \times 10^{-7}$ (ver anexo 1).

$$n(90) = \log_{10} \frac{1}{2.339 \times 10^{-07}} = 6.6$$

Para calcular el espesor del blindaje se utiliza la ecuación D:

$$s = T_1 + (n - 1)T_e \text{ (ecuación D)}$$

En la cual

S: Espesor de la barrera de blindaje

T_1 : Primer capa decirreductora

T_e : Capa decirreductora en equilibrio

Los valores de T_1 y T_e para concreto ordinario están graficados como función de la energía de los electrones incidentes en la figura 5.5, entonces leyendo de la gráfica:

Para la dirección frontal (0 grados) tenemos:

$$T_1 = 41 \text{ cm y } T_e = 38.5 \text{ cm}$$

$$\text{Por lo tanto } s = 41 + (8.05 - 1)38.5 = 312.425 \text{ cm}$$

Por lo que **el espesor requerido en la dirección A (0 grados) es de 3.12 m** para que los niveles de radiación sean adecuados, para encontrar esta dirección ver Anexo 1.

Para la dirección lateral (90 grados) utilizando la figura 4.7 encontramos la energía equivalente del electrón para analizar la transmisión de rayos X emitidos a 90°:

$$T_1 = 34 \text{ cm y } T_e = 34 \text{ cm}$$

$$\text{Por lo tanto } s = 34 + (6.6 - 1)34 = 224.4 \text{ cm}$$

Por lo que **el espesor requerido en la dirección B (90 grados) es de 2.24 m** para que los niveles de radiación sean adecuados, para encontrar esta dirección ver Anexo 1.

Dirección C

Para la dirección C dirigida al muro lateral izquierdo es simétrica con la dirección B por lo que el espesor calculado anteriormente es el mismo en ambos casos.

Dirección D

Para la dirección D dirigida hacia el techo del área de irradiación de productos, ver anexo 2. La dosis recibida a 1 metro de distancia es la misma que se tiene en la dirección lateral de 90 grados, el factor de ocupación es de 1/16 pues es un área ocasionalmente ocupada y considerando una distancia hacia arriba de 2.94m, entonces:

$$D_{10}(90^\circ) = 1200 \text{ radm}^2/\text{min}$$

$$H_m = 0.25 \text{ mR/h}$$

$$T_1 \text{ y } T_e = 34 \text{ cm}$$

$$B_x = 1.67 \times 10^{-5} \frac{\dot{H}_m d^2}{\dot{D}_{10} T} = 1.67 \times 10^{-5} \frac{0.25 \times 2.94^2}{1200 \times \frac{1}{16}} = 4.81 \times 10^{-7}$$

$$n(90) = \log_{10} \frac{1}{4.81 \times 10^{-8}} = 6.32$$

$$s = 34 + (6.32 - 1)34 = 214.80 \text{ cm}$$

Por lo que el **espesor requerido en la dirección D** (90 grados) es de **2.14 m** para que los niveles de radiación sean adecuados en el techo de la instalación (ver anexo 2)

Ya que los cálculos son repetitivos en cualquier dirección, las ecuaciones fueron procesadas en una hoja de Excel para el cálculo de los espesores de muros.

A continuación en la tabla 5.3 se presentan los resultados de los espesores de muro necesarios en las direcciones indicadas en los anexos 1 y 2 para que los niveles por radiación primaria sean adecuados para el trabajo del personal:

Dirección	Distancia (m)	Angulo (grados)	Bx	n (numero de CDR's)	Espesor requerido de blindaje (m)
A	9.2	0	8.8343E-09	8.05382786	3.13
B	8.15	90	2.31095E-07	6.63620955	2.26
C	8.15	90	2.31095E-07	6.63620955	2.26
D	2.94	90	4.8116E-07	6.31771012	2.15
E	5.64	<90	3.32013E-09	8.4788453	3.29
F	8	>90	2.22667E-07	6.65234479	2.26
G	8.76	>90	2.66983E-07	6.57351655	2.23
H	8.0772	180	2.26985E-07	6.64400309	2.26
I	10.97	>90	4.18686E-07	6.37811151	2.17

Tabla 5.3. Resultados de los espesores de muro en las direcciones propuestas.

9.- Calculo del Espesor de Blindaje por Radiación Reflejada

En este tipo de instalaciones es importante evaluar la dosis recibida por radiación reflejada en diferentes puntos, si la dosis de la radiación reflejada es mayor a la propuesta entonces hay que determinar el espesor necesario de las barreras de blindaje para que la dosis no sea mayor a la propuesta.

En el cálculo del espesor de barreras de blindaje por rayos X reflejados hay tres parámetros de importancia que se mencionan a continuación:

- La rapidez de dosis absorbida de los rayos X reflejados ($D_{I,r}$).
- La distancia entre el material reflejante y el punto de interés dr.
- Características de transmisión de rayos X reflejados a través de la barrera de blindaje.

Rapidez de Dosis Absorbida de los Rayos X Reflejados:

La ecuación E mostrada en el punto 5.1.2 provee una estimación de la rapidez de dosis absorbida de los rayos X reflejados en función del material reflector^(B).

$$\dot{D}_{I,r_o} = \frac{\dot{D}_{I_o} \alpha_x A}{d_i^2} \quad (\text{Ecuación E})$$

Donde:

D_{I,r_o} : Es la rapidez de dosis absorbida de rayos X reflejados a la distancia de un metro del área reflectora (rads*m²/min).

α_x : es el coeficiente de reflexión de la pared que depende de la energía de los rayos X incidentes, el ángulo de reflexión y el tipo de material reflectante (Figura 5.6).

A: es el área de reflexión, considerando el área de impacto del haz incidente (m²).
Puede considerarse constante a través del laberinto con una razón altura ancho entre uno y dos.

d_i : es la distancia del blanco productor de rayos X a la pared reflectora (m).

Fracción de transmisión ($B_{x,r}$) y la Rapidez de dosis equivalente ($H_{I,r}$):

Cuando los rayos X reflejados dominan la situación del blindaje la fracción de transmisión ($B_{x,r}$) y la rapidez de dosis equivalente ($H_{I,r}$) se obtiene modificando la ecuación A y B respectivamente, reemplazando a D_{I_o} por D_{I,r_o} , obteniéndose las ecuaciones F y G.

$$B_{x,r} \leq (1.67 \times 10^{-5}) \frac{\dot{H}_m d_i^2 d_r^2}{\dot{D}_{10} \alpha_x AT} \text{ (Ecuación F)}$$

$$\dot{H}_{1,r} = \frac{\dot{D}_{10} \alpha_x A B_{x,r} T}{(1.67 \times 10^{-5}) d_i^2 d_r^2} \leq \dot{H}_m \text{ (Ecuación G)}$$

Donde d_r es la distancia de la pared (material reflejante) al punto de interés (m).

Las áreas que principalmente podrían necesitar protección contra la radiación reflejada en la instalación propuesta son las siguientes:

- Los pasillos laterales que colindan con la sala de irradiación,
- El curto de control
- El laboratorio de control de calidad.

El área de entrada y salida de producto y las áreas colindantes con el cuarto de aceleración, podrían necesitar en su mayoría una evaluación de la rapidez de dosis equivalente para verificar que no rebasen el límite de dosis propuesto.

En el anexo 3 se especifican los puntos que se toman en cuenta para el cálculo de los espesores de muros por radiación reflejada y a para la evaluación de rapidez de dosis equivalente en las áreas de importancia de la instalación.

I.-Cálculo de la dosis por radiación dispersa en el muro lateral izquierdo, considerando el punto P₁, ver detalle en ver detalle en la figura 5.8.

Sustituyendo en la ecuación G: $T=1/4$, $H_m=0.25$ mR/h, $d_i=3.5$ m, $d_r=5.52$ m.

$D_{10}=1200$ rads*m²/min en Z alta (calculada anteriormente).

Considerando un factor de 0.3 para producción de rayos X en concreto y en dirección de 90° o mas, entonces:

$$D_{10}=(1200 \text{ rads} \cdot \text{m}^2/\text{min}) \cdot 0.3 = 360 \text{ rads} \cdot \text{m}^2/\text{min}$$

Utilizando la figura 5.6 B se determina el valor de α_x tomando en cuenta $\theta_r=30^\circ$. El valor del coeficiente de reflexión a 30° es mayor que el que sería para 41°, esta es una suposición para estimar el espesor del muro por el lado desfavorable. Se considera una energía de 5 MeV (recomendación Ref. 8 pag 54)

$\alpha_x=2 \times 10^{-2}$ (de la figura 5.6 B a una energía de 5 MeV y un ángulo de 30°).

Para el cálculo del área se asume una relación de altura ancho de dos; como la altura de la instalación propuesta es de 2.13 entonces tenemos un ancho de 1.06m, por lo que $A=2.268$ m², entonces:

$$\dot{D}_{l,r_0} = \frac{\dot{D}_{l_0} \alpha_x A}{d_i^2} = \frac{360 * 2 \times 10^{-2} \times 2.268}{3.5^2} = 1.33 \frac{\text{rad} * \text{m}^2}{\text{min}}$$

Para el cálculo del espesor de blindaje con esta dosis por radiación reflejada tenemos:

$$B_{x,r} = (1.67 \times 10^{-5}) \times \frac{0.25 \times 3.5^2 \times 5.52^2}{360 \times 2 \times 10^{-2} \times 2.268 \times \frac{1}{4}} = 3.817 \times 10^{-4}$$

Numero de capas de blindaje debido a rayos x reflejados:

$$n = \log_{10} \frac{1}{B_x} = \log_{10} \frac{1}{3.187 \times 10^{-4}} = 3.41$$

Espesor de blindaje a utilizar:

$T_1 = T_e = 33$ a 5 MeV (se utilizo la mitad de la energía maxima de los electrones. Nótese que no se está considerando la recomendación B de la nota 5.1, lo que es una suposición por el lado desfavorable)

$$s = T_1 + (n - 1)T_e = 33 + (3.41 - 1)33 = 112.25 \text{ m}$$

Por lo que el **espesor requerido** por la reflexión **en muro lateral izquierdo** de la sala de irradiación (considerando el punto P₁) **tendrá que ser de 1.12m** para que los niveles de radiación del otro lado de la barrera sean adecuados.

Por simetría, el **espesor requerido** por la reflexión **en el muro lateral derecho** de la sala de irradiación (considerando el punto P₂) será el mismo que el anterior, por lo que también **tendrá que ser de 1.12m** para que los niveles de radiación del otro lado de la barrera sean adecuados.

II.- Evaluación de los puntos P₁ por radiación primaria, para evaluar quien domina la situación del blindaje en estos puntos.

Para encontrar la dosis absorbida en este punto por radiación primaria, de la figura 5.2 y para un ángulo de 90° se tiene que la rapidez de emisión de los rayos X es de 1500 rads*m²*mA⁻¹ *min⁻¹, por lo que para un acelerador con una intensidad de corriente de 0.8 mA le corresponde una rapidez de dosis absorbida de 1200 rads*m²*min⁻¹ para blancos de alto Z., considerando un factor de 0.3 para producción de rayos X en concreto entonces finalmente tenemos una rapidez de dosis de 360 rads*m²*min⁻¹.

Si bien el ángulo de la radiación primaria dirigida al punto P_1 es mayor de 90° , se toma este por ser el de mayor intensidad.

Comparando la dosis recibida en este punto por radiación primaria ($360 \text{ rads} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) con la dosis recibida en este punto por radiación reflejada ($1.33 \text{ rads} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$) calculada anteriormente, es menos del 1%; por lo que en este punto la situación del blindaje le domina la radiación primaria.

Se propone que en la dirección donde los rayos X primarios van dirigidos al punto P_1 , se haga un muro de refuerzo extra en el muro central con espesor suficiente para que los niveles de radiación sean adecuados del otro lado del muro calculado para radiación reflejada (ver figura 5.8).

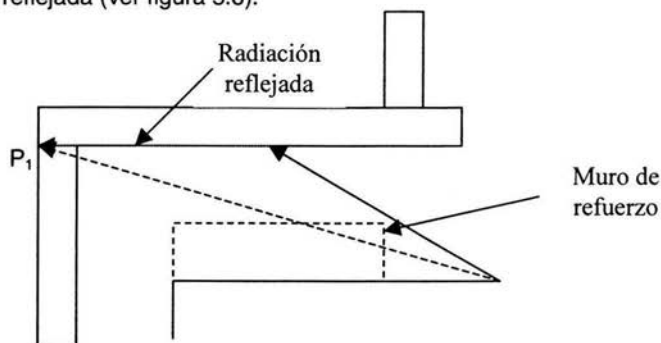


Figura 5.8 Muro de refuerzo propuesto

Una vez terminados los cálculos de "blindajes", es necesario decir que estos se hicieron pensando en que:

1.- La dosis en el blanco debe de ser superior a 100 mrem/h y se considera zona controlada, la dosis varía dependiendo de las condiciones de operación del acelerador.

2.- La dosis en las áreas 2 y 4 (ver tabla 5.1), deben ser superiores a 5 mrem/h pero menores que 100 mrem/h y se considera zona de radiación, valores permitidos por el reglamento IAEA.

3.- Las de las áreas externas 1, 3 y 5 (ver tabla 5.1), da límites de 2.5 mrem/h y de 0.25 mrem/h , áreas de permanencia de POE y de público.

6. Consideraciones de Seguridad Radiológica y Dosimetría Personal e Industrial.

El objetivo de la seguridad radiológica es que las personas involucradas con radiaciones ionizantes conozcan los efectos biológicos de la radiación ionizante, así como la reglamentación para el uso de material radiactivo (fuentes de Co^{60} y Cs^{137}) y equipos generadores de radiación ionizante (tubos de rayos X, aceleradores de partículas, etc.) con el objeto de manejarlos en forma segura, evitando posibles irradiaciones y contaminación de personal y equipo.

6.1 Instrumentación

Como parte de la seguridad radiológica es importante conocer la instrumentación asociada a la detección y cuantificación de la radiación ionizante. En instalaciones donde se trabaja con radiación ionizante es necesario conocer el funcionamiento y la aplicación de estos instrumentos, los cuales aprovechando la interacción que tiene la radiación ionizante con la materia cumplen con su objetivo.

Existen dos tipos de detectores que por sus propiedades son los más usados en protección radiológica, estos detectores son los gaseosos y los de centelleo. A continuación se describen estos instrumentos además de su aplicación correspondiente:

- a) **Detectores Gaseosos:** Esencialmente, estos detectores constan de una cámara gaseosa con un electrodo central positivo (ánodo) y un electrodo negativo que rodea al gas (cátodo), tal como se muestra en la figura 6.1. Si el sistema se le aplica una diferencia de potencial, los iones negativos (electrones) generados por radiación se dirigen al ánodo y los iones positivos al cátodo, creando un flujo de electrones o corriente, produciendo así un pulso o conteo a la salida del detector.

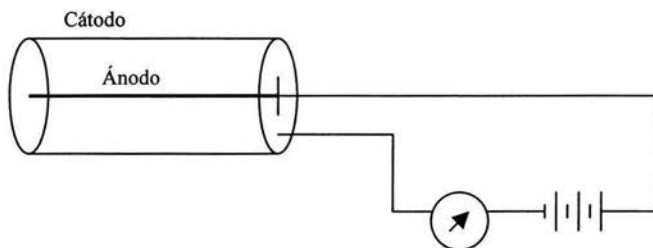


Figura 6.1 diagrama simplificado de un detector gaseoso

Existen diferentes tipos de detectores gaseosos, según el tipo de voltaje aplicado a los electrodos; en seguridad radiológica los más importantes son el detector Geiger-Müller, el detector de cámara de ionización y el detector proporcional, a continuación se describen estos detectores y sus usos más importantes:

- **Cámara de ionización:** esta cámara de ionización consiste en un recipiente cerrado lleno de gas inerte (Ar, Xe, etc), en donde se encuentran dos electrodos a los cuales se aplica una tensión eléctrica, a diferencia de los demás de los demás tipos de detectores gaseosos, las cámaras de ionización **se basan en la colección de los iones primarios únicamente**, los cuales al aplicarles una diferencia de potencial del orden de cientos de voltios, producen una corriente o impulsos eléctricos, estos pulsos además de revelar la presencia de la radiación incidente, pueden llegar a indicar en determinadas condiciones la naturaleza de dicha energía de radiación. Debido a que las cámaras de ionización miden ionizaciones, su respuesta puede ser directamente en Roentgen /min (R/h), mR/h o en su caso cuentas / min (cpm), proporcionado la medida de rapidez de exposición o del flujo de radiación que en cada momento alcanza la cámara. Se usan como medidores industriales de densidad o nivel continuo, en protección radiológica generalmente son usados en lugares donde la intensidad de radiación es relativamente alta mayor a 1mR/h , pudiendo ser el caso de radiografía industrial e irradiadores. En la siguiente figura 6.2 se muestra uno de estos equipos.

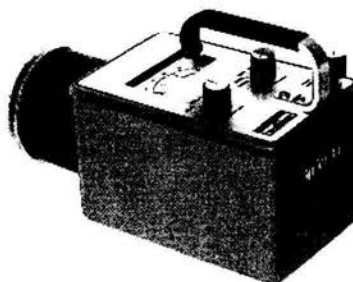


Figura 6.2 Cámara de ionización portátil

- **Detectores proporcionales:** En estos detectores la cantidad de pulsos detectados varía en función del tipo de radiación, de la energía y del voltaje de operación, pudiendo conocerse en éste caso el tipo y la energía de la radiación. La construcción de un detector proporcional es similar al de una cámara de ionización con diámetro más pequeño. Estos equipos son usados generalmente en laboratorios para medición de alfas y betas totales en agua, usando como gas una mezcla de metano-argón; en medidores industriales que usan neutrones o en equipos de protección radiológica para medir neutrones usando como gas BF_3 , similar mostrado la figura 6.3.

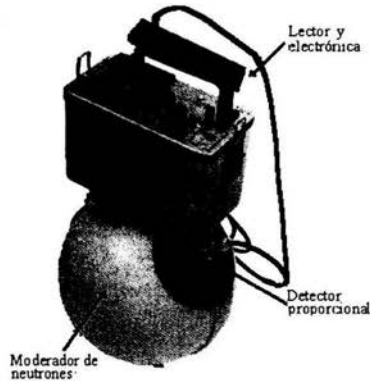


Figura 6.3. Detector de neutrones, usando un detector proporcional

- **Contadores Geiger Müller:** estos detectores (figura 6.4) operan a voltajes altos del orden de 800 a 1100 volts, por lo que, por cada ionización primaria, se generan todas las ionizaciones secundarias posibles, aumentando de esta forma su eficiencia de detección. En estos equipos la amplitud de los pulsos es mucho mayor que los demás detectores gaseosos. **Estos detectores no pueden distinguir la naturaleza ni la energía de la radiación detectada**, ya que al permanecer constante la multiplicación de los iones secundarios, los pulsos de salida siempre se observan a un mismo valor de voltaje. Los detectores Geiger utilizados en vigilancia radiológica se diseñan para la detección de radiación gamma, rayos X, beta o alfa. Estos detectores generalmente son usados en medidores de nivel ON/OFF por la sensibilidad que tienen, pueden operar hasta con 0.1 mR/h; en el caso protección radiológica, estos equipos son los más usados en vista de medir niveles de radiación desde 0.02 mR/h hasta algunos Roentgen, además de ser portátiles.



Figura 6.4 Monitor Geiger Müller portátil.

- b) **Detectores de Centelleo:** cuando una partícula cargada, o un fotón de radiación X o gamma atraviesa una sustancia fluorescente, después del proceso de excitación los electrones que fueron promovidos por la radiación incidente a órbitas superiores (de mayor energía) regresan a sus órbitas originales emitiendo su exceso de energía como rayo X del orden de la luz visible o ultravioleta. Este proceso es llamado luminiscencia, dicha luz puede alcanzar a una placa fotoeléctrica suficientemente sensible, de la que desprende electrones, los cuales son multiplicados por un "fotomultiplicador", resultando un pulso eléctrico a la llegada de la partícula o fotón. El conjunto en una cámara oscura o dentro de una envoltura opaca a al luz natural, a través de la cual pueda penetrar la radiación a detectar ver figura 6.5.

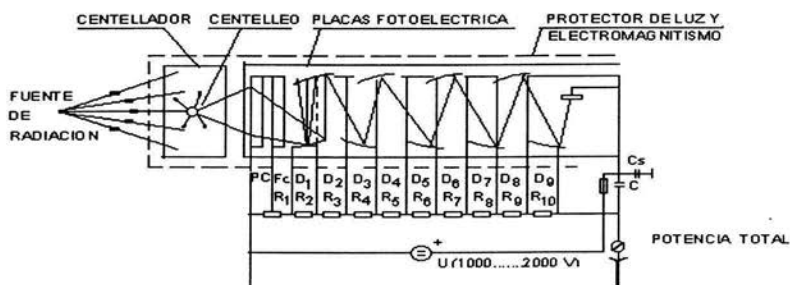


Figura 6.5 Funcionamiento de un detector de centello

La placa fotoeléctrica (fotocátodo) tiene por función convertir la luz generada en un impulso eléctrico el cual es multiplicado por unos dinodos conectados a diferentes potenciales eléctricos en lo que se llama "tubo fotomultiplicador", teniendo una extraordinaria sensibilidad.

Las sustancias fluorescentes inorgánicas más utilizadas en detectores de centelleo son el sulfuro de zinc activado por plata, ZnS(Ag), y el yoduro de sodio activado con talio, NaI(Tl), este ultimo tiene una alta eficiencia de conversión luminosa. La sustancia activadora es usada para proveer un mecanismo para la liberación de la energía de la excitación.

Los cristales de NaI (Tl) son muy higroscópicos y pierden su transparencia con la humedad, por lo que se deben montar en cápsulas herméticamente cerradas con una de sus paredes de vidrio transparente para la salida de la luz hacia el fotocátodo.

Estos detectores pueden obtener el espectro de un haz de radiación gamma y deducir la naturaleza del radioisótopo emisor. Por ser sólidos los detectores de centelleo tienen una eficiencia de detección para la radiación gamma o rayos X mucho mayor que los detectores gaseosos, por lo que se utilizan para la búsqueda de fuentes radiactivas, análisis de

contaminación, mediciones de intensidad de radiación a niveles muy bajos, medición de espesores por la técnica de retrodispersión, etc.

En la figura 6.6 se muestra un monitor portátil con detector de centelleo.

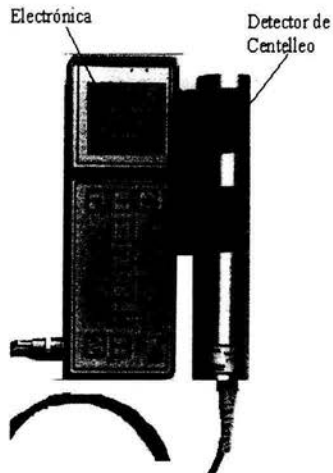


Figura 6.6 Monitor Portate con monitor de centelleo.

6.2 Disimetría Personal

El personal que trabaja con radiaciones ionizantes deberá de cuidar que la dosis que recibe anualmente no rebase cierto límite, en nuestro país el RGSR establece estos límites en sus artículos 20 y 21 principalmente que a continuación se enuncian.

Artículo 20.- Para el personal ocupacionalmente expuesto, el límite del equivalente de dosis efectivo anual HE,L **para los efectos estocásticos** es de 50 mSv (5 rem).

Artículo 21.- Para el personal ocupacionalmente expuesto el límite de equivalente de dosis anual **para los efectos no estocásticos** es de 500 mSv (50 rem), independientemente de si los tejidos son irradiados en forma aislada o conjuntamente con otros órganos. Este límite no se aplica al cristalino, para el cual se establece un límite de 150 mSv (15 rem)

Para entender estos artículos es necesario dar algunas definiciones, conceptos y ejemplos:

DOSIS ABSORBIDA: La energía depositada por la radiación ionizante en la materia. Técnicamente, la dosis absorbida, D, se define como el cociente de dE

entre dm , donde dE es la energía promedio depositada por la radiación ionizante en una masa dm .⁽⁴⁾

La unidad en el S.I. es el gray (Gy), donde:

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} \quad (1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg}).$$

DOSIS UMBRAL: El valor de la dosis por debajo del cual se considera que un efecto no estocástico determinado no se manifestará.⁽⁴⁾

EQUIVALENTE DE DOSIS o (DOSIS EQUIVALENTE): Con fines de protección radiológica se ha encontrado conveniente introducir una magnitud física que correlaciona la dosis absorbida con los efectos deletéreos más importantes de la exposición a la radiación, en particular con los efectos estocásticos tardíos. El equivalente de dosis es la cantidad que resulta de la ecuación:

$$H = DQN$$

Donde D es la dosis absorbida en Gy, Q es el factor de calidad y N es el producto de todos los demás factores modificantes, tomándose por ahora un valor para N igual a la unidad. El nombre especial para la unidad de equivalente de dosis es el sievert (Sv). El rem puede ser usado temporalmente.⁽⁴⁾

Para la mayoría de los propósitos prácticos se pueden usar los valores de Q mostrados en la tabla 6.1:

Tipo de Radiación	Q
Gamma y rayos X	1
Beta y electrones	1
Neutrones Térmicos	5
Neutrones intermedios	10
Neutrones rápidos	20
Alfas	20

Tabla 6.1 Valores de Q

Para radiación electromagnética ionizante el factor de calidad Q es igual a la unidad por lo que 1 Gy es 1 Sv ó $1 \text{ rad} = 1 \text{ rem}$.

EQUIVALENTE DE DOSIS EFECTIVO: El equivalente de dosis efectivo, H_E , es la suma ponderada de los equivalentes de dosis para los diferentes tejidos H_T , tanto por irradiación externa como por incorporación de radionúclidos.⁽⁴⁾ Se define como:

$$H_E \leq \sum (W_T \times H_T)$$

Donde W_T son los factores de ponderación, algunos valores de W_T para cada órgano irradiado, se presentan en la tabla 6.1:

Tejido T	W_T
Gónadas	0.25
Senos	0.15
Médula roja hueso	0.12
Pulmón	0.12
Tiroides	0.03
Huesos (superficie)	0.03
Restantes	0.30

Tabla 6.2 Valores de W_T para cada órgano irradiado

Por ejemplo: Si únicamente es expuesto al pulmón, la dosis que puede recibir para producir un daño similar al daño producido por una exposición a cuerpo entero de 50 mSv es de 416.6 mSv:

$$H_T = \frac{H_E}{W_T} = \frac{50mSv}{0.12} = 416.6mSv$$

EFFECTOS NO ESTOCASTICOS O DETERMINISTICOS: son aquellos en que la severidad del efecto esta en función de la dosis y **se presentan a partir de una dosis umbral**. (Art. 9 del RGSR). En la tabla 6.3 se presentan algunos daños a partir de la dosis umbral cuando hay irradiación a cuerpo total y cuando hay irradiación localizada.

Dosis (rad)	Daño
Irradiación a cuerpo total	
>25	Efectos aleatorios
>50	Cambios en la sangre
>100	Síndrome de radiación probable (náuseas y fatiga)
>200	Síndrome de radiación grave
>400	50% de probabilidad de muerte
>600	100% de probabilidad de muerte
Irradiación localizada	
Dosis (rad)	Daño
>50	Gónadas: Esterilidad temporal
>800	Gónadas: Esterilidad definitiva
>500	Cuero cabelludo: Caída de pelo temporal
>2500	Cuero cabelludo: Caída de pelo definitivo

Tabla 6.3 Daños presentados a partir de una dosis umbral

EFFECTOS ESTOCÁSTICOS: Son aquellos en que la probabilidad de que el efecto se presente, se considera en función de la dosis, **sin que exista un umbral**, pudiendo manifestarse en el individuo expuesto o en su descendencia. (Art.9

RGSR). Ejemplos de estos efectos son cáncer, alteraciones genéticas, etc., la probabilidad de que se presenten, aumenta con el aumento de la dosis.

6.2.1 Medición de la dosis

Para llevar el control de la dosis que recibe el personal autorizado para trabajar con radiaciones ionizantes, se cuenta con dispositivos que miden la dosis recibida, a estos dispositivos se les conocen como dosímetros y los mas conocidos son:

Los dosímetros de lectura directa (L.D).

Los dosímetros de película

Los dosímetros termoluminiscentes (TLD)

La figura 6.7 muestra un tipo dosímetro de lectura directa

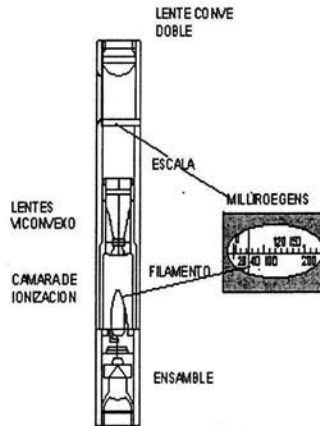


Figura 6.7 Dosímetro de lectura directa

La figura 6.8 muestra dosímetros termoluminiscentes

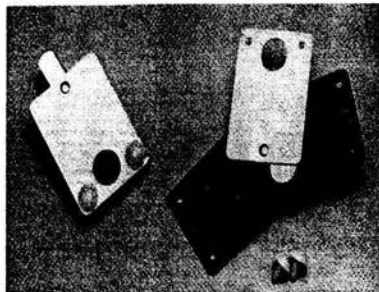


Figura 6.8 Dosímetro termoluminiscente

Los cuidados que se deben tener con los dosímetros con el fin de poder obtener información confiable de la dosis que se recibe, son las siguientes:

- No mojarlos.
- No golpearlos.
- No exponerlos innecesariamente a la radiación.
- No calentarlos.
- Usarlos a la altura del tórax.

Los trabajadores que son autorizados para trabajar con radiaciones ionizantes, deben de portar su dosímetro al trabajar con las radiaciones, además de llevar un registro de su dosimetría. (Art 160 VI RGSR)

6.3 Dosimetría Industrial

La dosimetría industrial consiste en la medida de la dosis que reciben los productos al ser irradiados.

Es muy importante vigilar la dosis que reciben los productos para garantizar la calidad de estos, ya que de ésta depende el asegurar la esterilidad del producto, así como también de no dañar el material del que están hechos y su empaque, a estas dosis se les conoce como dosis mínima (D_{\min}) y dosis máxima (D_{\max}) respectivamente.

Para medir la dosis en los productos irradiados los dosímetros se clasifican en:

- Dosímetros primarios ó de referencia
- Dosímetros secundarios ó de rutina

Los dosímetros primarios ó de referencia son aquellos en los que de una medida de la respuesta se puede encontrar directamente la dosis.⁽²⁾

Los dosímetros secundarios o de rutina son aquellos que requieren ser calibrados mediante un sistema primario para después usarse en la determinación de la dosis absorbida de un material.⁽²⁾

Los dosímetros industriales mas conocidos son:

- Dosímetros Químicos
 - Solución de sulfato ferroso (denominado Fricke)
 - Solución de sulfato cérico (cérico-seroso)
- Dosímetros Plásticos:
 - Película radiocrómica (Riso National Laboratory, Denmark)
 - Perspex rojo (Harwell, Inglaterra)
 - Acrílico rojo (AECL, Canada)

La dosis total mas usada en esterilización por radiación es de 25 KGy (2.5 Mrad). Esta dosis es recomendada por las farmacopeas de los países del este de Europa, así como las farmacopeas de Checoslovaquia. Los países escandinavos prefieren

dosis de 32 KGy para esterilización con rayos gamma y 35 KGy para esterilización con haz de electrones. En los Estados Unidos se ha tenido que cambiar de una dosis de 25 KGy a dosis de 15 a 20 KGy. ⁽¹⁶⁾

En nuestro país la dosis para la irradiación de productos se establece por la norma correspondiente expedida por la secretaría de salud.

6.4. Sistemas de seguridad

En este tipo de instalaciones se requieren sistemas de seguridad adecuados para evitar o minimizar la exposición a la radiación, para ello se puede contar con los siguientes sistemas de seguridad en la instalación:

- Señales de advertencia de generación del haz (audibles y visibles).
- Interruptores de emergencia.
- Circuitos de seguridad (interlocks)
- Barreras de acceso a personal en forma de puerta, entrada controlada ó cadena con intelocks.
- Símbolos de áreas restringidas o controladas.
- Detectores de radiación.
- Cámaras de televisión monitorear dentro del recinto.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Resultados

Como resultado final, se hicieron los cálculos de blindaje necesarios para todas las paredes y distancias de la instalación de un edificio, que garantice el funcionamiento adecuado del acelerador lineal de electrones para llevar a cabo irradiaciones industriales para esterilización.

7.2. Discusión

El acelerador se muestra en una sala rectangular, la intensidad del haz es muy alta por lo que hay que calcular el blindaje de paredes, distancias y techos adecuados para que en los pasillos y áreas circundantes, pueda haber personal laborando. Esto se llevó a cabo y se obtuvieron los siguientes valores.

Discusión del cálculo del espesor de blindaje debido a la radiación primaria:

Blindaje	Espesor del blindaje en la trayectoria de la radiación.	Rapidez de Dosis equivalente planteada para el punto de interés.	Observaciones
Dirección A	3.13 m	0.25 mrem/h T=1 Eficiencia del blanco=1	El espesor de 3.13 m es el que se tiene que interponer en la estructura del centro del laberinto. La distancia de 9.2 metros es la que se considera en la ventana de entrada y salida de productos.
Dirección B	2.26 m	0.25 m rem/h T=1 Eficiencia del blanco = 1	El espesor del muro en la trayectoria de la radiación tendrá que ser de 2.26 m.
Dirección C	2.26 m	0.25mrem/h T=1 Eficiencia del blanco = 1	El espesor del muro en la trayectoria de la radiación es el mismo que el anterior, ya que la instalación es simétrica.
Dirección D*	Ver pagina 78		
Dirección E	3.29 m	0.25 m rem/h T=1 Eficiencia del blanco = 1	El espesor del muro en la trayectoria de esta dirección tendrá que ser de 3.29m.
Dirección F	2.26 m	0.25 m rem/h T=1 Eficiencia del blanco=1	El espesor de muro de blindaje en esta trayectoria tendrá que ser de 2.26 m.

Continuación de discusión del cálculo del espesor de blindaje debido a la radiación primaria:

Blindaje	Espesor del blindaje en la trayectoria de la radiación.	Rapidez de Dosis equivalente planteada para el punto de interés.	Observaciones
Dirección G	2.23	0.25 m rem/h T=1 Eficiencia del blanco=1	El espesor requerido en la trayectoria de esta dirección tendrá que ser de 2.23 m, este puede ser repartido entre el muro central y el muro que da a la parte lateral del cuarto del generador RF..
Dirección H	2.26 m	0.25 m rem/h T=1 Eficiencia del blanco=1	El espesor de muro de blindaje en esta trayectoria tendrá que ser de 2.26 m, este puede ser repartido entre el muro central y el muro que da a la parte de atrás de la instalación.
Dirección I	2.17 m	0.25 m rem/h T=1 Eficiencia del blanco=1	El valor de 2.17 m es el espesor de blindaje requerido en la trayectoria recorrida por la radiación.

Discusión de los espesores de muros por radiación secundaria:

Blindaje	Espesor S mínimo necesario (calculado)	Rapidez de Dosis equivalente planteada para el punto de interés.	Observaciones
Muro lateral izquierdo (P ₁)	112.25 m	0.25 mrem/h T=(1/4) Eficiencia del blanco=0.3	Se evalúa el espesor del muro lateral izquierdo por radiación dispersa del haz en el laberinto en la distancia mas corta.
Muro lateral derecho (P ₂)	112.25 m	0.25 mrem/h T=(1/4) Eficiencia del blanco=0.3	El espesor requerido del muro lateral derecho es el mismo que el anterior por ser una instalación simétrica.

Discusión del espesor del techo del área de irradiación de producto:

Blindaje	Espesor del blindaje en la trayectoria de la radiación.	Rapidez de Dosis equivalente planteada para el punto de interés.	Observaciones
Techo de la sala de irradiación (Dirección D)	2.15 m	0.25 mrem/ T=1 Eficiencia del blanco=1	Se observa que el espesor del techo en el cuarto del LINAC es ligeramente mayor que el del área de irradiación. Siendo menores los niveles de radiación en el cuarto del LINAC, el espesor del techo es entonces suficiente.

Conclusiones:

Se concluye que el objetivo del trabajo se logró, ya que un acelerador de electrones de estas características produce una alta intensidad de dosis en el blanco y dado que este tipo de instalaciones requiere distintas áreas de trabajo, es necesario proveer de blindajes especiales entre las distintas áreas, lo que resulto en paredes, distancias y techos específicos para definir dosis adecuadas durante el trabajo, lo que quiere decir dosis abaladas por la International Commission on Radiological Protection (ICRP).

Con los blindajes utilizados, se tienen intensidades de radiación suficientemente bajas en las áreas adyacentes de la instalación, como para permitir el acceso sin restricciones a público en general, ya que no se tiene ningún impacto al ambiente.

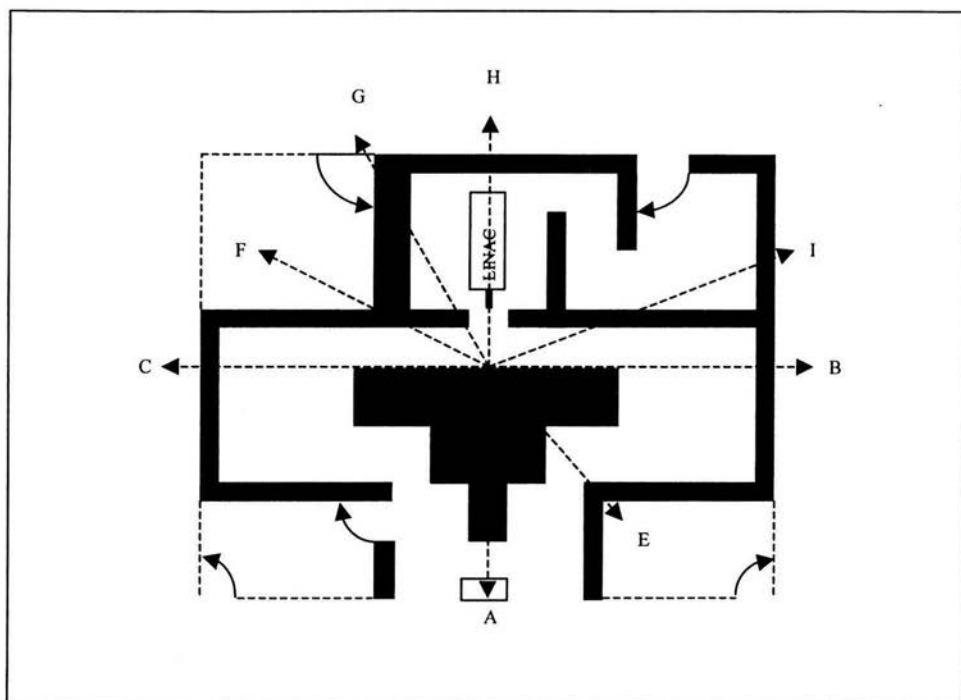


Diagrama de la instalación propuesta con las direcciones que se toman en cuenta para el cálculo por radiación primaria.

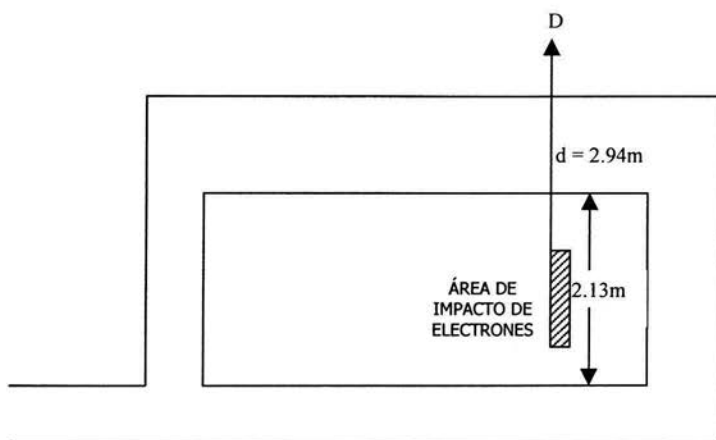


Diagrama Lateral donde se muestra la loza de la instalación para el cálculo en la dirección C

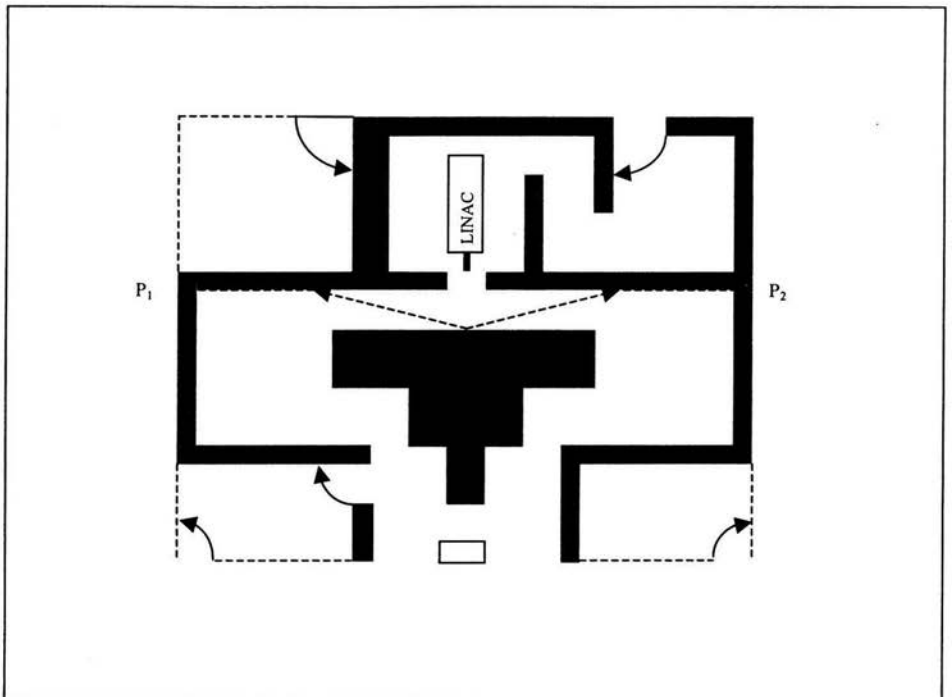


Diagrama de la instalación con los puntos que se toman en cuenta para el cálculo por radiación reflejada.

Bibliografía

1. Alba Andrade Fernando, Aceleradores de Partículas, Eva V. Chesneau, Washington, D.C. (1971).
2. Arredondo Castro Oscar, Aplicaciones de los Irradiadores en Esterilización Industrial, Tesis Profesional, Facultad de Química UNAM (1990)
3. Banerjee Kasinath, Sterilization System, Lancaster, Pennsylvania (1985).
4. Carleton Frederick J. y Agalloco James P. Validation of Aseptic Pharmaceutical Processes, M. Decker, New York (1986).
5. Diario Oficial de la Federación, Reglamento General de Seguridad Radiológica, publicación del 22 de Noviembre de 1988.
6. Edwards, D. A. and Syphers M. J. An Introduction to the Physic of High Energy Accelerators, Wiley, New York (1993).
7. Gouiran, Robert; tr. por Moca J. Partículas y Aceleradores Guadarrama, Madrid (1967).
8. Halls Nigel A. Achieving Sterility in Medical and Pharmaceutical Products, M. Decker, New York (1994).
9. Jarger, R. G., Blizard. E.P., Chilton, A.B., Grotenhuis, M., Honig, A., Jarger, Th. A. and Eisenhor H. H. Engineering Compendium on Radiation Shielding, Springer-Verlag, New yorc Inc. 1968
10. M. Karzanik D' Coppel, Radiation Physics and Chemistry, Conditions of Use for Sealed Cobalt 60 Source, Vol. 57, pp 587-590, 2000
11. National Council on Radiation Protection and Measurements. Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV, Particle Accelerator Facilities, NCRP Report 51
12. Persico, E., Ferrari, E. and Segré, E. Principles of Particle Accelerators, Benjamín, New York, N. Y. (1968).
13. Rosenbaltt, J. Particle Acceleration, Methuen, Londeres (1968).
14. Scharf Waldemar Particle Accelerators and their Uses, Harwood Academic, Chur, (1986).
15. W.P. Swanson, "Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerator", Tech. Rep. Ser. No 188 IAEA (1979)
16. Wilson Robert R. y Littauer Raphael; tr por Domínguez Néstor, Aceleradores de Partículas, Ed. Universitaria, Buenos Aires (1967).

Bibliografía

17. Página web. <http://www.angelfire.com>
18. Página web. <http://www.ceaden.cu>
19. Página web. <http://www.ceaden.gob.ar>