

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

ESCUELA ACADEMICA DE HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL



**HIGIENE Y SEGURIDAD EN UN DEPARTAMENTO
DE RADIOTERAPIA**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO DE HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

JOSE RAMIRO CHUJUTALLI REATEGUI

PROMOCION 89-1

LIMA - PERU

1993

"EL PRINCIPIO DE LA SABIDURIA, ES EL TEMOR DE JEHOVA"

(Proverbios 1:7)

AGRADECIMIENTO

A **Dios** en primer lugar, por la vida.

A mis padres: **Rodolfo y Brigada**, quienes me brindaron su apoyo material, moral y espiritual durante toda mi vida estudiantil.

A mis hermanos: **Zenovia, Ricardo y Raúl**, con quienes compartí diversas vivencias como estudiante.

RECONOCIMIENTO

El presente trabajo de Tesis no hubiese sido posible sin las facilidades brindadas por las Autoridades del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN), quienes me concedieron el acceso a los diferentes ambientes del Departamento de Radioterapia, incluyendo la sala de operaciones, así como también el uso de los instrumentos de dosimetría para las evaluaciones correspondientes.

Asimismo quiero expresar mi reconocimiento sincero al Ingeniero y Físico Nuclear César Picón Chávez, quién se desarrolló como asesor del presente trabajo.

Ramiro Chujutalli Redtegui

HIGIENE Y SEGURIDAD EN UN DEPARTAMENTO DE RADIOTERAPIA

CONTENIDO	Pag.
Introducción	06
Resumen	07
CAPITULOS :	
CAP. 1 Aplicaciones médicas de las radiaciones	08
1.1 Rayos X en el diagnóstico médico	08
1.2 Radionúclidos en el diagnóstico médico	08
1.3 Rayos X en la terapia médica	10
1.4 Radionúclidos en la terapia médica	11
CAP. 2 Casos específicos de evaluación y análisis de exposición radioactiva en el Departamento de Radioterapia.	13
2.1 Análisis y evaluación de ^{226}Ra	13
2.2 Análisis y evaluación de ^{131}I	24
2.3 Análisis y evaluación de ^{60}Co	25
CAP. 3 Blindajes	30
Casos específicos de Cálculo de Blindajes	30
3.1 Para una fuente de ^{226}Ra	30
3.2 Para una fuente de ^{60}Co	33
CAP. 4 Parámetros para el Cálculo de Blindajes de recintos de irradiación destinados a alojar equipos de Teleterapia.	42
4.1 Clasificación.	42
4.2 Magnitudes y Unidades. Criterios Prácticos	42
4.3 Análisis crítico	56
CAP. 5 Condiciones de irradiación a las cuales puede estar sometido un Blindaje.	59
5.1 Radiación directa	60
5.2 Radiación de fuga	60
5.3 Radiación dispersa	60
CAP. 6 Metodología de Cálculo para la determinación de espesores.	61
6.1 Equipos de teleterapia sin barrera de haz	61
6.2 Equipos de teleterapia con barrera de haz	64
6.3 Verificación de la eficiencia del blindaje	65

CAP. 7 Problemas de diseño.	67
7.1 Instalación típica.	67
7.2 Pasaje de ductos.	68
7.3 Criterio para el dimensionamiento del blindaje del techo y del piso cuando no existe ocupación.	69
7.4 Efectos "cielo" y "suelo".	70
CAP. 8 Problemas especiales de equipos de alta energía.	72
8.1 Neutrones, importancia, blindaje.	72
8.2 Activación del aire y de aerosoles. Producción de gases tóxicos.	72
8.3 Activación del blanco y de componentes.	74
CAP. 9 Sistemas básicos de seguridad. Ubicación del comando. Comunicación con el paciente.	75
9.1 Sistemas básicos de seguridad.	75
9.2 Ubicación del comando.	77
9.3 Comunicación con el paciente.	78
CAP.10 Análisis de consecuencias en situaciones anormales.	79
10.1 Ingreso al recinto de irradiación con el equipo en posición de irradiación.	79
10.2 Caso de falla del cronómetro.	81
10.3 Problemas de equipo que pueden efectuar terapia con electrones o fotones indistintamente.	82
10.4 Caso de iniciación de la irradiación con personal dentro del recinto.	82
CAP.11 Conclusiones y recomendaciones	83
11.1 Conclusiones	83
11.2 Recomendaciones	84
Anexos	85
Teoría	86
Legislación	102
Gráficos	109
Fotos	114
Referencias Bibliográficas	119

INTRODUCCION

Motivado por la necesidad de aplicar los criterios de la Ingeniería de Higiene y Seguridad Industrial a los riesgos existentes en un Centro Asistencial donde se utilizan fuentes radiactivas para el diagnóstico y terapia, el suscrito eligió el Departamento de Radioterapia del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN) para desarrollar durante todo el año de 1990 y parte del año 1991, el trabajo de tesis que entre otros aspectos contemplaría: la evaluación, el análisis y el establecimiento de medidas de Higiene y Seguridad frente a las exposiciones provenientes de fuentes selladas y abiertas, usadas diariamente en dicha Institución. Es así como desde el mes de Enero de 1990 hasta Mayo de 1991 se desarrolló esta tesis que en adelante servirá como libro referencial para comparar las situaciones de Higiene y Seguridad radiológica en los hospitales.

Ramiro Chujutalli Reátegui

RESUMEN

Las evaluaciones y análisis, desarrollados en lo referente al uso y manejo de las dos fuentes radioactivas, es decir, ^{226}Ra y CO-60 , así como el corto seguimiento hecho a pacientes con ^{131}I , están basados fundamentalmente en la experiencia adquirida por el autor, debido a su participación en labores relacionadas a protección radiológica en el INEN, durante el año 1990 además del eficiente asesoramiento del personal de ingeniería del Departamento de Radioterapia.

Los criterios y metodología para el Cálculo de Blindajes aplicados en el presente trabajo, están basados en las recomendaciones dadas por la Comisión Internacional de Protección Radiológica y en la experiencia del personal de Física Nuclear que labora en el INEN.

- * En el primer capítulo se trata sobre aplicaciones médicas de las radiaciones así como el uso de los Rayos X y algunos radio-núclidos en el diagnóstico y terapia médica.
- * En el segundo capítulo se trata sobre la evaluación y análisis de los niveles de exposición proveniente de tres fuentes radiactivas usadas regularmente en el INEN con fines de diagnóstico y terapia.
- * En el tercer capítulo se refiere a casos específicos de cálculo de blindaje de un "container" para una fuente de ^{226}Ra , así como también el cálculo del "cabezal" para alojar una pastilla de ^{60}CO .
- * En el cuarto capítulo se definen los parámetros para el cálculo de blindajes de recintos de irradiación, se analiza su importancia relativa y se efectúan recomendaciones prácticas
- * En el quinto capítulo se definen brevemente las condiciones de irradiación a las que pueden estar sometidos los blindajes de un recinto de irradiación.
- * En el sexto capítulo se desarrolla la metodología básica para el cálculo de los espesores de los blindajes.
- * En el séptimo capítulo se analizan problemas de diseño , instalaciones típicas, posición del equipo de irradiación, laberinto, blindaje de puerta, ductos, etc.
- * En el octavo capítulo se discuten problemas especiales que se presentan en equipos de teleterapia de alta energía.
- * En el noveno y décimo capítulo se analiza problemas de seguridad y consecuencias de eventuales situaciones anormales en la operación de equipos de teleterapia.
- * En el último capítulo se describen las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de tesis.

CAPITULO 1

APLICACIONES MEDICAS DE LAS RADIACIONES

La radiación (rayos X) para fines de diagnóstico, se ha venido utilizando desde 1896 y la radiación (^{226}Ra) se emplea en terapia desde 1898.

El empleo de la radiación en las artes curativas a proporcionado grandes avances en la salud de la población.

El diagnóstico y tratamiento de la enfermedad e investigación de la causa, historia y curación de aquella, mediante el empleo de la radiación, a aumentado enormemente nuestra esperanza de vida, salud y bienestar.

Sin embargo, en todas aquellas ocasiones en que se haga uso de la radiación deben pesarse los beneficios esperados y los daños que se puedan ocasionar.

1.1.- RAYOS X EN EL DIAGNOSTICO MEDICO

Las aplicaciones en diagnóstico de las radiaciones son innumerables, encontrándose técnicas adecuadas podemos visualizar no solo los huesos y dientes sino también las distintas cavidades corporales y tejidos.

La exposición radiológica a través de las unidades médicas de diagnóstico (rayos X y fluoroscopios), varía con los procedimientos empleados y de institución en institución y aún el mismo procedimiento en la misma unidad de rayos-X puede no dar la misma exposición en exámenes consecutivos.

El fluoroscopio puede constituir la fuente más peligrosa de rayos-X si no se le controla en forma adecuada. Su potencialidad dañina no solo incluye al paciente, sino también al personal que lo emplea.

1.2.- RADIONUCLIDOS EN EL DIAGNOSTICO MEDICO

Centenares de hospitales emplean actualmente radionúclidos como parte de su equipo de diagnóstico. Sin embargo este campo está en su etapa inicial y existe mucho por hacer en el futuro.

En general podemos decir que existen tres categorías de los radionúclidos en diagnósticos: (1) Técnicas de dilución; (2) Mediciones de flujo o difusión y (3) Concentración Bioquímica.

1.2.1 Técnicas de Dilución

1.2.1.1 Volumen Sanguíneo : El ^{131}I en seroalbúmina humana se inyecta dentro del torrente. Después de un tiempo adecuado (10-15 minutos) se extrae una alícuota de sangre y se comparará la actividad de la muestra con la actividad total inyectada. La dilución nos da una medida del volumen.

1.2.1.2 Volumen Acuoso : Puede medirse de modo semejante al volumen sanguíneo, pero se ingiere tritio o deuterio acuoso (no se inyecta). Esta técnica de dilución puede dar una medida del agua en el cuerpo.

1.2.1.3 Agua Corporal Extracelular : Puede medirse de modo similar empleando ^{24}Na o ^{82}Br como trazadores.

1.2.1.4 Masas de glóbulos rojos : Puede determinarse usando células marcadas con ^{59}Fe o ^{51}Cr . La marcación con ^{59}Fe debe realizarse en el cuerpo humano y por consiguiente se requiere de un donante. La marcación con ^{51}Cr puede hacerse en una muestra de los propios glóbulos del paciente.

1.2.1.5 Otros Radionúclidos : Útiles en esta técnica son el ^{32}P y el ^{14}C en glicina.

1.2.2 Mediciones de Flujo de Difusión

1.2.2.1 Flujo Cardíaco : Una cantidad dada de seroalbúmina yodada o material conteniendo ^{24}Na , se inyecta en un brazo. El muestreo continuo de una arteria distal al corazón puede registrar el tiempo de la circulación así como también la cantidad de sangre bombeada en un tiempo dado, registrando el tiempo y la cantidad de radiactividad.

1.2.2.2 Desórdenes Periféricos : Se emplean gran parte de las mismas técnicas que se usan para determinar flujo cardíaco y circulación. Una cantidad dada de material radiactivo se inyecta en un brazo u otro lugar conveniente y el tiempo requerido para alcanzar otro lugar (el brazo opuesto por ejemplo) es una medida del tiempo de circulación. La contricción vascular y la consiguiente restricción circulatoria pueden medirse de este modo. Para esta prueba se emplea el ^{24}Na y el ^{32}P .

1.2.3 Concentración Bioquímica

1.2.3.1 Pruebas de la función hepática empleando ^{131}I .

- 1.2.3.2 Desórdenes tiroideos. Es la mejor prueba de radiodiagnóstico conocido. El ^{131}I es concentrado en forma selectiva por la tiroides. Una cantidad conocida de ^{131}I se da al paciente y después de un tiempo adecuado se "cuenta" la región de la tiroides. Esta mide el porcentaje de absorción. La actividad de la tiroides se compara con la lectura de una cantidad igual (control).
- 1.2.3.3 Ubicación y extensión de tumores malignos. Cuando el cáncer de tiroides se ha metastasiado en otras partes del cuerpo, una dosis de diagnóstico de ^{131}I seguida de un muestreo corporal total, puede localizar con frecuencia las áreas de cáncer de la tiroides.
- 1.2.3.4 El ^{32}P se ha empleado para localizar tumores cerebrales, pero se requiere de una sonda interna para utilizar este método. El uso de ^{131}I incluido en seroalbúmina humana puede seguirse en la localización de tumores no hallados por otros métodos. Este método es más o menos preciso.
- 1.2.3.5 El ^{64}Cu , ^{42}K y ^{74}As se emplean también en la ubicación de tumores.

1.3.- RAYOS X EN LA TERAPIA MEDICA

Los rayos-X como herramienta terapéutica han sido empleados durante muchos años.

Los rayos-X terapéuticos tienen un rango energético bastante flexible. En la terapia superficial pueden emplearse los rayos Grenz muy blandos para el tratamiento de tumores malignos de la piel. Sin embargo, aún cuando se emplean estos rayos de muy baja energía, puede haber una cierta radiación no deseada que se traslada a través de las capas superficiales al interior del cuerpo.

La radiación más penetrante se emplea en la irradiación de estructuras más profundas. Esta constituye el campo de la unidad de terapia de rayos-X del tipo supervoltaje. A fin de evitar quemaduras en la piel, la terapia profunda se desarrolla mediante distintas "puertas" o áreas de ingreso.

En algunas unidades se emplea una forma de terapia "giratoria", que es tan adaptable a las unidades de cobalto - 60 como a los rayos-X.

Los aceleradores de partículas están siendo empleados en el tratamiento de diversos tipos de tumores malignos.

1.4.- RADIONUCLIDOS EN LA TERAPIA MEDICA.

El uso terapéutico de los radioisótopos se agrupa bajo tres modos distintos de aplicación: (1) localización bioquímica (2) localización física y (3) teleterapia. Una cuarta, ó tal vez una subdivisión de la segunda, sería la ubicación de materiales inertes dentro del tumor y su activación posterior con un haz de neutrones.

Mucho se conoce ahora sobre tumores y los métodos de combatirlos, por lo que numerosas formas de neoplasias son tratadas exitosamente y no son necesariamente mortales.

En el Departamento de Radioterapia del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas (INEN) se trata con modernos equipos que emiten radiaciones de alta energía capaces de destruir los tumores muy profundos.

Actualmente para el tratamiento de enfermedades neoplásicas, en el INEN se emplean las siguientes técnicas:

1.4.1 Localización bioquímica. Absorción selectiva de un material requerido por un tejido particular para desarrollar su función específica.

Un ejemplo es la absorción selectiva del yodo por la tiroides.

1.4.2 Teleterapia: Cierta distancia entre la fuente y el tumor.

1.4.2.1 Equipos emisores de rayos-X

a. Radioterapia superficial

b. Radioaterapia profunda

1.4.2.2 Equipos de Alta Energía

a. Telegammaterapia (Co-60, Cs-137)

b. Acelerador lineal

- 1.4.3 Braquiterapia. La fuente emisora está en contacto con ó dentro del cuerpo del paciente.
- a. Terapia intracavitaria: dentro de cavidades naturales del organismo
 - b. Terapia intersticial: dentro del tumor
 - b.1. Implantes transitorios
 - b.2. Implantes permanentes
 - c. Aplicadores dérmicos u oftálmicos de radiación Beta.

CAPITULO 2

CASOS ESPECIFICOS DE EVALUACION Y ANALISIS DE EXPOSICION RADIATIVA EN UN DEPARTAMENTO DE RADIOTERAPIA

En este capítulo se presenta los resultados del trabajo realizado en el Departamento de Radioterapia del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas durante los meses de Noviembre y Diciembre de 1990, relacionado con los niveles de exposición proveniente de tres tipos de fuentes radiactivas:

- De ^{226}Ra
- De ^{131}I
- De ^{60}Co

2.1.- Evaluación y Analisis de ^{226}Ra .- Consta de tres partes:

La primera parte se refiere a la identificación e inspección de los ambientes o lugares en donde se encuentra el ^{226}Ra .

La segunda parte se trata de la evaluación de los niveles de exposición radiactiva a que se encuentra sometida la tecnóloga de turno.

En la tercera parte se trata de la evaluación de los niveles de la exposición radiactiva a que se encuentran sometidos los pacientes con RIC (Radio IntraCavitario), así como también los otros pacientes que comparten la sala de internamiento.

2.1.1 Primera Parte:

Identificación: en esta primera parte se identificó los ambientes de trabajo, llegando a determinar que existen cuatro zonas en las que el ^{226}Ra se encuentra presente:

- 1.- Almacén/Bóveda de ^{226}Ra ubicado en el sótano del Departamento de Radioterapia.
- 2.- Zona del 4^{to} piso del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas en donde se realiza el internamiento de pacientes con RIC.
- 3.- Zona del 5^{to} piso del Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas, en donde se realiza el internamiento de pacientes con RIC.
- 4.- Existe también un ambiente en el sótano del Departamento de Radioterapia en el que se almacena cierta cantidad de tubos y/o agujas de ^{226}Ra .

CUADRO Nº 1

CLASIFICACION DE LOS TUBOS DE Ra²²⁶

	CANTIDAD DE TUBOS	CARGA POR TUBO	CARGA TOTAL
	19	13.33 mCi	253.27 mCi
	55	6.66 mCi	366.30 mCi
	7	3.33 mCi	23.31 mCi
T O T A L	81		642.88 mCi

Nota 1: Se verificó además la existencia de 4 agujas de Ra²²⁶ de 2 mCi c/u.

CUADRO Nº 2

CLASIFICACION DE LOS OVOIDES

TIPOS OVOIDES/SONDA	CARGA	CARGA TOTAL
Ovoide Chico	6.6 mCi x 2	13.31 mCi
Ovoide Mediano	[6.66 mCi x 2] [3.33 mCi x 2]	19.98 mCi 13.33 mCi
Sonda de 1 Tubo	13.33 mCi	13.33 mCi
Sonda de 2 Tubos	13.33 mCi+6.66 mCi	19.99 mCi
Sonda de 3 Tubos	[6.66 mCi x 2] [13.33 mCi x 1]	26.65 mCi

CUADRO Nº 3

TIPOS DE CARGA TOTAL POR PACIENTE

Ovoide Chico + Sonda de 2 tubos	33.31 mCi
Ovoide Chico + Sonda de 3 tubos	39.98 mCi
Ovoide Mediano + Sonda de 2 tubos	39.97 mCi
Ovoide Mediano + Sonda de 3 tubos	46.63 mCi

Nota 2: Lo mas común es la carga de 33.31 mCi por paciente.

DEFINICION DE LOS TERMINOS

OVOIDE: Dispositivo de jebe de forma ovoide con un orificio al centro en donde se colocan los tubos radiactivos.

Existen tres tamaños de ovoides: grandes, medianos y chicos.- Los ovoides se utilizan para tratamientos intravaginales.

SONDA: Dispositivos de jebe latex en donde también se colocan los tubos radiactivos. Existen sondas de cuatro, tres, dos y un tubo radiactivo que son utilizados de acuerdo a la histerometría.- Las sondas se utilizan para tratamientos de cuello uterino.

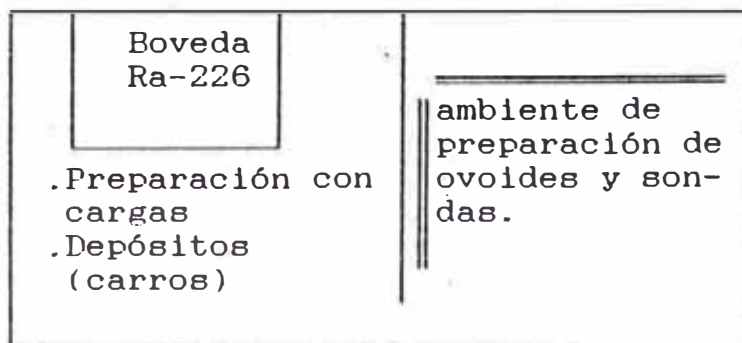
TUBO: Carga radiactiva que pueden ser de tres clases: de 13.33 mCi, 6.66 mCi y de 3.33 mCi.- éstas cargas van colocadas en los ovoides o sondas.

AGUJAS: Cargas radiactivas que van colocadas directamente o cerca del órgano afectado del paciente.

Inspección: En relación con la higiene ambiental en las zonas de internamiento de 4^{to} y 5^{to} piso, las condiciones son óptimas.

- En el almacén/boveda de ^{226}Ra , no existe buena ventilación, ni limpieza en las superficies de trabajo.
- . Se percibe continuamente un olor pesado y/o desagradable durante el trabajo de desarme y preparación.
 - . Como ambiente donde temporalmente se encuentra el ^{226}Ra , se considera las salas de operación o implante. Igualmente los ambientes de "retiro" se considera como salas en donde existe exposición temporal (ver croquis N^o 3).
 - . Asimismo el camino por donde se traslada el carro con el material, es decir: ascensor, pasadizos de las salas de operación y pasadizos del 4^{to} y 5^{to}, se consideran lugares donde temporalmente existe exposición radiactiva.

Croquis N^o 1



2.1.2 **Segunda Parte:** MEDICION DE LA EXPOSICION A QUE ESTA SUJETA LA TECNOLOGA DE TURNO DURANTE UN MES.

Detectores utilizados:

A.- Model 470 A Panoramic Survey Meter

B.- Model 450 B Ion Chamber Survey Meter

Operaciones que realiza la Tecnología de Turno

a. Desarme y Preparación: Esta es la operación en la que se produce la mayor exposición debido a varios factores: disposición de cargas en el ambiente (bóveda, "carro", depósitos portátiles), habilidad de la tecnología para desarmar y preparar los ovoides y sondas con Ra^{226} .

Sin embargo se pudo observar que algunas tecnólogas no tienen mucho criterio para realizar esta operación, es decir, poco consideran los parámetros de tiempo y distancia.

Esta operación la realizan 2 veces por semana y unicamente por un mes durante todo el año, es decir, solo 8 veces por año.

- Aproximadamente en cada operación se demora 70 minutos.
- La exposición en cada operación es de aproximadamente 35mR.
- La exposición acumulada mensual es de aproximadamente 280mR.

b. Implante: No reviste cuidado, puesto que el tiempo y la distancia a la fuente juegan un papel importante en esta operación.

Tiempo Total estimado en cada operación: 60"

Exposición acumulada por jornada o vez: 5mR.

Exposición acumulada mensual : 40mR.

c. Retiro: Operación semejante al implante.

Exposición acumulada mensual: 40mR.

Luego: Total acumulado mensual en las tres operaciones, aproximadamente:

280 +	En Desarme y Preparación
40	En Implante
<u>40</u>	en Retiro
360mR	

La exposición medida es la correspondiente a las manos y antebrazo.

Como se puede ver, los 360mR en comparación con los 6,200 mR, que es el Límite Permisible mensual para manos y antebrazo, resulta mínimo.

Sin embargo si consideramos que esta misma exposición están recibiendo los ojos, estaríamos acercándonos al Límite Permisible mensual que es de 400mR.

2.1.3 Tercera Parte: MEDICION DE LA EXPOSICION EN LOS PACIENTES INTERNADOS. El internamiento de algunos pacientes, se producen fundamentalmente por dos razones:

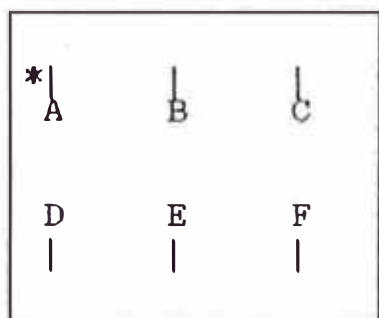
- Estado de salud crítica.
- Por protección o seguridad.

En las mediciones realizadas, se pudo verificar que el paciente más próximo, es decir, el que se encuentra en la cama contigua al paciente con RIC, es el que está expuesto aproximadamente a 5 mR/h.

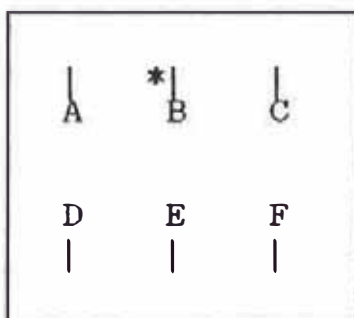
Esto indica que la exposición acumulada durante las 120 horas (tiempo que dura el internamiento del paciente con RIC), es de 600mR, lo cual representa una cantidad mayor que el límite permisible anual para el público (500mR).

Croquis Nº 2

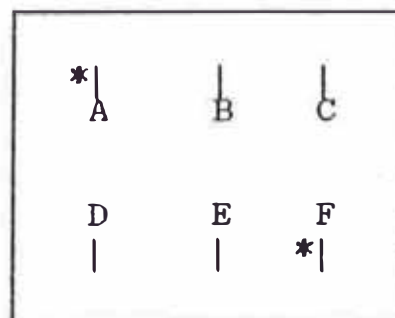
CROQUIS DE LA DISTRIBUCION DE LAS CAMAS EN LAS SALAS DE INTERNAMIENTO



POSICION I
No debe ocuparse la cama B



POSICION II
No debe ocuparse las camas A y C



POSICION III
No debe ocuparse las camas B y E

*** Cama del paciente con RIC**

Modificando la distancia y/o redistribuyendo la ubicación de las camas dentro de los ambientes ó salas de internamiento se puede solucionar el riesgo de sobre exposición.

- . Se sugiere que el caso II no debe existir y en todo caso tomar la posición I.
- . La distancia entre camas contiguas es de 1.50 mts.
- . La distancia entre camas ubicadas opuestamente, ejemplo; entre A y D ó entre B y E ó C y F, es de 5 mts.

Croquis Nº 3

DISTRIBUCION DE SALAS Y CAMAS DE INTERNAMIENTO



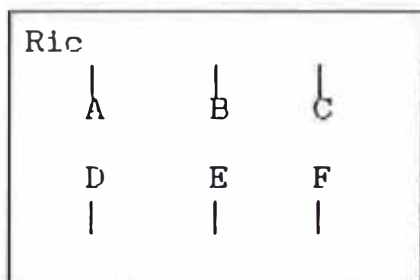
Observaciones: Esta distribución rige tanto para el 4º y 5º piso.

La distancia a la cama más próxima es de 1.50 mts. y donde se produce la mayor tasa de exposición que oscila entre 4.8 y 5.5 mR/h. Con esta tasa, durante las 120 horas (tiempo que dura el internamiento) el paciente considerado como miembro del público en general, recibe aproximadamente $120 \times 5 \text{ mR/horas} = 600 \text{ mR}$, cantidad que excede al límite permisible absoluto (anual), es decir: 500 mR.

Este es uno de los casos particulares comprobados.

Potencialmente existen el caso en que el paciente considerado como miembro del público, permanezca más de 120 horas al lado de un paciente con RIC. por ejemplo, si una cama permaneciera ocupada por 2 pacientes con RIC consecutivamente y el paciente más cercano continuará internado en este lapso, entonces la dosis acumulada será mayor.

Croquis N° 4



Tasas de Exposición en las Demás Camas
Cuadro N° 4

CARGA DEL PACIENTE CON RIC	CAMA	DISTANCIA A PARTIR DEL ABDOMEN DEL PTE	TASA DE EXPOSICION
33.31 mCi	A	0.10mts	580 mR/h
-	B	1.50mts	4.80mR/h
-	C	3.00mts	1.20mR/h
-	D	5.00mts	0.400mR/h
-	E	5.20mts	0.260mR/h
-	F	5.80mts.	0.200mR/h

En relación con el número de camas existe una cantidad constante para pacientes con RIC.- así por ejemplo en el 4^{to} piso existe un promedio de cuatro camas y en el 5^{to} piso entre ocho y nueve camas.

Se verificó la existencia de dos camas para pacientes "especiales" con RIC, los mismo que se encuentran ubicados en el sexto piso y son utilizados eventualmente para casos particulares.

Lo importante de la ubicación de estas camas, es que estén considerablemente separadas entre ellas. Hay tres opciones para utilizar las camas, estas son A, B y C.

La separación entre A y B es de 3.00 mts y la distancia de A a la cama C es de 6.00 mts por lo que resulta conveniente ubicar al paciente en el lugar A ó C.

2.1.4 Medición de la Exposición Radiactiva a que se Encuentran Sometidos los Médicos

Respecto a la operación de implante, se comprobó que el personal médico también está expuesto a una considerable dosis de radiación.

- El tiempo que permanecen los médicos realizando el implante es de aproximadamente 5 minutos, lo que produce una exposición acumulada por pacientes de más o menos 1.5 mR equivalente a una tasa de 18mR/h.

Luego como por jornada (día) se atienden a un promedio de 8 pacientes, la exposición acumulada es de 12mR.

Al mes se realizan 8 jornadas de implante, entonces la exposición acumulada mensual es de aproximadamente $12\text{mR} \times 8 = 96\text{mR}$ (mensual).

De los médicos, un principal y un residente intervienen en el implante de las fuentes radiactivas, este último es el que permanece durante un mes en esta operación antes de rotar, además es el que se encuentra expuesto el mayor tiempo en la operación del implante.

En la operación de retiro de la fuente radiactiva, el que realiza dicha operación es el residente únicamente.

Por cada paciente, se exponen aproximadamente 3mR luego en cada jornada se expondrán $8 \times 3\text{mR} = 24$ y mensualmente será $24 \times 8 = 192\text{mR}$.

Finalmente:

Exposición acumulada mensual en los médicos residentes:

Implante	96 mR
Retiro	<u>192</u> mR
	288 mR

Los médicos principales generalmente se exponen durante la operación de implante aproximadamente a la mitad de lo expuesto por los residentes y en caso de los retiros a veces solo están como observadores, de allí que las cantidades referenciales de exposición pertenecen a los residentes.

El médico principal interviene en la operación de implante una vez por mes, luego al año tendrá 12 participaciones, y como quiera que por cada intervención la exposición es de 12mR. al año lo acumulado será de 144mR.

2.1.5.- Medición de la Exposición a que se Encuentran Sometidas las Enfermeras de Piso

- En cada piso y por cada turno trabajan 2 enfermeras.
- Cada enfermera trabaja 5 días por semana.
- Durante el día cada paciente con RIC es chequeado tres veces.
- La enfermera emplea aproximadamente tres minutos para el chequeo respectivo de cada paciente con RIC.
- Se constató que por lo general existe la presencia de por lo menos un paciente con RIC en cada piso, de tal manera que todos los días hay este tipo de pacientes para chequear
- En el máximo de los casos puede darse la situación que solo un día deje de haber pacientes con RIC

Cálculos de Exposición Acumuladas por las Enfermeras de Piso Durante el Año de Trabajo

Las tasas de exposición tomadas en tres puntos de cada paciente con RIC registran las siguientes cantidades

X₁: Tasa de Exposición a 10 cms. de la superficie abdominal (en dirección del útero)

$$X_1 = 480 \text{ mR/h}$$

X₂: Tasa de exposición lateral a 15 cms. de la cintura, aproximadamente en dirección de la ubicación de la fuente ²²⁶Ra

$$X_2 = 120 \text{ mR/h}$$

X₃: Tasa de exposición al pie del paciente con RIC

$$X_3 = 13 \text{ mR/h}$$

2.1.6 Calculo de la Exposición Acumulada para dos Casos Extremos.

Caso I: Que solo sea un paciente con RIC a quién una enfermera de turno le chequea solo una vez por día.

Tiempo total: 48 semanas (considerando 4 semanas de vacaciones al año)

Tasa de Exposición promedio (X):
 Considero $X_2 = 120 \text{ mR/h}$ (el punto 2 es la ubicación que toman las enfermeras para el chequeo de los pacientes).
 (ver 2.1.5)

Luego:

$$\frac{3 \text{ min}}{\text{día}} \times \frac{5 \text{ días}}{\text{sem}} \times \frac{48 \text{ sem}}{\text{año}} = \frac{720 \text{ min}}{\text{año}}$$

$$\text{Pero } \frac{720 \text{ min}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = \frac{12 \text{ horas}}{\text{año}}$$

Entonces la expresión acumulada será :
 $x = X_t \rightarrow 120 \frac{\text{mR}}{\text{hora}} \times \frac{12 \text{ horas}}{\text{año}} = 1,440 \text{ mR}$

Caso II: Que existan dos pacientes con RIC a quienes una enfermera les chequee cuatro veces durante su turno respectivo.

Luego

$$2 \frac{\text{ptes. RIC}}{\text{día}} \times \frac{12 \text{ min}}{\text{ptes. RIC}} \times \frac{5 \text{ días}}{\text{sem}} \times \frac{48 \text{ sem}}{\text{año}} = \frac{5760 \text{ min}}{\text{año}}$$

$$\text{Pero: } \frac{5760 \text{ min}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = \frac{96 \text{ horas}}{\text{año}}$$

Entonces la exposición acumulada será:

$$x = X_t = 120 \frac{\text{mR}}{\text{h}} \times \frac{96 \text{ horas}}{\text{año}} = 11,520 \text{ mR}$$

2.1.7 Seguimiento de la Exposición Acumulada Mensual a Dos Tecnólogas.

Stock de Cargas de ^{226}Ra en Bóveda:

Tipo de Carga :	Cantidad	Total de Carga	
De 3.33 mCi	7 tubos	23.31 mCi	} 81 tubos
De 6.66 mCi	55 tubos	366.30 mCi	
De 13.33 mCi	19 tubos	253.27 mCi	
2.00 mCi	4 agujas	<u>8.00 mCi</u>	} 4 agujas
		650.88 mCi	

Son 650.88 mCi que disponen las tecnólogas para relizar sus operaciones según requerimiento.

TECNOLOGA V

- 1.- En desarme y preparación: El promedio de exposición por jornada fue de 35 mR. Luego $35 \frac{\text{mR}}{\text{jornada}} \times 8 \frac{\text{jornadas}}{\text{mes}} = 280 \frac{\text{mR}}{\text{mes}}$
El tiempo promedio por jornada fue de 60 min.
- 2.- En implante: En esta operación la exposición acumulada fue de aprox. 5 mR por jornada. Luego $5 \frac{\text{mR}}{\text{jornada}} \times 8 \frac{\text{jornadas}}{\text{mes}} = 40 \frac{\text{mR}}{\text{mes}}$
El tiempo total por jornada es de aproximadamente 60 minutos.
- 3.- En el retiro: La exposición acumulada mensual, es igual que en implante, o sea: 40 mR mensual.

TECNOLOGA M

- 1.- En desarme y preparación:

El tiempo promedio que emplea la tecnóloga M oscila entre 60 y 90 minutos siendo la exposición por jornada de 90 mR, lo cual implica una exposición acumulada mensual de $90 \frac{\text{mR}}{\text{jornada}} \times 8 \frac{\text{jornadas}}{\text{mes}} = 720 \frac{\text{mR}}{\text{mes}}$

- 2.- En implante: El tiempo empleado es el mismo, que el de la tecnóloga V, y la exposición acumulada es de 42 mR.
- 3.- En el retiro: La exposición acumulada mensual es también de 42 mR.

Cuadro Nº 5

OPERACION	EXPOSICION ACUMULADA	
	V	M
DESARME Y PREPARAC.	280mR	720mR
IMPLANTE	40mR	42mR
RETIRO	40mR	42mR
T O T A L	360mR	804mR

2.2.- EVALUACION Y ANALISIS DE LA EXPOSICION RADIATIVA A ¹³¹I

Uno de los radioisótopos empleados en medicina nuclear es el I¹³¹. En el INEN se utiliza este radioisótopo para el tratamiento de la tiroides en cantidades que oscilan entre 100 y 110 mCi quincenal. Por ejemplo se hizo el seguimiento a dos pacientes tratados con ¹³¹I, verificándose lo siguiente:

- Cargas suministradas: 100 mCi.
- Las mediciones se hicieron a la altura de las gónadas de ambos pacientes quienes estaban en un solo ambiente y distanciados a un metro (ver croquis nº 5). Los valores registrados son los siguientes.

Primer día -----> 12am 110 mR/h
 Segundo día -----> 11am 12 mR/h
 Tercer día -----> 12m 1.2 mR/h

Tiempo total de internamiento: 72 horas

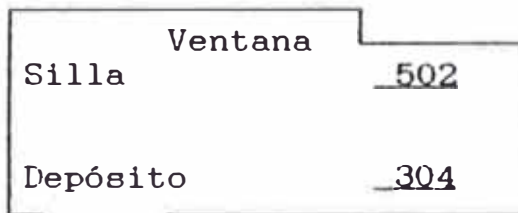
Tomando el promedio de tasas de exposición a la altura de gónadas tenemos:

- Exposición acumulada en promedio del primer día: 60 mR/hx24h=1,440mR
 - Exposición acumulada en promedio del segundo día: 8mR/hx24h= 192mR
 - Exposición acumulada en promedio del tercer día: 1mR/hx24h= 24mR
- 1,656mR

Esta exposición es la que recibe cada uno de los pacientes a nivel de las gónadas y no es sinó la contribución mutua de cada una de ellas al margen de considerar como un beneficio el suministro de ¹³¹I a una paciente, esta cantidad de 1.656mR supera

largamente el límite permisible de 500 mR/año para esos órganos. Sin embargo, al margen de que este valor sea elevado, el beneficio por motivos terapéuticos, es siempre mayor que el riesgo. Obviamente que este problema es fácilmente solucionable, mediante la reubicación de los pacientes en otro ambiente en donde las camas estén mas separadas.

Croquis Nº 5



*la distancia entre las camas, se verificó que era de 1.00mt.

2.3 EVALUACION Y ANALISIS DE LA EXPOSICION RADIATIVA A ⁶⁰Co

De los 11 meses laborables (48 semanas) al año, las tecnólogas trabajan con ²²⁶Ra (RIC) durante un mes (4 semanas) el resto de tiempo laboran en las máquinas de ⁶⁰Co.

La exposición total recibida, será la acumulada en RIC y ⁶⁰Co.

Como quiera que la exposición a ²²⁶Ra medida a nivel de cabeza es de 508 mR, calcularemos ahora en lo referente a ⁶⁰Co, cabe señalar que durante los 10 meses restantes la mayoría de las tecnólogas rotan en las 3 máquinas:

MAQUINA	DORADO	TH-80-2	TH-80-1
TIEMPO	3.3 MESES	3.3 MESES	3.3 MESES

También es necesario advertir que debido al rendimiento diferente de cada máquina la exposición varía en c/u de ellas. Así por ejemplo en el mes de febrero de 1991:

MAQUINA	DORADO	TH-80-2	TH-80-1
* RMM	53.79	42.35	20.28

* RMM: Roetgen/Metro/Minuto

Proyectado al mes de diciembre de 1991 los RMM de ellas disminuyen aproximadamente en 5 Roetgen.

MAQUINAS : DORADO Y TH-80-2

Son en las que se realizan tratamiento con "cufias", lo cual implica un mayor tiempo de preparación del paciente. Logicamente que esto es un porcentaje del total de

pacientes que llegan para ser tratados en cada una de estas máquinas.

El tiempo promedio por paciente, en estas dos máquinas, es de 3 minutos.

MAQUINA TH-80-1

Es la de menor rendimiento y solo se irradia desde una posición estable del cabezal (posición vertical).

EL tiempo promedio por paciente es de 2 minutos.

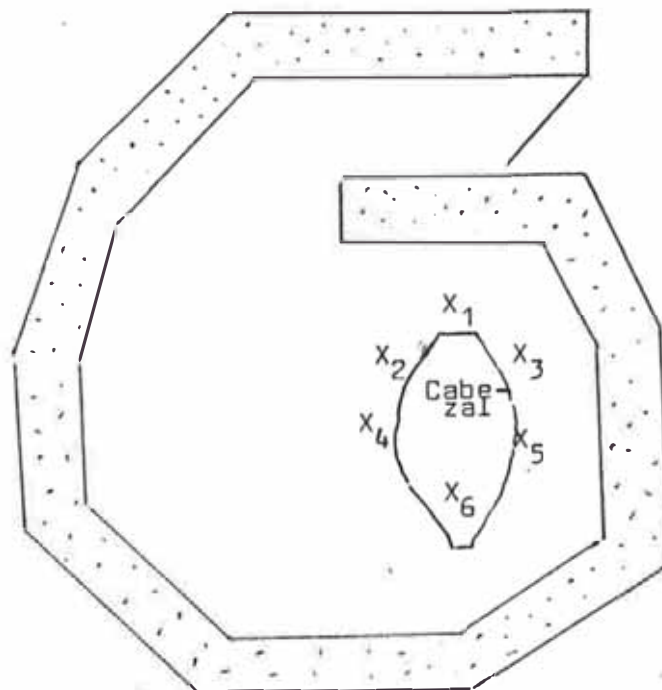
EXPOSICION POR RADIACION DE FUGA

Se midió la exposición por radiación de fuga en cada una de las máquinas y en la posición o ubicación más común de las tecnólogas. Así tenemos:

MAQUINA	DORADO	TH-80-2	TH-80-1
X promedio	1.5 mR/h	0.800 mR/h	0.400 mR/h

Existen posiciones en las que la exposición por radiación de fuga es mayor, por lo que no se debe trabajar, acomodar o preparar al paciente desde esa ubicación.

Figura N^o 1



2.3.1 Mediciones Hechas en las 3 Máquinas

Se eligieron 6 puntos referenciales, tal como se muestra en la figura N^o 1 y se midieron las tasas de exposición a distancias d_i ($i=1,2,\dots,6$) de la ubicación de la pastilla de cobalto 60 (ver cuadro N^o 6)

Cuadro N^o 6

DORADO					
d1=1.60m	d2=1.30m	d3=1.20m	d4=0.90m	d5=0.80m	d6=0.15m
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
0.600mR/h	1.3mR/h	1.5mR/h	3.3mR/h	4.2mR/h	12.0mR/h

TH 80-2					
d1=1.60m	d2=1.30m	d3=1.20m	d4=0.90m	d5=0.80m	d6=0.15m
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
0.300mR/h	0.780mR/h	0.800mR/h	1.6mR/h	2.2mR/h	7.0mR/h

TH 80-1					
d1=1.60m	d2=1.30m	d3=1.20m	d4=0.90m	d5=0.80m	d6=0.15m
X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
-	0.300	0.400	-	-	4.3mR/h

De los 6 puntos (1,2,3,4,5,6) o ubicaciones que toman las tecnólogas, las más comunes o referenciales son las posiciones 2 y 3. Es por élllo que para los cálculos se utiliza los valores de X₂ y X₃.

Cuando para la preparación del paciente ingresan 2 tecnólogas, se ubican generalmente en posiciones 2 y 3 o en posiciones 4 y 5.

De ingresar más de dos tecnólogas se ubicarán en una de las 6 posiciones señaladas en la fig.1; la más crítica, es la posición 6, ya que allí la tasa es siempre mayor (ver cuadro N^o 6).

Es importante hacer notar que los valores de la X_i (i = 1,2,3,4,5,6) se obtuvieron para la posición estandar, es decir, la directa (haz vertical) y a 80 cm . entre el cabezal y paciente).

Sin embargo, en las máquinas : DORADO y TH-80-2, se realizán tratamientos con el haz tangencial (especialmente para mamas) y también tratamientos

con cuñas, lo que modifica los valores de las tasas de exposición porque la posición del cabezal va cambiando.

De todos modos, aún trabajando en estas condiciones especiales, no se sale de uno de los 6 valores de "tasas"

TASA EXPOSICION EN MESA DE COMANDO

$$X = 0.200 \text{ mR/h}$$

Exposición Acumulada al Año en Mesa de Comando

Considerando que de las 8 horas laborables, 5 horas aproximadamente se pasan en la mesa de comandos tenemos:

$$X_{\text{acum}} = (0.200 \text{ mR/h})(5 \text{ h/d})(5 \text{ d/sem})(40 \text{ sem/año}) = 200 \text{ mR}$$

2.3.2 Exposición Acumulada, en el Caso Que una Tecnóloga Trabajaría en una sola Máquina sin Rotar a otra, Durante Todo el Año Laboral.

DORADO: Considerando una tasa promedio de 1.8 mR/h a nivel de cabeza

$$X_{\text{acum}} = (0.03 \text{ mR/min})(3 \text{ min/pte})(50 \text{ pte/día})(5 \text{ día/sem})(40 \text{ sem/año}) = 900 \text{ mR/año.}$$

Luego:

$$X_{\text{total}} = \text{RIC} + {}^{60}\text{Co} = 508 + 900 = 1408 \text{ mR/año}$$

Por lo Tanto en los 3 casos $X_t < 5000 \text{ mR/año}$

La menor tasa de exposición se produce en las posiciones laterales delanteras, por lo que resulta conveniente trabajar desde allí.

Cantidades de Pacientes que se Tratan Diariamente en las Máquinas de ${}^{60}\text{Co}$

Teóricamente se tratan 100 pacientes diarios por máquina, de los cuales en el primer turno se ven la mitad, o sea, 50 pacientes y los restantes se tratan en la tarde.

Es importante indicar que los casos de tratamiento con cuñas se ven en la mañana, por lo que se puede afirmar que las tecnólogas de este turno demoran un poco más.

Durante los días de análisis y medición, se verificó que se trataban un promedio de 80 pacientes diarios sin embargo para los cálculos se consideró 100 pacientes por día.

2.3.3 Cálculos de Exposición Acumulada en una Tecnóloga Durante los 10 meses Trabajando en las 3 Máquinas de ^{60}Co :

A) Acumulado en DORADO (tiempo de 3.3 meses)

$$X_{\text{acum}} = (0.03\text{mR/min})(3\text{min/pte.})(50\text{ptes/día})(5\text{días/se m})(13.3\text{sem/año}) = 299.25\text{mR/año}$$

B) Acumulado en el TH-80-2 (tiempo 3.3 meses)

$$X_{\text{acum}} = (0.01\text{mR/min})(3\text{min/pte.})(50\text{ptes/día})(5\text{días/se m})(13.3\text{sem/año}) = 99.8\text{mR/año}$$

C) Acumulado en el TH-80-1 (tiempo 3.3 meses)

$$X_{\text{acum}} = (0.006\text{mR/min})(2\text{min/pte.})(50\text{ptes./día})(13.3\text{se m/año})(13.3\text{sem/año}) = 46.55\text{mR/año}$$

* Total acumulado al año en ^{60}Co = 445.55mR/año
≈ 446 mR/año

Luego : Acumulado en RIC y ^{60}Co al año a nivel de cabeza

$$X_{\text{acum}} = \text{RIC} + ^{60}\text{Co} = 508 + 446 + 200 = 1154\text{mR/año.}$$

COMENTARIO: Para los cálculos de la exposición acumulada, se consideró como tasa promedio lo correspondiente a las ubicaciones más representativas, es decir, a los puntos 2 y 3 de la figura número 1

CAPITULO 3

BLINDAJES

Uno de los principios más importantes de protección contra las radiaciones ionizantes los constituye la técnica del blindaje y como quiera que los rayos X y gamma representan el tipo más común de peligro de irradiación externa por su capacidad de penetración debido a su alta energía y considerando que en el INEN se utilizan FUENTES DE Ra²²⁶ Y de Co⁶⁰ que emiten precisamente uno de estos tipos de radiación (rayos gamma), se vio conveniente tratar casos específicos de cálculo de blindaje para estos dos tipos de fuentes.

CASOS ESPECIFICOS DE CALCULO DE BLINDAJES

3.1.- Blindaje Para Una Fuente de ²²⁶Ra

El radionúclido Ra²²⁶ aparte de emitir rayos alfa y rayos Beta emite también rayos gammas de energías elevadas. Para el tratamiento de los tumores, en el INEN se utilizan una cantidad considerable de estas fuentes, (642.88 mCi), por lo tanto el riesgo de exposición está presente en todo momento, máxime si se tiene en cuenta el manejo y transporte de dichas fuentes. De allí la importancia de calcular el blindaje del container portátil para el transporte de las fuentes de Ra²²⁶.

3.1.1 Diseño y Cálculo de Blindaje de un Container Portátil es decir de un recipiente para trasladar los tubos de ²²⁶Ra, que se muestra en el cuadro N° 7.

Cuadro N° 7

Cantidad (tubos)	Carga de cada tubo (mCi)	Carga Total
3	15.0	45
4	10.0	40
2	5.0	10
<u>2</u>	2.5	<u>5</u>
11		100

Cantidad y carga total de tubos de Ra²²⁶

Premisas Fundamentales Para el Cálculo:

I.- Fuente: Características

Para nuestro caso:

Fuente : Ra²²⁶

Características:

Carga puntual

A: Actividad = 100 mCi

Γ : Constante de Radiación del

Ra²²⁶ = 8,000 mR-cm²/h-mCi.

II.- Distancia entre fuente y punto, a la que supuestamente debe estar la persona.

Para nuestro caso:

d: Distancia de la fuente al punto = 100 cm.

III.- Tipos de personas a las que se protege, es decir:

a) Público en General

b) Personal ocupacionalmente expuesto

Para nuestro caso:

Las personas que se van a proteger son del tipo b.

IV.- Tasa de exposición que se desea obtener, o sea el límite permisible para cada parte del cuerpo en cuestión.

Para nuestro caso:

La parte del cuerpo en la que deseamos medir la tasa de exposición, corresponde a las manos, antebrazos y pies, en donde el límite permisible es igual a 36 mR/h. .

Por lo tanto, calculando la **Tasa de Exposición** X_0 mediante la fórmula:

$$X_0 = A \Gamma / d^2 \quad \text{según referencia bibliográfica N}^\circ /18/$$

Y reemplazando los valores correspondientes, tenemos:

$$X_0 = (100 \text{ mCi})(8,000 \text{ mR-cm}^2/\text{h-mCi})/10,000 \text{ cm}^2$$

$$X_0 = 80 \text{ m.R/h}$$

Ahora: Se desea calcular el espesor del blindaje de plomo del container de forma esférica, cilíndrica o paralelepípedo, de tal forma que a 1 mt. se reciba una tasa de exposición (X) de 36 m.R/h, valor permisible en las manos, antebrazos y pies.

Luego para calcular el espesor del Blindaje, utilizamos la siguiente relación:

$$X_p = X_0 e^{-\mu \cdot r} B(\mu r),$$

Según referencia bibliográfica /20/

Donde:

μ : Coeficiente de atenuación lineal del material del blindaje.

r: Radio o espesor del material del blindaje.

B(μr): Factor de reforzamiento esférico.

Entonces:

$$X_p / X_0 = B(\mu r) / e^{\mu r}$$

Según referencia bibliográfica /20/

donde: $X_0 = 80 \text{ mR/h}$ y $X_p = 36 \text{ mR/h}$;
por lo tanto:

$$36/80 = B(\mu r)/e^{\mu r} \implies 0.45 = B(\mu r)/e^{\mu r} \dots (1)$$

Para el Ra-226 con una energía de 1.5 MeV, si se asume $\mu r=1$, entonces $B(\mu r)=1.38$ (del cuadro N^o 8), luego reemplazando estos valores en la expresión (i), tenemos:

$$1.38 / 2.71182 = 0.50 \approx 0.45$$

Entonces se asume como aceptable

$\mu r = 1$

Ahora del cuadro N^o11: para el plomo y con 1.5 Mev obtenemos $[\mu/\delta]_{Pb}=0.0512 \text{ cm}^2$

Donde, μ : Coeficiente de atenuación del plomo.
 δ : Densidad del plomo = 11.35 gr./m³ (ver tabla VI y fig. 7).

$$\text{Luego } \mu = (0.0512) (\delta);$$

$$\text{Entonces } \mu = (0.0512) \times (11.35) = 0.581$$

Por lo tanto, si $\mu r = 1$, entonces $r = 1/0.581 = 1.72 \text{ cm}$ de Pb. Redondeando $1.72 \approx 2.0$ obtenemos un blindaje de 2.0 cm. de Pb

Observación :

- * El radio calculado, ($r=1.72 \approx 2$), es considerando un container esférico, sin embargo con fines prácticos, este "r" podrá representar con alguna aproximación, el espesor correspondiente tanto para un container cilíndrico como también para uno que tiene la forma de un paralelepípedo.

3.2.- Para una Fuente de ⁶⁰Co

3.2.1 Cálculo del Blindaje del Cabezal Para Una Pastilla de ⁶⁰Co

Datos:

Fuente Puntual : Pastilla de ⁶⁰Co

A₀ : Actividad Inicial = 5000 Ci.

Γ : Constante de radiación del ⁶⁰Co = 1.29 R-m²/h-Ci.

d : Distancia de la fuente al punto = 1 mt.

Cálculo de la tasa de exposición (X_o)

Aplicando la fórmula: $X_o = A \cdot \Gamma / d^2$, tenemos

$$X_o = (5000 \text{ Ci}) (1.29 \text{ R-m}^2/\text{h-Ci}) / 1\text{m}^2 = 6450 \text{ R/h}$$

$X_o = 6450 \text{ R/h} = 6450000 \text{ m.R/h}$
--

a) Blindaje con Plomo:

Cálculo del Coeficiente de Transmisión: K

Utilizando la fórmula: $K = X_p / X_o$..según
Ref.
Biblio.
Nº /18/

Donde: $X_o = 6'450,000 \text{ mR/h}$ y
 $X_p = 2.5 \text{ mR/h}$

Obtenemos lo siguiente:

$$K = 2.5 / 6450000 = 3.875 \times 10^{-7}$$

Ahora del cuadro Nº 8, para el ^{60}Co con una energía de 1.25 MeV, elegimos un $\mu r = 17$ y luego de interpolar obtenemos:

$$B(\mu r) = 5.85.$$

$$\text{Entonces: } B(\mu r) / e^{\mu r} = 5.85 / e^{17} = 2.4 \times 10^{-7}$$

$$\text{Como } 3.875 \times 10^{-7} \approx 2.4 \times 10^{-7}$$

Asumimos $\mu r = 17$ como buena elección. Ahora remitiéndonos al cuadro Nº 11, obtenemos $[\mu/\delta]_{\text{Pb}} = 0.0569 \text{ cm}^2/\text{gr}$

Luego si $\mu/\delta = 0.0569$

donde: δ : Densidad del Plomo = 11.35 gr/cm³

$$\text{Entonces: } \mu = (0.0569) (11.35) = 0.6458 \text{ cm}^{-1}$$

Por lo tanto: si $\mu r = 17$,

$$\text{Entonces } r = 17 / 0.658 = 26.32 \text{ cm.}$$

El espesor del Blindaje de Plomo será de 26.32 cm.

b) Con Tungsteno (Wolfranio)

Si $\mu r = 17$, del cuadro Nº 9 e interpolando, obtenemos:

$$B(\mu r) = 7.28, \text{ entonces } 7.28 / e^{17} = 3.013 \times 10^{-7}$$

$$\text{Como } 3.875 \times 10^{-7} \approx 3.013 \times 10^{-7}$$

Asumimos $\mu r = 17$, como buena elección. Ahora del Cuadro Nº 11 $[\mu/\delta]_{\text{W}} = 0.0544$

Donde, δ : Densidad del Tungsteno = 19.30 gr/cm³

Entonces: $\mu = (0.0544) (19.30) = 1.049$
Por lo tanto, si $\mu r = 17$
Entonces $r = 17/1.049 = 16.20$ cm.

El espesor del Blindaje del Tungsteno será 16.20 cm.

3.2.2 Caso Particular: Cálculo del Blindaje del Cabezal Para Una Pastilla de ^{60}Co

El año de 1974 se instaló en el antiguo Hospital de Neoplásicas, ubicado en la Av: Alfonso Ugarte, una máquina de cobalto 60 con una pastilla de 3,000 Curies (Ci).

El año de 1990, considerando el decaimiento respectivo y existiendo la necesidad de fabricar un irradiador, se calculó el blindaje del cabezal para alojar la pastilla mencionada. Así tenemos:

Datos

Fuente : ^{60}Co

Ao Actividad inicial = 3000 Ci (en el año 1974)

Solución :

Aplicando la fórmula:

$T_{1/2} = \text{Ln}2/\sigma$ según Referencia Bibliográfica N^o /18/

Donde:

$T_{1/2}$: Vida media del ^{60}Co = 5.26 años (Tabla A del anexo)

σ : Constante de desintegración del ^{60}Co

$\text{Ln}2 = 0.693$

Reemplazando valores en la fórmula, tenemos:

$\sigma = 0.693/5.26 = 0.132$ años⁻¹

Cálculo de la Actividad Actual: A

Fórmula: $A = A_0 e^{-\sigma t}$... Referencia Bibliográfica N^o /18/

Donde:

A : Actividad Actual

A_0 : Actividad Inicial = 3,000 mCi

σ : Constante de desintegración del $^{60}\text{Co} = 0.132$

t : Tiempo = 16 años (1990 - 1974)

Luego : $A = 3000e^{(-0.132)(18)} = 362.99 \text{ Ci}$

Cálculo de la Tasa de Exposición: X_0

$$X_0 = A \cdot \Gamma/d^2$$

Donde: X_0 : Tasa de Exposición a 1 mt.

Γ : Constante de radiación del $^{60}\text{Co} = 1.29 \text{ R-m}^2/\text{h-Ci}$

A : Actividad = 3,000 Ci

d : Distancia de la Fuente al punto = 1 mt.

$$\begin{aligned} \text{Luego: } X_0 &= (362.99 \text{ Ci})(1.29 \text{ R-m}^2/\text{h-Ci})/1\text{m}^2 \\ &= 468.26 \text{ R/h} = 468,260 \text{ m.R/h} \end{aligned}$$

Para encontrar el "r" del cabezal o container (esfera), aplicamos la siguiente relación:

$$X = X_0 e^{-\mu \cdot r} B(\mu r)$$

Referencia
Bibliográfica
Nº /20/

Cálculo del Blindaje del Container (cabezal) Utilizando Plomo.

Suponiendo que deseamos una tasa de exposición de 2.5 m.R/h a 1 mt de la fuente.

Entonces:

$$X_p = X_0 e^{-\mu r} B(\mu r), \text{ siendo } X_p = 2.5 \text{ mR/h y } X_0 = 468,260 \text{ mR/h}$$

$$2.5 \text{ m.R/h} = (468260 \text{ m.R/h})e^{-\mu r} B(\mu r)$$

$$2.5 / 468260 = B(\mu r) / e^{\mu r}$$

$$5.33 \times 10^{-6} = B(\mu r) / e^{\mu r}$$

Del Cuadro N°1 1, para el Pb y 1.25 Mev, obtenemos $[\mu/\delta]_{\text{Pb}} = 0.0569$

Luego:

$$\mu/\delta = 0.0569; \text{ donde } \delta_{\text{Pb}} = 11.35 \text{ gr/cm}^3$$

Entonces:

$$\mu = 0.0569 \times 11.35 = 0.6458$$

Ahora, buscamos un " μr " conveniente, de tal manera que obtengamos un

$$B(\mu r) / e^{-\mu r} = 5.33 \times 10^{-6}$$

Remitiéndonos al cuadro N° 8, e interpolando tenemos:

Para un $\mu r = 14$

$$B(\mu r) = 5.068, B(\mu r) / e^{-\mu r} = 5.068 / 1202604 = 4.20 \times 10^{-6}$$

Como vemos es una buena aproximación, es decir:

$$4.20 \times 10^{-6} \approx 5.33 \times 10^{-6}$$

Luego si $\mu r = 14$, Entonces $r = 14 / 0.6458 = 21.68$ cm

Cálculo del Volumen del Cabezal

$V = 4 \cdot \pi \cdot r^3 / 3$, donde $r = 21.68$ cm.

$$V = 4 (3.1416) (21.68)^3 / 3 = 42684.132 \text{ cm}^3$$

Cálculo del Peso del Cabezal

$$\text{Peso} = (11.32 \text{ gr/cm}^3) \times (42684.132 \text{ cm}^3) = 483.184 \text{ Kg}$$

Cálculo del Blindaje del Container (cabezal) Utilizando Tungsteno (Wolfranio)

Suponiendo que deseamos una tasa de exposición de 2.5 m.R/h a 1 mt de la fuente.

Procediendo como en el caso anterior, tenemos:

$$X_p = X_0 e^{-\mu r} B(\mu r)$$

$$2.5 \text{ m.R/h} = (468260 \text{ m.R/h}) e^{-\mu r} B(\mu r)$$

$$B(\mu r) / e^{-\mu r} = 5.33 \times 10^{-6}$$

Del Cuadro N° 11, para el Tungsteno y 1.25 MeV obtenemos $[\mu/\delta]_w = 0.0544$

Donde, δ : Densidad del Tungsteno = 19.30 gr/m³

$$\text{Entonces: } \mu = (0.0544) (19.30) = 1.049$$

Ahora, buscamos un " μr " conveniente, de tal manera que obtengamos un $B(\mu r)/e^{\mu r} = 5.33 \times 10^{-6}$

Remitiéndonos al cuadro N^o 9 e interpolando, tenemos:

Para un $\mu r = 14$

$$B(\mu r) = 6.323, B(\mu r)/e^{\mu r} = 6.323/1202604 = 5.257 \times 10^{-6}$$

Como vemos es una buena aproximación

$$5.33 \times 10^{-6} \approx 5.257 \times 10^{-6}$$

Luego si $\mu r = 14$,

$$\text{Entonces } r = 14/1.049 = 13.33 \text{ cm}$$

Cálculo del Volumen del Cabezal

$$V = 4 \cdot \pi \cdot r^3 / 3$$

Cálculo del Peso del Cabezal

$$V = 4 (3.1416) (13.33)^3 / 3 = 9921.539 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso} = (19.3 \text{ gr/cm}^3) (9921.539 \text{ cm}^3) = 191.485 \text{ Kg}$$

Cálculo del Blindaje del Container (cabezal) Utilizando Uranio

Suponiendo que deseamos una tasa de exposición de 2.5 m.R/h a 1 mt de la fuente.

Procediendo como en los casos anteriores:

$$X_p = X_o e^{-\mu r} B(\mu r)$$

$$2.5 \text{ m.R/h} = (468260 \text{ m.R/h}) e^{-\mu r} B(\mu r)$$

$$B(\mu r)/e^{\mu r} = 5.33 \times 10^{-6}$$

Del Cuadro N^o 11, para el Uranio y 1.25 MeV, obtenemos $[\mu/\delta]_U = 0.0615$

Donde:

$$\delta : \text{Densidad del Uranio} = 18.9 \text{ gr/cm}^3$$

Entonces:

$$\mu = 0.0615 \times 18.90 = 1.16$$

Ahora, buscamos un μr conveniente, de tal manera que obtengamos un $B(\mu r)/e^{\mu r}=5.33 \times 10^{-6}$

Remitiéndonos al cuadro N^o 10 e interpolando tenemos:

Para un $\mu r = 14$

$$B(\mu r) = 3.923 \quad B(\mu r)/e^{\mu r} = 3.923/1202604 = 3.26 \times 10^{-6}$$

Como vemos es una buena aproximación, es decir:

$$5.33 \times 10^{-6} \approx 3.26 \times 10^{-6}$$

$$\text{Si } \mu r = 14, \text{ luego } r = 14/1.16 = 12.06 \text{ cm}$$

Cálculo del Volumen del Cabezal:

$$V = 4 \cdot \pi \cdot r^3/3$$

$$V = 4 (3.1416) (12.06)^3/3 = 7,347.35 \text{ cm}^3$$

Cálculo del Peso del Cabezal:

$$\text{Peso} = (18.9 \text{ gr/cm}^3) (7347.35 \text{ cm}^3) = 138.864 \text{ Kg}$$

Finalmente: El más liviano resulta ser el cabezal de Uranio, sin embargo por razones de costo se opta por otros materiales, básicamente por plomo.

Cuadro Nº 8										
Blindaje	Fuente Radiactiva.	Eo Mev	u.r							
			1	2	4	7	10	15	20	
P L O M O (Pb)	Tc - 99	0.14								
		0.5	1.24	1.42	1.69	2.00	2.27	2.65	2.73	
	Cs - 137	0.66	1.28	1.50	1.86	2.32	2.74	3.34	3.34	
	I - 131	0.72	1.30	1.54	1.94	2.44	2.92	3.60	4.1	
		1.00	1.37	1.69	2.26	3.02	3.74	4.81	5.86	
	Co - 60	1.25	1.38	1.71	2.33	3.18	4.02	5.33	6.55	
	Ra - 226	1.50	1.38	1.72	2.39	3.34	4.29	5.84	7.43	
	2.00	1.39	1.76	2.51	3.66	4.84	6.87	9.00		

Valores de B(μ r) esférico para fuentes puntuales

Cuadro Nº 9										
Blindaje	Fuente Radiactiva.	Eo Mev	u.r							
			1	2	4	7	10	15	20	
T W U O N L G F S R T A E N N I O O	Tc - 99	0.14								
		0.5	1.28	1.50	1.84	2.24	2.61	3.12	--	
	Cs - 137	0.66	1.32	1.58	2.02	2.57	3.10	3.88	--	
	I - 131	0.72	1.34	1.62	2.18	2.76	3.37	4.29	--	
		1.00	1.44	1.83	2.57	3.62	4.64	6.25	7.35	
	Co - 60	1.25	1.43	1.83	2.61	3.74	4.79	6.70	8.16	
	Ra - 226	1.50	1.43	1.84	2.64	3.85	4.95	7.16	8.97	
	2.00	1.42	1.85	2.72	4.09	5.27	8.07	10.6		

Valores de B(μ r) esférico para fuentes puntuales

Cuadro Nº 10										
Blindaje	Fuente Radiactiva.	Eo Mev	u.r							
			1	2	4	7	10	15	20	
U	Tc - 99	0.14								
R		0.5	1.17	1.30	1.48	1.67	1.85	2.08	--	
A	Cs - 137	0.66	1.21	1.38	1.64	1.94	2.21	2.60	--	
N	I - 131	0.72	1.23	1.41	1.70	2.04	2.35	2.79	--	
I		1.00	1.31	1.56	1.98	2.50	2.97	3.67	--	
O	Co - 60	1.25	1.32	1.58	2.04	2.65	3.22	4.09	--	
	Ra - 226	1.50	1.32	1.60	2.10	2.80	3.46	4.51	--	
(U)		2.00	1.33	1.64	2.23	3.09	3.95	5.36	6.48	

Valores de B(μ r) esférico para fuentes puntuales

Cuadro Nº 11						
MATERIAL	ENERGIA DE RAYOS GAMMA EN MeV					
	0.50	0.60	0.80	1.0	1.25	1.50
Aluminio	0.0840	0.0777	0.0683	0.0614	0.0548	0.0500
Cobre	0.0820	0.0751	0.0654	0.0585	0.0521	0.0476
Tungsteno	0.1250	0.1010	0.0763	0.0640	0.0544	0.0492
Plomo	0.1450	0.1140	0.0836	0.0684	0.0569	0.0512
Uranio	0.1760	0.1360	0.0952	0.0757	0.0615	0.0548
Aire	0.0868	0.0804	0.0706	0.0655	0.0567	0.0517
Agua	0.0966	0.0896	0.0786	0.0706	0.0630	0.0575
Concreto	0.0870	0.0804	0.0706	0.0635	0.0567	0.0517

Valores de Coeficientes de Atenuación Másica (μ/δ) para diferentes materiales en cm^2/gr .

CAPITULO 4

BLINDAJE ESTRUCTURAL

Para aplicar cabalmente los métodos de blindaje, debemos entender la manera de como la radiación X y gamma interactúan con la materia.

La energía puede disiparse por tres métodos principales que son: El efecto fotoeléctrico, El efecto Compton y la producción de pares; el mecanismo predominante dependerá de la radiación y del material de absorción.

Básicamente los elementos estructurales (pared, techo y piso) de los ambientes que alojan fuentes radiactivas están construidas de concreto armado mientras que las puertas, generalmente tienen revestimiento de plomo.

El objetivo en el presente capítulo es justamente calcular el blindaje estructural de los ambientes que conforman un Departamento de Radioterapia en donde se encuentran instalados las máquinas de cobalto 60 y esto como medida de protección contra las radiaciones ionizantes para el personal ocupacional y no ocupacionalmente expuesto.

PARAMETROS PARA EL CALCULO DE BLINDAJES DE RECINTOS DE IRRADIACION DESTINADOS A ALOJAR EQUIPOS DE TELETERAPIA.-

4.1.- Clasificación

Para precisar un problema de cálculo de blindajes es necesario definir un conjunto de parámetros que pueden clasificarse en dos categorías:

a) Parámetros del Equipo

Se incluyen en esta categoría a la energía de radiación del equipo, el tiempo efectivo de irradiación, la existencia o no de barrera de haz (beam stopper), la cuantía de la radiación de fuga, etc.

b) Parámetros del punto

El punto de interés o crítico, para el cual se debe determinar el espesor de blindaje necesario define una nueva serie de parámetros que son de función de la posición del punto con respecto al equipo de teleterapia, de la clasificación de las personas que trabajan en esa zona, del factor ocupacional, del factor de uso. (ver 4.2.2)

4.2.- Definiciones. Magnitudes y Unidades. Criterios Prácticos

4.2.1.- Parámetros del equipo

4.2.1.1. Energía (E)

Salvo que se indique expresamente lo contrario se entenderá que se trata de la energía máxima del espectro en consideración. Esto será válido tanto cuando se haga referencia a la energía del haz útil, como a la energía de la radiación de fuga y a la energía de la radiación dispersa (ver condiciones de irradiación).

a) Energía del haz útil (E_u)

En el caso de equipos de telegammaterapia esta información se obtiene del esquema de desintegración del radionucleído.

En el caso de máquinas aceleradoras de electrones esta información es suministrada por el proveedor del equipo, generalmente indicando la energía máxima.

b) Energía de la radiación de fuga (E_1) (Leakage radiation).

A los efectos del cálculo de blindaje se adopta como energía pico o máxima, de la radiación de fuga, el mismo valor que para el haz útil $E_1 = E_u$.

c) Energía de la radiación dispersa (E_s).

La radiación dispersa se origina básicamente en la interacción del haz útil con el paciente (también con la camilla, la barrera de haz y el blindaje).

El proceso básico de interacción que da lugar a radiación dispersa es el efecto Compton.

En el caso de interacción Compton la energía del fotón secundario depende del ángulo de dispersión. Su valor máximo se produce en direcciones cercanas a la del haz útil y su mínimo en la dirección opuesta (ángulo de

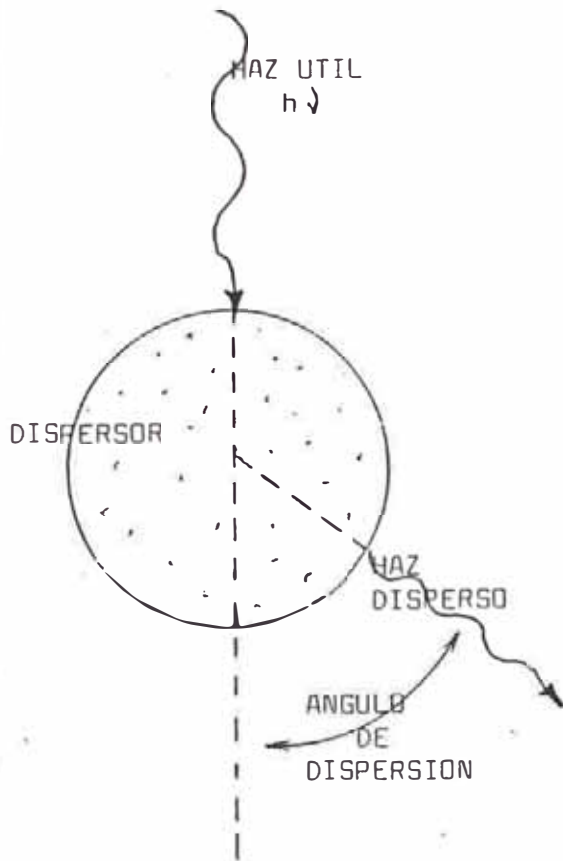


Figura No 2

dispersión 180°) Ver figura 2.

Las técnicas de operación de los equipos de teleterapia son tales que habitualmente las paredes están expuestas a radiación dispersa de direcciones diversas con respecto al haz primario.

Por ello es práctica habitual, a los efectos de cálculo de blindaje, considerar la energía correspondiente de la dispersión a 90°, aunque cabe destacar que debe analizarse en cada caso si existe una situación más desfavorable que ésta.

Para el caso de dispersión Compton a 90°, la relación entre energía del fotón incidente y del dispersado se indica en la tabla I, la cual se ha obtenido utilizando la expresión de Compton.

Puede observarse en la tabla I que la energía de la radiación dispersa debida a efecto Compton para ángulo de dispersión de 90° tiende a un valor máximo de $8,16 \cdot 10^{-14}$ J (0,51 MeV).

Donde J: Joule

Por lo tanto, si se considera la radiación dispersa de aniquilamiento y de Compton a 90° la energía en juego no excederá nunca de:

$$E_s(\max) \leq 8,16 \cdot 10^{-14} \text{ J (0,51 MeV)}$$

En la interacción del haz útil con el dispersor (basicamente el paciente) se produce también radiación dispersa por otro fenómeno. Se trata de un efecto tipo "cascada".

La interacción del haz útil con el dispersor pone en movimiento electrones, ya sea por efecto fotoeléctrico, Compton o formación de pares.

Estos electrones se "frenan" dentro del dispersor cediendo su energía por colisión y emitiendo radiación de frenamiento o Rx, la secuencia puede repetirse en el mismo dispersor.

TABLA I
ENERGIA DE FOTONES DISPERSADOS A 90°

ENERGIA FOTON INCIDENTE		ENERGIA FOTON DISPERSADO	
Joule (J)	MeV	Joule (J)	MeV
$8,0 \cdot 10^{-14}$	0,500	$4,032 \cdot 10^{-14}$	0,252
$1,6 \cdot 10^{-13}$	1,000	$5,401 \cdot 10^{-14}$	0,338
$2,0 \cdot 10^{-13}$	1,250	$5,792 \cdot 10^{-14}$	0,362
$3,2 \cdot 10^{-13}$	2,000	$6,496 \cdot 10^{-14}$	0,406
$6,4 \cdot 10^{-13}$	4,000	$7,232 \cdot 10^{-14}$	0,452
$9,6 \cdot 10^{-13}$	6,000	$7,52 \cdot 10^{-14}$	0,470
$1,6 \cdot 10^{-12}$	10,000	$7,76 \cdot 10^{-14}$	0,485
$3,2 \cdot 10^{-12}$	20,000	$7,952 \cdot 10^{-14}$	0,497
$4,8 \cdot 10^{-12}$	30,000	$8,016 \cdot 10^{-14}$	0,501
$6,4 \cdot 10^{-12}$	40,000	$8,064 \cdot 10^{-14}$	0,504
$8,0 \cdot 10^{-12}$	50,000	$8,08 \cdot 10^{-14}$	0,505
$1,6 \cdot 10^{-11}$	100,000	$8,112 \cdot 10^{-14}$	0,507
∞	∞	$8,16 \cdot 10^{-14}$	0,510

Dado que no hay probabilidad cero de interacción fotoeléctrica, la energía máxima de radiación secundaria de frenamiento producida por el fenómeno "cascada" coincidiría con la energía máxima del haz útil, pero su espectro sería mucho menos "duro", es decir, que tendría una energía efectiva sensiblemente inferior a la del haz útil.

Cierta bibliografía /7/ sugiere no considerar este fenómeno para máquinas de menos de 10 MV y recomienda para máquinas de más de 10 MV, a los efectos de evaluar el blindaje necesario, que se adopte como energía efectiva la del espectro de fotones generados en el blanco que salen a 90° con respecto al haz de electrones incidentes.

En conclusión, se sugiere que se adopte $E_e \leq 8,16 \cdot 10^{-14}$ J (0,51 MeV) para todos los casos y siempre que no deban considerarse problemas de dispersión Compton en ángulos pequeños.

4.2.1.2. Tiempo Efectivo de Irradiación (t)

Es el tiempo durante el cual el equipo de teleterapia se encuentra efectivamente en irradiación. generalmente es una fracción reducida del tiempo total de operación de la instalación.

Se determina en base al tiempo promedio de irradiación por paciente y al número de pacientes. En cálculo de blindajes de recintos de irradiación para equipos de teleterapia, es habitual considerar el tiempo efectivo de irradiación en un período de una semana /5/.

Puede calcularse entonces t como:

$$t \left[\frac{\text{horas}}{\text{semana}} \right] = t \left[\frac{\text{minutos}}{\text{paciente}} \right] N \left[\frac{\text{pacientes}}{\text{día}} \right] n \left[\frac{\text{días hábiles}}{\text{semana}} \right] \frac{1}{60} \left[\frac{\text{horas}}{\text{minutos}} \right] \quad (1)$$

Donde:

t= Tiempo promedio de irradiación por paciente.

N= número de pacientes por día.

n= días hábiles de operación por semana.

Los autores han encontrado que los tiempos efectivos de irradiación, y por consiguiente la carga de trabajo, son sensiblemente superiores a los recomendados en alguna bibliografía. Esto parece deberse a que con 70 equipos de telegammaterapia y cuatro aceleradores en operación se debe exigir, en general, más a las máquinas para cubrir la demanda de tratamiento.

Esta situación parece ser común en latinoamérica y por ello, más adelante, se recomienda el uso de valores de carga de trabajo superiores a los sugeridos en la bibliografía /6/ y /7/.

4.2.1.3. Rendimiento (r)

Es la tasa de dosis absorbida medida en la zona central del haz útil a una distancia unitaria de la fuente o blanco.

A los efectos del presente trabajo se expresará el rendimiento como la tasa de dosis absorbida a una distancia de 1 metro de la fuente o blanco.

Las unidades serán entonces:

$$r \left[\frac{\text{Gy.m}^2}{\text{h}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rad.m}^2}{\text{h}} \right]$$

Donde la unidad m² en el numerador indica que es válida la ley inversa del cuadrado de la distancia.

Para obtener la tasa de dosis absorbida, debida al haz útil, a cualquier distancia de la fuente o blanco debe dividirse el rendimiento por el cuadrado de la distancia considerada.

4.2.1.4. Carga de Trabajo del Equipo (W)

A efectos de determinar espesores de blindaje es conveniente combinar el rendimiento del equipo y el tiempo efectivo de irradiación en un nuevo parámetro llamado carga de trabajo. A éste se le define como el producto del rendimiento por el tiempo efectivo de irradiación.

$$W = r \cdot t \quad (2)$$

Con las unidades indicadas para "r" y "t" la carga de trabajo (W) se expresaría en:

$$\left[\frac{\text{Gy.m}^2}{\text{semana}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rad.m}^2}{\text{semana}} \right]$$

A los efectos de la determinación de espesores los autores sugieren emplear los valores de W dados en la Tabla II.

TABLA II

Tipo de equipo	Carga de trabajo (W)	
	$\left[\frac{\text{rad.m}^2}{\text{sem}} \right]$	$\left[\frac{\text{Gy.m}^2}{\text{sem}} \right]$
<u>Telegammaterapia:</u>		
Radio de giro= 0,60 m	100.000	1.000
Radio de giro= 0,80 m	150.000	1.500
Radio de giro= 1,0 m	150.000	1.500
<u>Aceleradores:</u>		
Hasta 6 MV	150.000	1.500
Más de 6 MV, se debe calcular en cada caso considerando 80 pacientes diarios y 5 días de irradiación por semana.		

4.2.1.5. Carga de Trabajo "Por Irradiación de Fuga (W₁).

Cuando el equipo está irradiando además del haz colimado de radiación, que conforma el llamado haz útil, hay radiación que proviene de la fuente o blanco y que fuga a través del blindaje del alojamiento (cabezal del equipo).

En direcciones distintas del haz útil se tiene entonces radiación fotónica cuya intensidad, por diseño, no excede de una cierta fracción del haz útil (f₁).

La carga de trabajo por radiación de fuga se define entonces como:

$$W_1 = f_1 \cdot W. \quad (3)$$

Las recomendaciones internacionales /1/ establecen como condición de diseño que la intensidad máxima de la radiación de fuga, con el equipo irradiando, no debe ser mayor que 0,001 del haz de util ($f_1 = 1/1000$).

Por lo expuesto, y teniendo en cuenta lo dicho sobre carga de trabajo (W) se puede adoptar, a los efectos de dimensionar blindajes que:

$$W_1 \left[\frac{\text{Gy.m}^2}{\text{semana}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rad.m}^2}{\text{semana}} \right] = 0,001 \cdot W \left[\frac{\text{GY.m}^2}{\text{semana}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rad.m}^2}{\text{semana}} \right] \quad (4)$$

Nótese que en definitiva la carga de trabajo por radiación de fuga (W_1) es la máxima tasa de dosis semanal a un metro de la fuente o blanco en direcciones distintas a la del haz útil.

4.2.1.6. Carga de Trabajo Por Radiación Dispersa (W_s).

En 4.2.1.1.- se trataron los fenómenos que daban lugar a radiación dispersa así como también sobre las energías en juego teniendo en cuenta las características de la máquina (energía del haz útil, rendimiento del mismo y tamaño de campo) y del dispersor (paciente).

La tabla III obtenida de la referencia /2/ indica la tasa de dosis por radiación dispersa, a 1 metro del dispersor, para un tamaño de campo de 400 cm² como un porcentaje del rendimiento del haz útil en función del ángulo de dispersión. Las referencias /7/ y /8/ permiten obtener esta estimación en función del albedo correspondiente.

TABLA III

Angulo de Dispersión	60 Co	6 MV	Angulo de Dispersión	60 Co	6 Mv
15°	-	0,65	90°	0,07	0,04
30°	-	0,30	120°	0,05	0,03
45°	0,18	0,14	135°	0,04	0,03
60°	0,14	0,08	150°	-	-

Los autores han encontrado una congruencia aceptable entre los valores de la Tabla III y los resultados de cálculos realizados con los modelos indicados en las referencias /7/ y /8/.

Se hace constar que si bien hay equipos con tamaño de campo hasta 1600 cm² la experiencia muestra que un valor de 400 cm² es representativo de situaciones de promedio. De cualquier forma, si se desea considerar el tamaño de campo máximo del equipo, se pueden corregir los valores de la Tabla III para la superficie deseada considerando que dichos valores son directamente proporcionales a las áreas de juego.

Es conveniente indicar que para estimar la intensidad de irradiación dispersa utilizando la Tabla III, deben referirse el área de campo y el rendimiento del equipo a la misma distancia. Así, si se especifica el área de campo a la distancia habitual de tratamiento o radio de giro del equipo (R) el rendimiento debe determinarse a esa distancia (y por consiguiente el W).

En resumen, usando la Tabla III será:

$$W_{\theta} \left[\frac{\text{Gy. m}^2}{\text{semana}} \right] = W \text{ corregido} \left[\frac{\text{Gy. m}^2}{\text{semana}} \right] \cdot \frac{P}{100} \cdot \frac{A_{\text{max}}}{400} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}^2} \right]$$

Donde:
 $W \text{ corregido} = W \cdot \frac{1[m^2]}{R^2[m^2]}$ R= Distancia habitual de tratamiento.

W= Carga de trabajo del haz útil.

p= Porcentaje obtenido de la Tabla III para el ángulo de dispersión considerado, generalmente 90° (valor para un área de 400 cm²).

$A_{m\acute{a}x}$ = Area del campo máximo del equipo a la distancia del tratamiento.

Nótese que en definitiva W_s es la tasa de dosis absorbida semanal a una distancia de un metro del dispersor en la dirección (ángulo) de interés.

4.2.1.7. Barrera De Haz (Beam Stopper).

Los equipos de baja energía suelen venir provistos de un dispositivo llamado barrera de haz, escudo o contrapantalla (Beam Stopper) que gira solidario al equipo y actúa como blindaje del haz útil (ver figura 3).

En esas condiciones, salvo que alguna técnica particular de tratamiento exija retirar este dispositivo siempre que el equipo lo permita, nunca incidirá el haz útil sobre ninguna superficie blindante del recinto.

Si dicha barrera de haz ha sido dimensionada como blindaje, de acuerdo a las normas sobre el tema, la fracción del haz útil transmitida no excederá de 0,001 del haz útil. Condición que permita tratarla en forma análoga a la radiación de fuga del cabezal del equipo.

Si bien no se trata de un parámetro propiamente dicho, es determinante para el diseño y cálculo del blindaje del recinto de irradiación y por ello merece ser incluido dentro de la categoría de parámetros del equipo.

4.2.2.- Parámetros del Punto.

Como se ha indicado en 4.1.- dentro de esta clase se incluyen a aquellos parámetros que son función de la posición relativa del punto de interés con respecto al equipo y de las características de ocupación de dicha zona.

4.2.2.1. Distancia Punto-Fuente.

Es la distancia desde el punto de interés a la fuente de radiación y de acuerdo a lo visto, se tiene 3 casos:

d_u [m]: Distancia desde el punto de interés a la fuente radiactiva o blanco cuando el haz útil irradia hacia el punto de interés y no se considera la barrera de haz (not including beam stopper, suponer la figura 3 sin barrera de haz).

d_1 [m]: Distancia desde el punto de interés a la fuente radiactiva o blanco medida en la dirección definida por el punto de interés y la posición del cabezal del equipo, (ver figura 3).

d_e [m]: Distancia desde el punto de interés al centro primario de dispersión (generalmente el paciente) (ver figura 3).

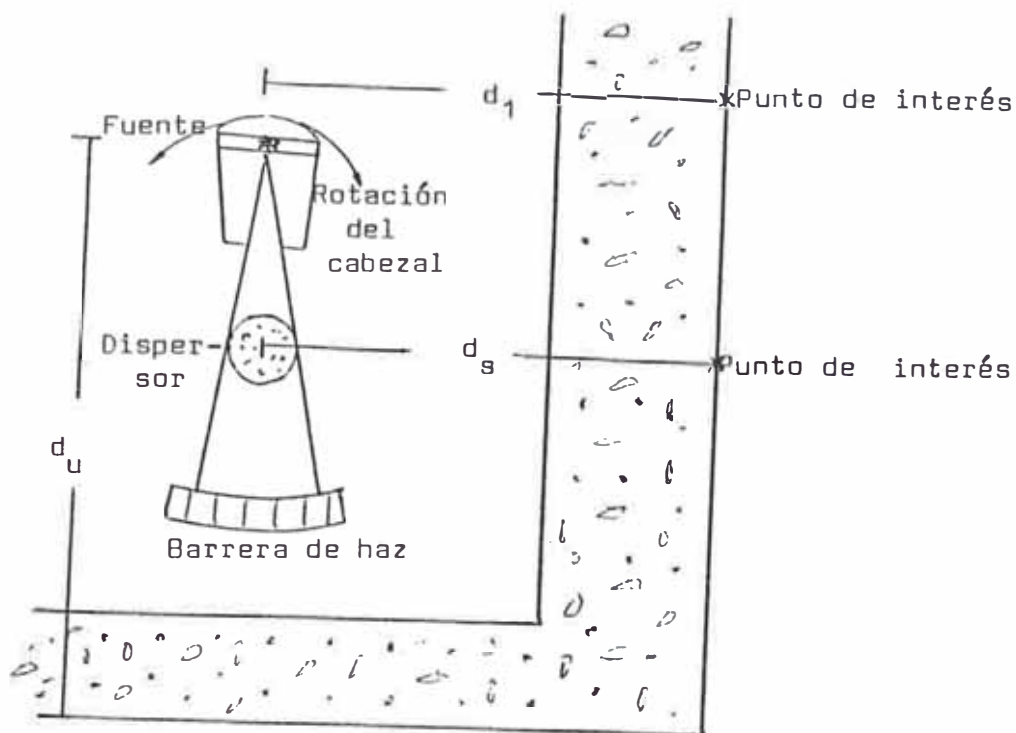


Figura 3

4.2.2.2. Factor de uso (U)

Es la fracción del tiempo efectivo de irradiación durante la cual el haz de radiación está dirigido hacia el punto de interés.

En la práctica tendremos tres casos:

U_u : Factor del uso del haz útil. Para equipos con barrera de haz toma generalmente el valor cero. Para equipos sin barrera de haz toma distintos valores para piso, paredes laterales y techo. Los valores recomendados en la referencia /6/ se indican en la tabla IV.

Tabla IV

Piso	Paredes Laterales	Techo
1	1/4	1/4

U_i : Factor de uso de radiación de fuga. Tomará siempre que el equipo esté irradiando habrá radiación de fuga en todas las direcciones (en equipos con barrera de haz habrá radiación de fuga incluso en la dirección del haz útil).

U_e : Factor de uso de radiación dispersa. También tomará siempre el valor 1 (uno) puesto que el dispersor, aunque en forma no isótropa, radia en todas las direcciones.

4.2.2.3. Factor Ocupacional (T).

Es la fracción del tiempo de irradiación durante la cual un individuo permanece en la zona (punto) de interés.

En el uso del factor ocupacional debe distinguirse dos casos:

- El de las personas expuestas en el curso de su trabajo (exposición ocupacional), y
- El de miembros individuales del público.

En el primer caso salvo que se ponderen, con mucho cuidado, en conjunto los factores ocupacionales con los límites de referencia para diseño (ver 4.2.2.4.) se recomienda que siempre se tome el valor 1.

En el segundo caso, dado que puede asumirse que el resto del tiempo el individuo miembro del público no va a estar expuesto a radiaciones, al menos en forma significativa, se pueden utilizar factores iguales o inferiores a 1, según corresponda (ver 4.2.2.4.).

El resumen, del uso de los factores ocupacionales se dan en la Tabla V.

TABLA V

Zona de Interés	Factor Ocupacional (T)
Medianera, consultorios, cuarto de los niños (nursery), lugar de juego de niños.	1
Pasillos, cuartos de descanso, ascensores que emplean ascensorista, playa de estacionamiento.	$\frac{1}{4}$
Salas de espera, baños, ascensores, áreas externas recorridas por peatones o tráfico vehicular.	$\frac{1}{16}$

Se sugiere además no adoptar valores de T inferiores a 1/16 y en el caso de que un muro del recinto de irradiación se encuentra próximo a una línea divisoria de dominio (medianera), es decir a una parcela que no pertenece a la institución propietaria de la instalación, suponer siempre factor ocupacional 1.

4.2.2.4. Nivel de Referencia de Diseño (P).

Es el valor de tasa de dosis equivalente (dosis equivalente/tiempo) que se ha establecido para un individuo que ocupará la zona de interés.

El nivel de referencia para el diseño puede establecerse como resultado de un estudio de optimización de la protección radiológica/13/ en una instalación "media" típica como la indicada en la figura 5, y debe

además contemplar que ningún individuo debe exceder el límite de dosis recomendado /3/.

Si no se efectúa una optimización de la protección radiológica se sugiere los siguientes valores:

a) Exposición ocupacional: $P = 1.0 \frac{\text{mSv}}{\text{semana}} \text{ ó } 100 \frac{\text{mrem}}{\text{semana}}$

b) Individuos del público: $P = 0.10 \frac{\text{mSv}}{\text{semana}} \text{ ó } 10 \frac{\text{mrem}}{\text{semana}}$

El valor de 1.0 mSv implica una dosis semana

equivalente anual máxima de 50 mSv (5.0rem) y éste se sugiere para que el personal se encuadre en la categoría A/3/, debido a que en general no es posible garantizar un programa completo de monitoreo y supervisión médica para el personal de operación de equipos de teleterapia.

El valor de 0.10 mSv ó (10 mrem) semana semana

implica una dosis equivalente anual máxima de 5mSv (500 mRem) para miembros individuales del público y se sugiere en base a la siguiente consideración:

- * Que debe dejarse un margen razonable con respecto al límite de dosis equivalente recomendado, pues puede eventualmente existir contribución de otras fuentes de radiación, y que en cierta forma lo sugiere la Comisión Internacional de Protección Radiológica /3/.

4.3.- Análisis Crítico. Importancia Relativa de los Distintos Parámetros.

Ciertos parámetros, que se considerarán básicos, requerirán una cuidadosa determinación mientras que otros, que se consideran generales, admiten un margen de diferencia notable sin introducir modificaciones sustanciales en los espesores del blindaje.

4.3.1.- **Parámetros Básicos**

4.3.1.1. **Energía ($E_u; E_f; E_d$).**

Dado que la atenuación de la radiación sigue una función exponencial negativa donde la energía, en juego afecta al exponente de esta función, errores en la determinación de las energías, sea para el haz útil, radiación de fuga o radiación dispersa, conducirán a diferencias significativas en la determinación de los espesores de blindaje necesarios.

Se recomienda entonces una cuidadosa determinación de las energías que se deben considerar en el caso de haz útil, fuga o radiación dispersa para evitar errores importantes en defecto o exceso en la determinación de los espesores de blindaje.

4.3.1.2. **Nivel de Referencia de Diseño (P).**

Ya sea que se adopten los valores de P sugeridos en 4.2.2.4.- o que se efectúen estudios de optimización de la protección radiológica a los fines de definir dichos valores, las diferencias en juego (un orden de magnitud) hacen sumamente recomendable seleccionar cuidadosamente los valores de P apropiados a cada punto de interés.

4.3.1.3. **Existencia de Barrera de Haz (with beam stopper).**

La existencia o no de barrera de haz condiciona en forma significativa el diseño, puesto que si dicha barrera existe, nunca el haz útil llegará a los blindajes, con la consiguiente e importante reducción de espesores en las zonas que el mismo podría irradiar.

Por ello, debe precisarse con claridad si el equipo contará o no con este dispositivo y es además conveniente que se especifique, en el caso de equipos con barrera

retráctil, si se debe preveer un blindaje como para que se pueda irradiar sin barrera.

4.3.2.- Parámetros Generales.

Dentro de esta categoría se ubican la carga de trabajo (W), el factor de uso del haz útil (U_u), el factor ocupacional (T) y la distancia desde el punto de interés a la fuente de radiación (d_u , d_i ó d_e).

En los primeros tres casos una variación del 100% (factor 2) sólo implica una modificación del espesor de blindaje en un hemiespesor. Esto hace que se pueda actuar en forma razonablemente conservadora con estos parámetros sin sobreestimar el blindaje en forma significativa.

El caso de distancia punto-fuente es muy particular dado que trabajando sobre esquemas en escala y ubicando el equipo en el recinto de irradiación es difícil que se cometan errores de mas de un 10%. Téngase en cuenta que deben de cometerse errores del orden del 40% en la determinación de la distancia para tener diferencias del orden de un hemiespesor.

CAPITULO 5

CONDICIONES DE IRRADIACION A LAS CUALES PUEDE ESTAR SOMETIDO UN BLINDAJE

Los blindajes de un recinto de irradiación destinado a alojar un equipo de teleterapia están sometidos alternativa o simultáneamente a alguna de las condiciones de irradiación siguientes:

- a) **radiación directa** debida a la fracción del haz útil que atraviesa al paciente (cuando no se considera la barrera de haz).
- b) **radiación de fuga** proveniente de alojamiento de la fuente o blanco que atraviesa el blindaje y sistema de colimación del cabezal.
- c) **radiación dispersa** producida como consecuencia de la interacción del haz útil con el paciente, camilla y barrera de haz de blindaje.

La figura 4 ilustra los tres casos descritos

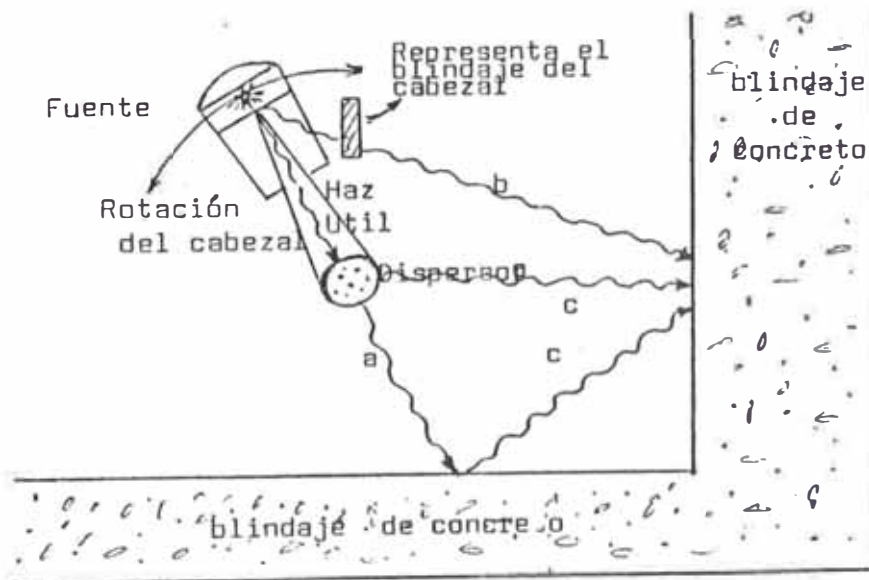


Figura 4.- a), b) y c) corresponden a la descripción realizada en el capítulo 5.

5.1.- Radiación Directa.

En equipos de teleterapia sin barrera de haz, el haz útil incide directamente sobre los blindajes barriendo en las distintas posiciones de tratamiento una franja de los mismos en piso, paredes laterales y techo. Por supuesto que la misma franja está recibiendo también radiación dispersa y radiación de fuga.

Como la radiación dispersa tiene una energía e intensidad muy inferior al haz útil (salvo para dispersión Compton en ángulos pequeños y la radiación de fuga, si bien se ha asumido que tiene una energía igual a la del haz útil (4.2.1.1.-b) su intensidad es 1/1000 del mismo (4.2.1.4.-).

Es evidente que el espesor de blindaje en la zona de incidencia de haz útil estará definido por el mismo y no será necesario tener en cuenta la contribución adicional por radiación fuga y dispersa.

5.2.- Radiación de Fuga.

Todos los blindajes del recinto de irradiación reciben radiación de fuga. La energía de dicha radiación se ha sugerido que se tome como igual a la haz útil aunque se ha hecho la observación de que esto no es estrictamente cierto (4.2.1.1.-b).

En toda la zona barrida por radiación de fuga en las direcciones del haz útil (equipos con barreras de haz) y cercana a ella esta sugerencia es correcta. También es correcta esta suposición en el caso de equipos de telegammaterapia para cualquier dirección.

5.3.- Radiación Dispersa.

Todos los blindajes están sometidos a irradiación por radiación dispersa producida en la interacción del haz útil con el paciente, camilla, y barrera de haz o blindaje. En base a las consideraciones hecha en (4.2.1.1.-c) (4.2.1.5.-) y (4.3.1.1.-) puede adelantarse que el blindaje de la radiación de fuga, con la hipótesis $E_1 = E_u$ y $W_1 = 1/1000$. W atenuará suficientemente la radiación dispersa como para que no sea necesario blindaje adicional. Sin embargo se reitera que puede ser necesario estudiar el problema de dispersión Compton en ángulos menores de 90° .

CAPITULO 6

METODOLOGIAS DE CALCULO PARA LA DETERMINACION DE ESPESORES.

6.1.- Equipo de Teleterapia sin Barrera de Haz (not including beam stopper).

6.1.1.- Blindaje del Haz Util

En este caso debe tenerse en cuenta que la irradiación directa del haz útil es la que determina los espesores de los blindajes del recinto de irradiación en la zona afectada por el mismo.

La expresión de cálculo es:

$$K = \frac{P \cdot d_u^2}{W \cdot U_u \cdot T \cdot Q} \quad (6)$$

Donde: K: Relación de Transmisión para el Haz útil.

$$P \left[\frac{\text{Sv}}{\text{semana}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rem}}{\text{semana}} \right] = \text{Nivel de Referencia de Diseño (ver 4.1.2.4)}$$

d_u [m²] - Distancia desde el punto de interés a la fuente radiactiva o blanco (ver 4.2.2.1.).

$$W \left[\frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{semana}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rad} \cdot \text{m}^2}{\text{semana}} \right] = \text{Carga de trabajo del equipo (ver 4.2.1.4.)}$$

U_u = Factor de usos del haz útil (4.2.2.2.)

T = Factor ocupacional (ver 4.2.2.3.)

Q = Factor de Calidad = 1

En una instalación destinada alojar un equipo de teleterapia, sin barrera de haz, la zona afectada por el haz útil debe llevar un espesor de blindaje mayor que el de la zona sin afectación.

Para determinar la zona afectada se sugiere trabajar sobre esquemas en escala y observar las dimensiones de la proyección del haz útil en la zona de interés a fin de adicionarle 30 cm. a cada lado del campo ó 10°(ver fig.5).

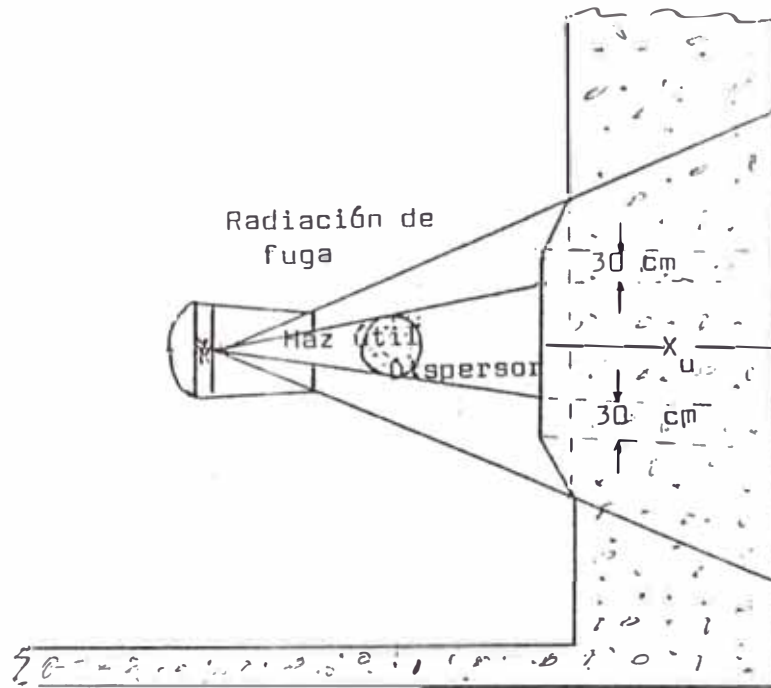


Figura Nro. 5

Observando la figura 5 vemos que el espesor x_u necesario para blindaje del haz útil se determina:

- 1º) Calculando k con la expresión (6), y
- 2º) Utilizando las curvas de transmisión (k) que corresponden a la energía del haz útil de acuerdo a lo indicado en 4.2.1.1.-a) (figuras 4 a 6 del anexo), /2/, /4/, /5/, /9/ y /12/.

Se recomienda que no deben diseñarse discontinuidades bruscas en el blindaje como las indicadas con líneas de puntos en la fig. 5.

La zona donde no llega haz útil se verá afectada en forma simultánea por las radiaciones de fuga y dispersa. Esto se trata en los puntos 6.1.2.- y 6.1.3.-

6.1.2.- Blindaje de la Radiación de Fuga.

La expresión de cálculo es:

$$K_1 = k = \frac{P_1 \cdot d_1^2}{W_1 \cdot U_1 \cdot T \cdot Q} \quad (7)$$

Donde: K_1 : Relación de Transmisión de la Radiación de Fuga

d_1 [m] = Distancia desde el punto de interés a la fuente radiactiva o blanco (ver 4.2.2.1.-).

W_1 $\left[\frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{semana}} \right]$ ó $\left[\frac{\text{rad} \cdot \text{m}^2}{\text{semana}} \right]$ = Carga de trabajo por radiación de fuga (ver 4.2.1.5)

P_1 $\left[\frac{\text{Sv}}{\text{semana}} \right]$ ó $\left[\frac{\text{rem}}{\text{semana}} \right]$ = Dosis equivalente que recibiría una persona en el punto de interés por radiación de fuga.

U_1 = Factor de uso de radiación de fuga (ver 4.2.2.2.-).

T y Q son los mismos parámetros que son los de la expresión (6).

El espesor x_1 , necesario para blindar la radiación de fuga, se determina de la siguiente forma:

1º) calculando k_1 con la expresión (7), y

2º) utilizando las curvas de transmisión (k) que corresponden a la energía de la radiación de fuga de acuerdo a lo indicado en 4.2.1.1.-b) (figuras 4 a 6 del anexo), /2/, /4/, /5/, /9/ y /12/.

Dijimos anteriormente que las zonas de interés donde no llega el haz útil estarán sometidas simultáneamente a las radiaciones de fuga y dispersa. Si bien esto es cierto, nuestra experiencia nos indica que la radiación de fuga es la principal determinante de los espesores de los blindajes del recinto de irradiación.

Esto se debe fundamentalmente a que la energía de la radiación de fuga (E_1) es significativamente superior a la energía de la radiación dispersa (E_d), de acuerdo a lo indicado en 4.2.1.1.-b y 1.2.1.1.-c.

6.1.3.- Blindaje de la Radiación Dispersa.

la expresión de cálculo es:

$$K_B = \frac{P_e \cdot D_e^2}{W_e \cdot U_e \cdot T \cdot Q} \quad (8)$$

Donde:

K_e = Relación de transmisión para radiación dispersa.

$P_e \left[\frac{Sv}{\text{semana}} \right]$ ó $\left[\frac{\text{rad} \cdot \text{m}^2}{\text{semana}} \right]$ = Dosis equivalente que recibiría una persona por semana en el punto de interés debido a radiación dispersa.

d_e [m] = Distancia desde el punto de interés al centro primario de dispersión (generalmente el paciente, ver 4.2.2.1.-)

$W_e \left[\frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{semana}} \right]$ ó $\left[\frac{\text{rad} \cdot \text{m}^2}{\text{semana}} \right]$ = Carga de trabajo por radiación dispersa (ver 4.2.1.6.-).

U_e = Factor de uso de radiación dispersa (ver 4.2.2.2.-).

T y Q son los mismos parámetros que los de la expresión (6).

El espesor x_e , necesario para blindar la radiación dispersa, se determina:

- 1º) Calculando k_e con la expresión (8), y
- 2º) Utilizando las curvas de relación de transmisión (K) que corresponden a la energía de la radiación dispersa de acuerdo a lo indicado en 4.2.1.1.-c). /2/, /4/, /5/, /9/ y /12/.

6.2.- Equipos de Teleterapia con Barrera de Haz (with beam stopper).

Los blindajes del recinto de irradiación que albergan este tipo de equipos están sometidos simultáneamente a la radiación de fuga y a la radiación dispersa, producida por la interacción del haz útil con el paciente y/o la barrera de haz.

6.2.1.- Blindaje de la Radiación de Fuga.

El espesor X_1 , necesario para blindar la radiación de fuga, se determina procediendo igual que en 6.1.2.

6.2.2.- Blindaje de la Radiación Dispersa.

El espesor de blindaje, necesario para blindar la radiación dispersa, se determina procediendo igual que en 6.1.3.

6.2.3.- Blindaje Eventual del Haz Útil en una dirección determinada para un bajo valor del factor de uso.

Dado que existen equipos de teleterapia con barrera de haz de (with beam stopper) retráctil, se debe contemplar la posibilidad de efectuar algunas técnicas particulares de tratamiento con el haz útil orientado en una dirección determinada, sin la protección de la barrera de haz.

En este caso debe adoptarse el factor de uso (U_u) que se considere adecuado, colocando además los enclavamientos necesarios que impidan irradiar con el haz primario en otras direcciones que la considera.

El espesor de blindaje se determina procediendo igual que en 6.1.1.

$$P_a + P_1 = P \quad (11)$$

6.3.- Verificación de la Eficiencia del Blindaje.

A los efectos de verificar el blindaje, una vez contruido el recinto de irradiación, se deben comparar los valores medidos de la tasa de dosis equivalente en las zonas de interés con los valores calculados para:

a) El haz útil.

$$H = k \cdot \frac{W \cdot Q}{d_u^2 \cdot t} \quad (12)$$

donde :

$$H \left[\frac{\text{Sv}}{\text{hora}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rem}}{\text{hora}} \right] = \text{Tasa de dosis equivalente en el punto de interés debida a la radiación del haz útil.}$$

$$t \left[\frac{\text{horas}}{\text{semana}} \right] = \text{Tiempo efectivo de irradiación semanal (ver 4.2.1.2.-)}$$

k = Factor de transmisión que se obtiene a partir del espesor de blindaje calculado.

W; Q y d₁ son parámetros que fueran definidos anteriormente.

b) La radiación de fuga.

$$H_1 = k_1 \cdot \frac{W_1 \cdot Q}{d_1^2 \cdot t} \quad (13)$$

donde :

$$H_1 \left[\frac{\text{Sv}}{\text{hora}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rem}}{\text{hora}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rem}}{\text{hora}} \right] = \text{Tasa de dosis equivalente en el punto de interés debida a la radiación de fuga.}$$

K₁ = K = Factor de transmisión que se obtiene a partir del espesor de blindaje calculado.

W₁; Q; d₁ y t son parámetros que fueran definidos anteriormente.

c) La radiación dispersa.

$$H_s = K_s \cdot \frac{W_s \cdot Q}{d_s^2 \cdot T} \quad (14)$$

donde :

$$H_s \left[\frac{\text{Sv}}{\text{hora}} \right] \text{ ó } \left[\frac{\text{rem}}{\text{hora}} \right] = \text{Tasa de dosis equivalente en el punto de interés debida a la radiación dispersa.}$$

K_s = Factor de transmisión que se obtiene a partir del espesor de blindaje calculado.

W_s; Q; d_s y t son parámetros que fueran definidos anteriormente.

CAPITULO 7

PROBLEMAS DE DISEÑO

7.1.- Instalación Típica.

En la Figura Nº 6 se muestra una instalación típica. En ella se observa un equipo de teleterapia ubicado contra el blindaje posterior (A) del recinto de irradiación.

Si las necesidades lo exigen pueden utilizarse otras alternativas para ubicar al equipo dentro del recinto; por ejemplo, contra el blindaje (D) /6/, /8/ ó en diagonal contra el ángulo formado por los blindajes (A) - (B).

Sin embargo nuestra experiencia nos indica que la ubicación del equipo, que se muestra en figura 6, es la más recomendable debido a que no habrá fracción del haz útil ni dispersión Compton de bajo ángulo que pueda llegar a la puerta atravesando el blindaje del laberinto.

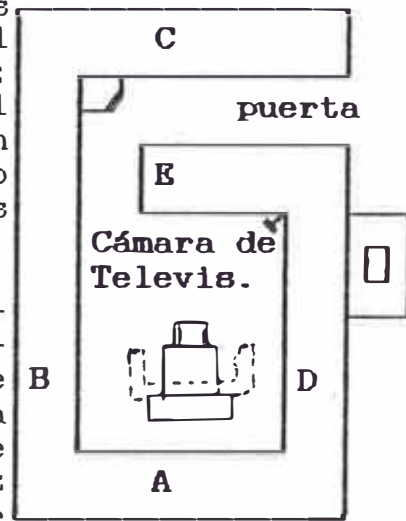


Figura Nº 6
Instal. Típica.

El blindaje (E) del laberinto debe diseñarse con el objeto de asegurar que :

- la radiación dispersa que llegue a la puerta haya sufrido dos interacciones como mínimo.
- la cuantía de la radiación dispersa presente en la puerta sea mínima.
- La contribución de la radiación proveniente del equipo de teleterapia o de la primera dispersión a través del espesor del blindaje del laberinto no exija blindaje en la puerta.

De lo indicado en a) puede asumirse que la energía efectiva de la radiación electromagnética dispersada presente en la puerta será del orden de 0,25 MeV /8/. Esto ha sido verificado en instalaciones de teleterapia de 6 MV en Argentina.

La disminución de la cuantía de la radiación dispersada, mencionada en b), puede lograrse con una longitud adecuada del laberinto y una limitación en el área libre disponible entre los blindajes (E) y (B) (ver figura 6).

La condición c) implica que el blindaje de puerta sólo deberá atenuar la radiación dispersa que llega a la misma por el laberinto.

Las referencias /7/ y /8/ proveen expresiones de cálculo y gráficos auxiliares que permiten estimar la tasa de dosis en la puerta.

Como valores prácticos, para el blindaje de la puerta de recintos de irradiación con laberintos bien diseñados, se sugieren los indicados en la Tabla V.

TABLA V
BLINDAJE DE LA PUERTA
DEL RECINTO DE IRRADIACION

Equipo	Espesor de Blindaje Referencial
Telegammaterapia	3 mm de plomo, ó espesor equivalente, en toda la superficie de la puerta
Teleterapia < 10 MV	5 mm de plomo, o espesor equivalente, en toda la superficie de la puerta
Teleterapia \geq 10 MV	10 mm de plomo, o espesor equivalente, en toda la superficie de la puerta

7.2.- Pasaje de Ductos.

Todo ducto que sea necesario efectuar en el blindaje debe ser ejecutado de manera de atravesar el mismo en forma laberíntica para minimizar la disminución del blindaje.

Si por razones técnicas el espesor efectivo del blindaje debe ser disminuído en más de un hemiespesor (ventilación), se adicionará una plancha de plomo (o espesor equivalente) en el sector afectado. El espesor de dicha plancha deberá compensar la disminución del blindaje y puede obtenerse de la Tabla VI conociendo el espesor de concreto perdido.

Los ductos deben estar ubicados de manera tal que solamente les llegue radiación dispersa y en lo posible no deben estar dirigidos hacia lugares con alto factor ocupacional. Se deben efectuar preferentemente por debajo del piso si no existe ocupación debajo del recinto de irradiación. Otra alternativa es efectuarlos por encima de la altura del cabezal y/o utilizar la existencia del laberinto.

TABLA VI
HEMIESPESORES (en cm.)

Fuente	Plomo $\delta=11.35\text{g/cm}^3$	Concreto $\delta=2.35\text{g/cm}^3$	Hierro $\delta=7.8\text{ g/cm}^3$
0.5 MV	0,36	3,6	
1,0 MV	0,79	4,4	
2,0 MV	1,25	6,4	
3,0 MV	1,45	7,4	
4,0 MV	1,6	8,8	2,7
6,0 MV	1,7	10,4	3,0
8,0 MV	1,7	11,4	3,1
10,0 MV	1,7	11,9	3,2
20,0 MV	1,7	13,7	3,25
30,0 MV	1,7	13,7	3,3
38,0 MV	1,7	13,7	3,3
60 Co	1,2	6,2	2,1

7.3.- Criterios para el Dimensionamiento del Blindaje del Techo y del Piso Cuando no Existe Ocupación.

En este caso deben tenerse en cuenta los locales de las edificaciones más cercanas al recinto de irradiación, tal como se muestra en la figura 7.

Cuando exista una línea divisoria de dominio o medianera, limitando con el recinto de irradiación, debe adoptarse factor ocupacional 1 (uno) independientemente de que exista o no construcción en dicho dominio.

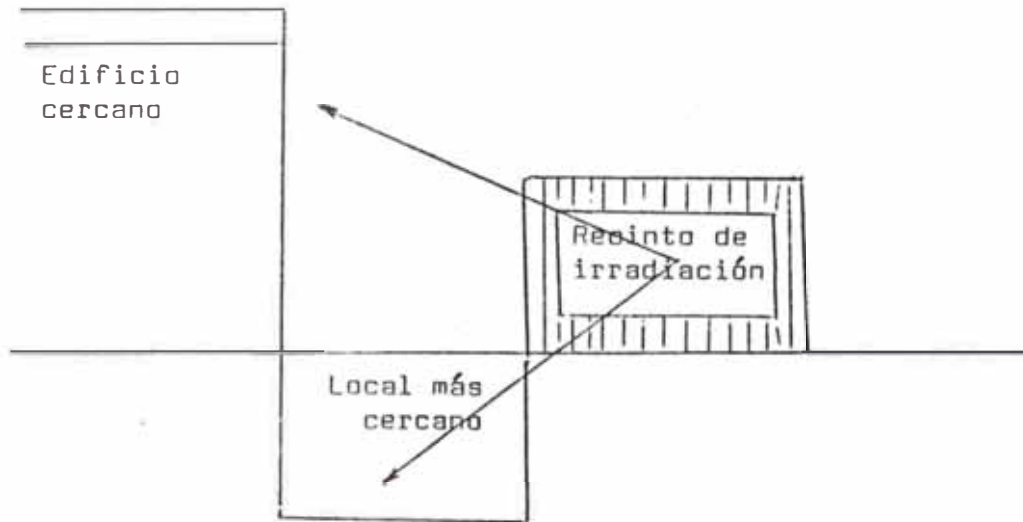


Figura Nº 7

7.4.- Efectos "Cielo" (Skyshine) y "Suelo".

Si sólo existen edificaciones cercanas, al recinto de irradiación, que están al mismo nivel y la que además tienen una altura aproximadamente igual o inferior que la del recinto, tal como se muestra en la figura 8, aparentemente sólo sería necesario dimensionar un techo para la protección climática.

Con éstas hipótesis seguramente las áreas adyacentes al recinto de irradiación estarán sometidos al efecto "cielo" como consecuencia de la radiación reflejada en la atmósfera que hace que la tasa de dosis aumente considerablemente.

Para solucionar este inconveniente debe dimensionarse el blindaje del techo con el espesor que contemple la eliminación de este efecto.

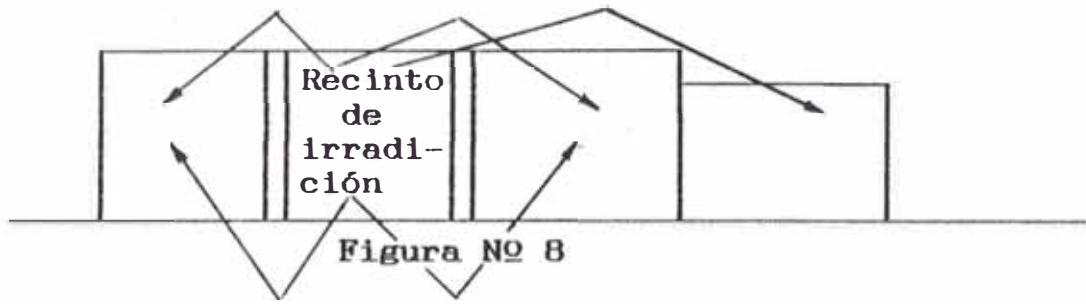
La referencia /7/ suministra información que permite efectuar el cálculo de la tasa de dosis equivalente, en los lugares adyacentes ocupados, debido a la contribución del efecto "cielo".

Un efecto similar se produce por dispersión en el suelo cuando no existe blindaje en el piso del recinto de irradiación.

Para determinar cuantitativamente el efecto "suelo" puede seguirse un razonamiento análogo, al realizado para el techo, suponiendo que se mantiene las hipótesis enunciadas.

Si las edificaciones cercanas al recinto de irradiación son de mayor altura que éste y/o poseen niveles inferiores como se muestra en la figura 8, deben dimensionarse los espesores del blindaje del techo y piso de acuerdo a lo indicado en 7.3

Efecto "Cielo" (skyshine)



CAPITULO 8

PROBLEMAS ESPECIALES DE EQUIPOS DE ALTA ENERGIA (> 10 MEV)

Los problemas especiales que se presentan en altas energías se deben a la posibilidad de reacciones fotonucleares (τ, n) con sus consecuencias asociadas de producción de neutrones y fenómenos de activación.

8.1.- Neutrones ; Importancia, Blindaje de la Puerta Contra Neutrones.

Dentro del rango de energía considerado en este trabajo (< 50 MV)

La importancia del fenómeno no hace necesario realizar consideraciones especiales sobre blindajes para neutrones. La única excepción está dada por el blindaje de la puerta del recinto de irradiación, donde la contribución a la tasa de dosis equivalentes debido a neutrones rápidos dispersos puede ser significativa /11/.

La bibliografía /7/ y /8/ permite realizar estimaciones de la tasa de dosis equivalente en la puerta para poder determinar el espesor del blindaje necesario para neutrones.

8.2.- Activación del Aire y de Aerosoles. Producción de Gases Tóxicos Ventilaciones.

La activación de aire debería ser considerada a partir del valor de la energía del equipo de teleterapia que supere el valor umbral de $1,688 \cdot 10^{-12} \text{J}$ (10,55 MeV) necesario para la reacción $^{14}\text{N}(n, \tau) \rightarrow ^{15}\text{N}$

$$T_{1/2} = 9,96 \text{ minutos } \Gamma = 0.59 \left[\frac{R-m^2}{h-Ci} \right]$$

La información disponible indica que no se han encontrado consideraciones significativas en instalaciones de teleterapia de alta energía /8/. Sin embargo, si no existe un número de renovaciones de aire aceptables debería analizarse en detalle este problema. Pueden utilizarse los modelos indicados en /7/, /8/, /12/.

En instalaciones de las características como las que se analizan en este trabajo, la componente de dosis equivalente debida a la activación de aerosoles y polvo aéreo puede considerarse despreciable.

No obstante, si después de un análisis pormenorizado, éstos resultaran ser un problema, se recomienda limpiar por vía húmeda, con suficiente frecuencia, todas las superficies horizontales dentro del recinto de irradiación.

La producción de gases tóxicos ocurre principalmente por una transformación química que se produce como consecuencia de la dosis integral de volumen de aire irradiado por el haz útil.

Debido a que la energía media impartida al volumen del aire resulta ser mucho mayor con electrones que con radiación de frenamiento, solamente debe considerarse el caso de radiación con electrones.

La producción de distintos gases tóxicos debidos a radiaciones ionizantes están dados en la Tabla VII.

TABLA VII
GASES TOXICOS PRODUCIDOS POR RADIACION CON EQUIPOS DE
TELETERAPIA DE ALTA ENERGIA

Gas	Valor Límite Umbral	Nº de moléculas por cada 100 eV de energía absorbida en aire.	Tiempo asumido de descomposición (min).
Ozono O ₃	0.1	9	50
Oxido nítrico NO	25.0	-	
Dióxido de nitrógeno NO ₂		-	
Tetróxido de nitrógeno N ₂ O ₄		-	
Pentóxido de nitrógeno N ₂ O ₅		-	
Oxido nitroso N ₂ O		-	
Trióxido de nitrógeno NO ₃		-	

De los gases tóxicos mencionados en la tabla VII, el O₃ (ozono) es el más tóxico y es además el que puede ser producido en cantidades significativas.

Expresiones para el cálculo de la cantidad de ozono producido pueden hallarse en /7/, /8/ y /12/, así como estimaciones sobre necesidades de ventilación.

Las características de operación de equipos de teleterapia con cortos períodos de irradiación e intervalos de no irradiación equivalentes hacen muy difícil que los gases tóxicos sean un problema en estas instalaciones. Por otra parte el olor característico de este gas puede detectarse a valores inferiores a la concentración máxima permisible para la jornada normal de trabajo /8/.

B.3.- Activación del Blanco y de Componentes.

A partir de energías cercanas a los $1,6 \cdot 10^{-12}$ J (10 MeV) debe tenerse en cuenta la aparición de actividad inducida en el blanco y en los componentes del equipo como consecuencia de reacciones nucleares fotoneutrónicas.

La actividad inducida depende principalmente de la energía del haz y del tipo de material irradiado. Un acelerador utiliza un blanco para producir la radiación de frenamiento, como consecuencia de ello éste resulta ser la principal fuente radiactiva potencial.

Mediciones realizadas por L. Michel /16/ en componentes del cabezal de irradiación, arrojan como conclusión que la tasa de dosis equivalente debida a las partes activadas del cabezal es despreciable.

No obstante las conclusiones a las que arribó L. Michel /16/, los autores sugieren, para aquellos aceleradores que operan con energías superiores a los $1,6 \cdot 10^{-12}$ J (10 MeV), que se efectue un monitoreo del blanco y de los componentes del equipo cada vez que deba realizarse una reparación del mismo, o eventual reemplazo del blanco.

Un estudio más detallado de la radiactividad inducida ha sido tratado en /7/ y /8/.

CAPITULO 9

SISTEMAS BASICOS DE SEGURIDAD. UBICACION DE COMANDO.

SISTEMA DE VISION DEL PACIENTE.

COMUNICACION CON EL PACIENTE.

9.1.- Sistemas Básicos de Seguridad

En este punto se analizan los sistemas básicos de seguridad relacionados con la protección del operador u otras personas que no sean específicamente pacientes. En el capítulo 10 se analizan otros sistemas básicos de seguridad relacionados con la protección del paciente.

Los sistemas básicos de seguridad tienen por objeto evitar la irradiación accidental del operador, del paciente y de otras personas que desarrollan sus actividades en el Centro Asistencial y que eventualmente puedan acceder en circunstancias anormales al recinto de irradiación.

El riesgo básico o fundamental al que eventualmente pueden estar expuestas estas personas es la de irradiación externa. Dicho riesgo esta confinado al interior del recinto, por ello el acceso al mismo debe estar restringido.

La restricción del acceso se logra mediante una barrera física (puerta) que impida el ingreso al recinto de irradiación. En una situación ideal de barrera física tiene que ser accesible sólo al personal autorizado, por lo tanto debería existir algún sistema que permita franquear la barrera física solamente a dicho personal.

Si bien el recinto de irradiación tiene un sistema de cierre mecánico (tipo llave), éste se utiliza solamente para impedir el acceso al recinto durante el horario en el cual el equipo de teleterapia no se encuentra en operación. Es absolutamente ilógico emplear un sistema de este tipo cuando el equipo está irradiando pacientes, e incluso en el intervalo entre paciente y paciente dado que el ritmo de acceso de pacientes hace impracticable cerrar con llave el recinto en cada caso.

Existe entonces la posibilidad de que una persona pueda ingresar al recinto de irradiación cuando el equipo está irradiando ya sea porque no ha observado las recomendaciones al respecto o por la ignorancia de la misma, o porque desde el comando no se tiene un control correcto de la puerta de acceso al recinto, o porque el operador no se encontraba en ese momento en la posición correspondiente dado que no estaba frente al comando del equipo de teleterapia.

Por esta razón es necesario que se coloque en la puerta, en serie con la lógica de operación del equipo de teleterapia, un interruptor tal que con la puerta abierta no se puede proceder a la irradiación y además al caso de que el equipo este irradiando, si se efectúa la apertura de la puerta del recinto, se produzca un corte automático del haz de irradiación.

Este tipo de problemas condiciona la ubicación del comando. Es evidente que la persona ubicada frente al mismo debe tener una visión correcta y clara del acceso al recinto de irradiación.

Adicionalmente existe la posibilidad de que estando otra persona que no sea el paciente dentro del recinto, ya sea por ignorancia; por falla de sistemas de visión o por error humano, el operador cierre la puerta del recinto y proceda a irradiar con el equipo.

Por esta razón se recomienda que además del interruptor automático, asociado a la apertura de la puerta, se coloque en el interior del recinto de irradiación uno o dos interruptores manuales que permitan a la/s persona/s que está/n en el interior del recinto cortar rápidamente la irradiación al notar que el equipo ha sido puesto en condición de irradiación.

Adicionalmente al sistema de corte automático de irradiación, el acceso al recinto debe estar adecuadamente señalizado, indicando la posibilidad de riesgo de irradiación, a través de señales luminosas que indiquen: equipo en condición de irradiación (p.ej. luz roja), equipo en operación (p. ej. luz verde) y equipo fuera de operación en el caso de que ambas señales estén apagadas.

Téngase en cuenta que el hecho de que el equipo se encuentre en condiciones de operación implica un rápido pasaje a la condición de irradiación por lo tanto no existe la misma posibilidad de riesgo si uno accede al recinto con el equipo no preparado para la operación que con el equipo preparado para la operación.

Se recomienda también una señal audible de sonido agradable, para que no provoque molestias, que indique el inicio y el corte de irradiación aproximadamente cinco segundos antes y después respectivamente.

9.2.- Ubicación del Comando. Sistema de Visión del Paciente.

En parte el problema está condicionado por lo dicho en 9.1.-

Para seleccionar el lugar destinado a la ubicación del comando del equipo se deberá tener en cuenta que el operador colocado frente al comando tiene que tener:

- a) El dominio del acceso al recinto de irradiación que está bajo su control.
- b) El todo momento una visión clara y correcta del paciente bajo tratamiento.

La mejor manera de lograr lo indicado en b) es mediante un circuito cerrado de televisión. Este sistema es más económico que el de visión directa a través de un vidrio plomado colocado en uno de los muros blindantes y además es mucho más conveniente que el sistema de visión indirecta del paciente a través del conjunto formado por un visor en la puerta y un espejo.

Este último sistema plantea un problema en el caso de aceleradores de alta energía (> 10 MeV) por la contribución de neutrones a la dosis equivalente dado la imposibilidad de usar vidrio plomado como un blindaje efectivo de neutrones.

El sistema de visión indirecta ha sido adoptado en numerosas instalaciones (< 10 MeV), dado que garantiza que en caso de falla del circuito cerrado de televisión queda otro sistema en funcionamiento para la visión del paciente. En consecuencia se recomienda que se exija,, adicionalmente al circuito cerrado de televisión y siempre que sea posible (< 10 MeV), un sistema de visión indirecta del paciente a través de un visor en la puerta y un espejo en el interior del recinto (ver figura 6).

Si el único sistema de visión del paciente fuese a través del conjunto formado por el visor en la puerta y el espejo el comando debería estar ubicado de manera tal que la persona sentada frente al mismo tenga una correcta visión del paciente a través de este sistema.

Si la instalación cuenta con uno o dos circuitos cerrados de televisión, en este último caso independiente, además del sistema de visión indirecta, por visor en puerta y espejo, podría no ser exigible la condición de la selección de la ubicación del comando relacionado con la visión del paciente.

Por supuesto, sigue siendo exigible la condición de que el operador desde el comando tiene que tener bajo su control el acceso al recinto.

9.3.- Comunicación con el Paciente.

Es recomendable, ya sea tanto en la práctica normal como debido a ciertas situaciones anormales que se pueden presentar durante la irradiación, que haya un sistema de comunicación con el paciente.

Esto es de especial importancia cuando se encuentre bajo tratamiento pacientes que puedan presentar alteraciones nerviosas, debidas no al cuadro clínico en si, sino a la componente psicológica asociada. Téngase en cuenta que un recinto de irradiación es un lugar que no resulta precisamente agradable y menos aún para quien asiste en carácter de paciente. Por otra parte le permite al operador comunicarse con el paciente para informarle cuándo comienza (y finaliza) la irradiación a fin de solicitarle de que se quede inmóvil en una determinada posición y si lo observa nervioso le permite inclusive tratar de tranquilizarlo.

Además, un sistema de comunicación posibilita indicarle al paciente, desde el exterior del recinto, que se retire de la camilla (siempre que se pueda movilizarse por sus propios medios) en el caso de que ocurra un accidente, como por ejemplo: que se trabe el equipo de telegammaterapia con la fuente en posición de irradiación de manera tal que impida el retorno de la misma a su lugar.

Todo esto hace que sea recomendable la utilización de un sistema de comunicación con el paciente.

CAPITULO 10

ANALISIS DE CONSECUENCIAS EN SITUACIONES ANORMALES

10.1.- Ingreso al Recinto de Irradiación con el Equipo en Posición de Irradiación. Imposibilidad Corte de Irradiación en Equipos de Telegammaterapia.

El objetivo de este punto es estimar la dosis que absorbería una persona que ingresa al recinto con el equipo en condición de irradiación como consecuencia de:

- a) El caso en que una persona pudiera pasar la barrera de control del comando y acceder así al recinto de irradiación, suponiendo que además fallara el interruptor automático de la puerta de acceso.
- b) En algunos casos la fuente se queda expuesta por fallas mecánicas, en tal situación, el operador debe ingresar al recinto de irradiación con la fuente irradiando para accionar el sistema manual de retorno de la pastilla de dicho equipo.

Si no consideramos el caso en que la persona que ingresa al recinto de irradiación pueda ser irradiada directamente por el haz útil, cosa que con las recomendaciones hechas sobre diseño, posición del equipo dentro del recinto, etc., es muy poco probable que llegue a ocurrir, la radiación que recibiría la persona que ingresa al recinto sería la debida a la radiación de fuga más la radiación dispersa.

Un equipo de teleterapia cuyo haz útil tenga un alto rendimiento, p.ej. $300 \frac{\text{rad.m}^2}{\text{min}}$ (ó $3 \frac{\text{Gy.m}^2}{\text{min}}$), la tasa de dosis debida a la radiación de fuga, en distintas direcciones del haz útil sería de $0.3 \frac{\text{rad}}{\text{min}}$ (ó $0.03 \frac{\text{Gy}}{\text{min}}$) como valor máximo a un metro del cabezal.

La tasa de dosis debida a la radiación dispersa tendría valores que dependen del tamaño del campo, de la energía de la radiación, etc., pero en principio se puede estimar que no serían superiores al 1% en las peores condiciones. Eso implicaría que la tasa de dosis absorbida por una persona sería del orden de $3.3 \frac{\text{rad}}{\text{min}}$ (ó $0.033 \frac{\text{Gy}}{\text{min}}$) si está ubicada a un metro del cabezal y a un metro del dispersor. Este valor es para un equipo de muy alto rendimiento ($300 \frac{\text{rad.m}^2}{\text{min}}$) ó ($3 \frac{\text{Gy.m}^2}{\text{min}}$).

De las consideraciones realizadas surge que:

- a) Se está sobreestimando, en forma considerable, la radiación dispersa,
- b) Se está condicionando la dirección de la radiación de fuga.

Esta no tiene la misma intensidad en todas las direcciones sino que tiene máxima intensidad en la dirección cercana al haz.

Todo esto nos demuestra que si una persona accede al recinto de irradiación ya sea porque ha fallado el operador, debido a que no mantiene el control del acceso al recinto, o porque ha fallado el sistema de seguridad, y suponiendo además que la persona que ingresó al recinto se queda observando un paciente y no toma la preocupación de retirarse fuera del recinto durante todo el tiempo que dura la aplicación, lo cual es un absurdo, la dosis absorbida de entrada (dosis piel) por esta persona sería del orden de 6,6 rad (ó 0,066 Gy) presuponiendo que el tiempo de tratamiento del paciente fuera del orden de 2 minutos, que para el rendimiento indicado sería excesivo. La dosis media en tronco sería inferior a 3 rad (ó 0,03 Gy).

Si bien este valor es significativo es evidente que no se pueden esperar efectos no estocásticos. Por otra parte este valor es inferior a los límites de dosis recomendados para el caso de exposición ocupacional. Esta razón es la que lleva a los autores a no recomendar la colocación en la puerta de un doble sistema independiente de corte automático de la irradiación.

Con el mismo razonamiento se puede concluir que en caso de que se haya trabado la fuente de radiación en equipos de telegammaterapia y sea necesario accionar el sistema manual para reingresar la fuente a la posición de no irradiación una persona puede acceder al recinto y realizar la operación. El tiempo máximo estimado, para efectuar el ingreso de la fuente utilizando el sistema manual, es de 15 a 20 segundos.

Pero además de este tiempo debe tenerse en cuenta el tiempo de tránsito dentro del recinto durante el cual la fuente está en irradiación y las únicas instrucciones que se le dan a la persona es que se dirija a la posición desde donde se acciona el mando manual evitando pasar por la zona del haz útil y además, en caso de que el sistema manual presente alguna dificultad, proceda rápidamente a cerrar los colimadores ubicándose en la zona detrás del cabezal del equipo, es decir en dirección opuesta

del haz útil a fin de minimizar la radiación de fuga de manera de poder seguir trabajando un tiempo mayor.

En esta última condición se han medido valores en equipos de telegammaterapia en operación con tasa de dosis del orden de 50 rad (ó 0,5Gy) a 100rad (ó 1Gy) lo cual hace posible trabajar, para tratar de reintroducir la fuente a la posición de no irradiación, durante tiempos más prolongados.

10.2.- Caso de Falla del Cronómetro.

El tiempo de irradiación, que es establecido para un paciente, se prefija en un cronómetro el cual corta la irradiación al finalizar el mismo.

Existen antecedentes, tanto en Argentina como en otro países del mundo, de casos en que estos sistemas han fallado y el paciente se ha visto sometido a una dosis significativamente superior a la fijada para la sesión de tratamiento.

En general la experiencia del operador es la que en estos casos ha actuado como indicador de que los tiempos eran anormalmente largos y entonces ha procedido al corte de la irradiación.

Este tipo de falla debe ser contemplada directamente en el diseño del equipo y todos los equipos, ya sea de **telegammaterapia** o de **teleterapia** en general, debían contar con un segundo sistema independiente de corte de irradiación en el cual se prefijaba un tiempo que podría ser igual o ligeramente superior al tiempo empleado para el tratamiento y que en caso de falla del primer sistema impida que el paciente reciba una dosis superior a la máxima dosis que por sesión se está dando en ese momento de acuerdo a las técnicas de aplicación.

Los equipos modernos de telegammaterapia así como los aceleradores modernos cuentan con este sistema y en el caso de aceleradores suelen contar con otro sistema adicional mediante el cual en vez de prefijarse un tiempo se prefija una dosis y la cámara de ionización ubicada en el cabezal del equipo, la cual en cierta forma estima la dosis que recibe el paciente, actúa como un interruptor de corte automático de la irradiación en caso de que se exceda cierto valor prefijado.

En este caso se tienen tres barreras para evitar una sobre exposición accidental del paciente, la primera es el cronómetro mismo, la segunda es una dosis prefijada a una cierta cantidad de unidades de

conteo de la cámara de ionización ubicada en el cabezal del equipo y la tercera es un tiempo prefijado en un sistema mecánico independiente.

Los autores sugieren que es conveniente que estos tres sistemas se instalen también en equipos de telegammaterapia.

10.3.- Problemas de Equipos que Pueden Efectuar Terapia con Electrones o Fotones Indistintamente.

El accidente más común en este tipo de equipos, vinculados especialmente con la protección del paciente, es que se irradie a una persona con electrones con tiempos de tratamiento que correspondan a la terapia con fotones.

Es imprescindible que un equipo que pueda hacer terapia con electrones o fotones indistintamente tenga una lógica de operación tal que, dada la significativa diferencia entre los tiempos de tratamiento con electrones y los tiempos de tratamiento con fotones (estos últimos son muchos mayores), si se fija un tiempo de tratamiento para terapia con fotones sea imposible irradiar al paciente con electrones.

Debe destacarse la importancia de este problema dado que si a un paciente se lo irradia con electrones con tiempos prefijados para terapia con fotones, probablemente le puede producir lesiones no deseadas.

10.4.- Caso de Iniciación de la Irradiación con Personal Dentro del Recinto.

En cierta forma este caso está contemplado en el punto 9.1.- y las consecuencias están analizadas en el punto 10.1.-.

Estrictamente el caso es que una persona está en el recinto de irradiación y el operador pone el equipo en irradiación. En ciertos equipos, cuando hay una persona accionando el equipo desde el interior del recinto de irradiación (sistema de colimación, posicionado del equipo, centrado del haz, etc.), existe un bloqueo que impide que el equipo sea puesto en posición de irradiación lo cual brinda una garantía adicional dificultando la posibilidad de un accidente.

Sin embargo puede estar la persona dentro del recinto sin estar accionando ninguno de estos sistemas o haber terminado recién con los ajustes indicados y entonces podría ponerse el equipo en operación desde el exterior del recinto de irradiación resultando entonces un caso similar al planteado en el punto 10.1

CAPITULO 11

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1 Conclusiones

- * Se concluye del trabajo desarrollado que los niveles mayores de exposición a las radiaciones a las que están sometidas las personas que laboran en el Departamento de Radioterapia del INEN, provienen fundamentalmente de las fuentes de ^{228}Ra .
- * En relación a las tecnólogas, la exposición acumulada mensual, a la que están sometidos depende básicamente de la habilidad y criterio de cada una de ellas en el manejo del ^{228}Ra . Se verificó la no existencia de un criterio uniforme entre las tecnólogas, que se revelan en relación a las condiciones de higiene y seguridad que deben tener frente al manejo de las cargas radiactivas que se encuentren en el "carro", en el depósito portátil (container) o en la superficie de la bóveda.
- * En relación a la exposición radiactiva acumulada total a nivel de cabeza durante un año, para una tecnóloga que labora tanto en Ric como en ^{60}Co aún sigue siendo menor que el límite permisible estipulado según la legislación existente al año 1990.
- * En relación a los niveles de exposición a la que están sometidos otros pacientes considerados como miembros del público, cuando se encuentran compartiendo los ambientes de internamiento con los pacientes con Ric, concluimos que ellos están sobreexponiéndose a nivel de gónadas. El promedio de exposición fue de 600mR en solo 5 días de internamiento, lo cual es mayor a 500mR que es el límite permisible anual a nivel de esos órganos (legislación al año 1990).
- * En los recintos de irradiación, destinados a alojar equipos de teleterapia con barrera de haz, los blindajes estarán sometidos simultáneamente a radiación de fuga y dispersa.
- * La radiación de fuga generalmente será la determinante del espesor del blindaje
- * Todos los blindajes están sometidos a irradiación por radiación dispersa producida en la interacción del haz útil con el paciente, camilla y barrera de haz ó blindaje; y el blindaje de la radiación de fuga con la hipótesis $E_1 = E_u$ y $W_1 = 1/1000 \times W$ atenuará suficientemente la radiación dispersa como para que no sea necesario blindaje adicional.

11.2. Recomendaciones

- * Después de la operación de retiro de los ovoides se debería proceder al desarme de los mismos de tal manera que los tubos de ^{226}Ra se guarden inmediatamente en la bóveda. Esto permitiría mayor funcionabilidad y seguridad cuando se tenga que preparar nuevamente los ovoides.
- * Para lograr una eficiente higiene y seguridad radiológica, se sugiere:
 - Realizar semanalmente la limpieza de la superficie de trabajo.
 - Baldear y/o desinfectar todas las superficies lisas de trabajo ya que al desarmar los ovoides y sondas, éstos vienen con manchas de sangre y materia orgánica de parte del paciente.
- * Como quiera que los tachos de basura contienen los desechos de ovoides sondas e hilos, estos despiden un olor desagradable lo cual representa una molestia para los que laboran en dicho ambiente, por lo tanto se recomienda el alejamiento o aislamiento de dichos tachos de basura.
- * Antes de eliminar los desechos del tacho, se deberá verificar con el detector, de preferencia con el de alarma, la existencia o inexistencia de cargas radiactivas que por descuido podrían estar presentes en dicho depósito.
- * En el ambiente donde se trabaja con ^{226}Ra , específicamente en la bóveda, deberá existir un espejo que permita observar las cargas radiactivas de manera indirecta en el momento que se sacan de las portafuentes.
- * Igualmente se sugiere la colocación de señales de seguridad con el símbolo de la radiación en c/u de los ambientes en donde existen material radiactivo.
- * Se recomienda impartir charlas de radioprotección con regularidad al personal que trabaja con fuentes radiactivas en todo el Departamento de Radioterapia.
- * En los ambientes o salas de internamiento, podrán estar como máximo dos pacientes con RIC, cuyas camas deberán ubicarse en posiciones diametralmente opuestas, a una distancia aproximada de 5 metros.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- ICRP (1969). International Commission on Radiological Protection, "Protection against Ionizing Radiation from External Sources", ICRP Publication 15.
- 2.- ICRP (1971), International Commission on Radiological Protection, "Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication 15", ICRP Publication 21.
- 3.- ICRP (1977), International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26.
- 4.- PLACER. A.E.; BIAGGIO, A.L; ARBOR GONZALES, A.; BIANCHI, A.J. y MUDANO, E.J. (1973) "Cálculo de Blindaje" - Capítulo de los cursos de Metodología y Aplicación de Radioisótopos de la CNEA, de la Universidad Nacional del Sur, de la Facultad de Farmacia y Bioquímica (U.N.B.A) y del curso para personal de reactores (Central Nuclear Atucha). Comision Nacional de Energía Atómica. Argentina.
- 5.- ALEGRIA, J.L.; ARBOR GONZALES, A.; BIAGGO, A.L.; BIANCHI,, A.J.; GRIMALDI, A. Y MUDANO, E.J. "Método Práctico para el Cálculo de Blindajes de fuentes puntuales X y X". Presentado en el Segundo Simposio sobre Uso de Aceleradores Lineales en Medicina y Segunda Conferencia Latinoamericana Sobre Física en Medicina y en Protección Radiológica - (Brasil - 1975).

- 6.- NCRP (1976). National Council on Radiation Protection and Measurements, "Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X Rays and Gamma Rays of Energies Up to MeV", NCRP Report N^o 49.
- 7.- NCRP (1977). National Council on Radiation Protection and Measurements, "Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 - MeV Particle Accelerator Facilities", NCRP Report N^o 51.
- 8.- IAEA (1979). International Atomic Energy Agency, "Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators, Technical Reports Series N^o 188 (Vienna).
- 9.- IAEA (1979). International Atomic Energy Agency, "Engineering Compendium on Radiation Shielding" Vol. I (Vienna).
- 10.- KARZMARK, C.J. and CAPONE, TATIANI (1968). "Measurements of 6 Mz X Rays", Br. J. Radiol., 41,222-230.
- 11.- Mc GINLEY, P.H.; WOOD, M.; MILLS, M. and RODRIGUEZ, R. (1976) "Dose Levels due to Neutrons in the Vicinity of High-Energy Medical Accelerators", Medical Physics, Vol. 3, N^o 6, Nov./Dec. 1976.

- 12.- British Standard 4094: Part 1 (1966) "Shielding from gamma Radiation" and Part 2 (1971) "Shielding from X-Radiation". British Standards Institution (London).
- 13.- BENINSON, D. "Optimization of Radiation Protection". IAEA-SR-36/53 (1979). Topical Seminar on the practical implications of the ICRP Recommendations (1977) and the Revised IAEA Basic Standards for Radiation Protection. Vienna, Austria, 5-9 march 1979. Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.
- 14.- BIAGGO, A.L. y ARBOR GONZALES, A. (1978). "Técnicas de Protección contra la Radiación Externa" del Manual del Curso de Protección Radiológica. Comisión Nacional de Energía Atómica. (Argentina).
- 15.- NCRP (1971). National Council on Radiation Protection and Measurements, "Protection Against Neutron Radiation", NCRP Report Nº 38.
- 16.- MICHEL, L. (1971). "Die Dimensionierung des baulichen strahlenschutzes für medizinisch genutzte Beschleuniger mit Elektronenenergien bis 45 MeV".
- 17.- Manual del curso básico de Protección Contra las Radiaciones ionizantes (1965). Washington USA

- 18.- Ministerio de Salud de Colombia, Secretaría de Estado de Salud Pública de Argentina, Secretaría de Salubridad y Asistencia de México (1981). Manual Básico de Protección Radiológica. Volumen I. Colombia.
- 19.- OMS/OPS (1988). Protección Contra la Radiación Ionizante de Fuentes Externas utilizadas en Medicina. Cuaderno Técnico Nº 15. Washington USA.
- 20.- PICON, C. (1989). "Cálculo de Blindaje y Factor de Reforzamiento". Instituto Nacional de Enfermedades Neoplásicas. PERU.