

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA

FACULTADES DE CIENCIA Y MEDICINA



DESARROLLO DE UN SISTEMA COMPUTARIZADO PARA EL DISEÑO ADECUADO DE INSTALACIONES BLINDADAS DE RADIOTERAPIA

Autor: Lic. Mariana Mehrer

Tutor: Dr. Miguel Martin

Trabajo de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela para optar
al Grado de Magister Scientiarum Mención Física Médica



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
COMISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Comisión de Estudios de
Postgrado



VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el **Trabajo de Grado** presentado por: **MARIANA MEHRER TERRADILLOS**, Cédula de identidad N° 16.786.989, bajo el título "**DESARROLLO DE UN SISTEMA COMPUTARIZADO PARA EL DISEÑO DE INSTALACIONES BLINDADAS DE RADIOTERAPIA QUE UTILIZAN RAYOS X Y RAYOS GAMMA**", a fin de cumplir con el requisito legal para optar al grado académico de **MAGISTER SCIENTIARUM, MENCIÓN FÍSICA MÉDICA**, dejan constancia de lo siguiente:

1.- Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del jurado, se fijó el día 24 de **NOVIEMBRE** De 2016 a las 9:00 A.M, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en el **Instituto de Zoología y Ecología Tropical - Facultad de Ciencias UCV**, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual **respondió satisfactoriamente** a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado, todo ello conforme con lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

2.- Finalizada la defensa del trabajo, el jurado decidió **aprobarlo**, por considerar, sin hacerse solidario con la ideas expuestas por el autor, que **se ajusta** a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado

Para dar este veredicto, el jurado estimó que el trabajo examinado **representa un aporte inicial en el cálculo computacional de blindaje de los ambientes de radioterapia** tomando en cuenta diferentes energías y técnicas de tratamiento.

En fe de lo cual se levanta la presente ACTA, a los 24 días del mes de Noviembre del año 2016, conforme a lo dispuesto en el Reglamento de Estudios de Postgrado, actuó como Coordinador del jurado el **Dr. Miguel Martín Landrove (UCV)**.

Dr. Jesús Dávila
C.I. 8.026.322
UCV/GURVE

M.Sc. Deivis Errada
C.I. 15.710.204
FISICA MEDICA C.A.

Dr. Miguel Martín Landrove
C.I. 3.982.506
UCV
Tutor

ep.24/11/2016



DEDICATORIA

Para los que sin creer en mi misma, si creyeron en mí.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer el tutor del trabajo, Miguel Martin, que con su amplio conocimiento, creatividad, colaboración y dedicación fue significativamente importante para la realización del trabajo.

También quisiera agradecer a la Universidad Central de Venezuela, que a pesar de tantos desafíos que hoy en día se presentan, aún se mantiene en pie de lucha y continúa repartiendo conocimiento, para que este mundo sea cada día mejor.

Y para finalizar, quisiera agradecer a mi familia y amigos que siempre han estado conmigo en las buenas y las malas, apoyándome y animándome para seguir adelante.

RESUMEN

El trabajo propone de la manera más adecuada posible, el diseño de las barreras primarias, secundarias y puertas, necesarias para proteger el exterior de un cuarto que realiza tratamientos con radioterapia, utilizando como herramienta de elaboración el lenguaje Matlab, y cumpliendo con las normas Covenin actuales venezolanas además del NCRP. 151, conjuntamente con las ecuaciones indicadas más adelante. El programa abarca consideraciones, nuevas tecnologías y tratamientos especiales utilizados en la actualidad, tales como CyberKnife, respetando siempre las dimensiones mínimas para el buen funcionamiento del equipo y el movimiento de la camilla, si es el caso, calculando y optimizando de esta manera, los datos y el diseño para iniciar la construcción de dicha instalación, evitando así modificaciones de última hora.

Se realizará una revisión bibliográfica amplia desde el inicio del descubrimiento de la radiación ionizante y las consecuencias por el mal uso de la misma. De esta manera se hace hincapié a la protección radiológica adecuada para cada instalación.

Contenido

	Página
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Capítulo 1	
Introducción	1
Capítulo 2	
1. Reseña Histórica	4
2. Conceptos Generales	9
2.1 Áreas controladas y áreas no controladas.....	9
2.2 Limite de dosis	10
2.3 Capas decimorreductoras (TVL) y hemirreductoras (HVL)	10
2.4 Carga de trabajo (W)	11
2.5 Factor de uso (U)	11
2.6 Factor de ocupación (T)	11
2.7 Tamaño del campo (F)	12
2.8 Bremsstrahlung	13
2.9 Suposiciones en el diseño del blindaje.....	13
2.10 Aceleradores de altas energías y su producción neutrónica	14

Capítulo 3

Métodos para el cálculo	15
3.1 Barrera primaria	16
3.1.1 Ancho de la barrera	20
3.1.2 Barreras laminadas.....	23
3.1.3 Tasas de dosis equivalente promediada (TARD, por sus siglas en inglés)	26
3.1.3.1 Tasa de dosis equivalente promedio en una semana	26
3.1.3.2 Tasa de dosis equivalente promediado a cualquier hora	27
3.2 Barrera secundaria.....	27
3.2.1 Tasa de radiación promedio semanal.....	30
3.3 Puertas y laberintos.....	31
3.3.1 Instalaciones con laberintos y puerta.....	31
3.3.2 Puertas de acceso directo.....	42
3.4 Consideraciones.....	43
3.4.1 Conductos.....	44
3.4.2 Fugas debido al suelo.....	45
3.4.3 Radiación dispersada desde el techo.....	46
3.5 Técnicas especiales.....	51
3.5.1 Consideraciones para irradiación de cuerpo entero.....	51
3.5.2 Consideraciones para radioterapia con intensidad modulada (IMRT).....	51
3.5.3 Consideraciones para tomoterapia.....	52
3.5.4 Brazo robótico.....	53
3.5.5 Unidades de radioterapia intraoperatoria.....	53
3.5.6 Unidades de Cobalto-60.....	54
3.6 Evaluaciones del blindaje y sistemas de seguridad.....	54
3.6.1 Inspección de la construcción.....	55
3.6.2 Interlocks, medios de restricción y luces de emergencia y señalización.....	55
3.6.3 Reporte sobre la evaluación del blindaje.....	56

Capítulo 4

4.1 Programa	57
4.2 Estructura del programa	79
4.3 Diagrama de flujo del programa.....	63

Capítulo 5

5.1 Características de la instalación y equipo.....	73
5.2 Materiales y características del diseño.....	73
5.3 Parámetros y dosis objetivos para los cálculos.....	74
5.4 Cálculos de blindaje y comparaciones.....	75

Capítulo 6

Conclusiones	80
Referencias	82

Apéndice A

A.1 Código de Programa_Raiz.m	84
A.2 Código de calculo_primaria.m	98
A.3 Código de calculo_secundaria.m	105
A.4 Código de Laberinto.m.....	109

Apéndice B

B.1 TVL de las barreras primarias.....	115
--	-----

B.2 TVL para la radiación de fuga del cabezal.....	116
B.3 TVL para la dispersión debido al paciente.....	117
B.4 Coeficientes de reflexión de la pared.....	118
B.5 Fracciones de dispersión.....	120
B.6 Factor de transmisión f.....	120
B.7 Dosis equivalente neutrónica.....	125

Apéndice C

Acción 1

Resultados_Barrera_Prim.dat.....	122
----------------------------------	-----

Acción 2

Resultados_Barrera_secun.dat.....	124
-----------------------------------	-----

Acción 3

Resultados_Laberinto.dat.....	128
-------------------------------	-----

Lista de tablas

Tabla I. Factor de uso utilizado en este trabajo	11
Tabla II. Factor de ocupación	12
Tabla III. Valores de los TVL para concreto ordinario (con densidad de 2,35 g/cm ³), acero (7,87 g/cm ³) y plomo (11,35 g/cm ³)	18
Tabla IV. Fracciones de dispersión a 1m desde un maniquí de tamaño humano, la distancia entre el maniquí y la fuente es de 1m, y el campo es de tamaño de 400cm ²	28
Tabla V. Dosis equivalente de neutrones (H ₀) en 1,41m de la fuente por unidad de dosis absorbida de los rayos X en el isocentro (mSv/Gy) y el número total de neutrones (Q _n) emitidos por el cabezal del acelerador	40
Tabla VI. Función de distribución angular f(θ) para fotones desviados desde el techo	50
Tabla VII. Datos de la instalación a calcular.....	76
Tabla VIII. Resultados obtenidos vs. resultados suministrados mediante el cálculo manual	78

Lista de figuras

Figura 2.1.

Fotografía en rayos X de la mano de Frau Roentgen 5

Figura 3.1.

Esquema del blindaje básico de un individuo ubicado en el punto O a una distancia d y el cual debe estar protegido de la fuente S por la barrera B 15

Figura 3.2.

Relación entre el espesor calculado, y el espesor de una barrera donde el haz incidente es oblicuo.....20

Figura 3.3

Ancho de la barrera primaria cuando el blindaje es interno 21

Figura 3.4

Ancho de la barrera primaria cuando el blindaje es externo 22

Figura 3.5

Ancho de la barrera primaria cuando se tienen insertos. 22

Figura 3.6

Barrera laminada con tres capas, una de metal con espesor t_m entre dos capas de concreto con espesor t_1 y t_2 respectivamente 23

Figura 3.7

Cuarto de tratamiento mostrando las distancias importantes para cálculos de blindaje 24

Figura 3.8

Cuarto de tratamiento mostrando las distancias importantes para cálculos de blindaje.....29

Figura 3.9

Esquema de las distancias en instalaciones de radioterapia con laberinto 32

Figura 3.10.

Esquema de las distancias necesarias para calcular las dosis Hs en un bunker donde el laberinto está ubicado paralelo al eje del gantry.....33

Figura 3.11.

Esquema del cuarto para calcular los fotones gamma por captura neutrónica y dosis equivalente por neutrones en la puerta del laberinto.....38

Figura 3.12.

Blindaje incompleto de una puerta.....42

Figura 3.13.

Alternativa para evitar fugas 43

Figura 3.14

Dirección y abertura posible para un ducto.....44

Figura 3.15

Formas de pasar conductos a través del techo 45

Figura 3.16.

Conducto blindado en ambos lados de la barrera (pared) 45

Figura 3.17	
Consideraciones debido a barreras delgadas	46
Figura 3.18	
Esquema simplificado mostrando como ocurre la dispersión por la atmosfera.....	47
Figura 3.19	
Esquema simplificado mostrando como ocurre la dispersión por la atmosfera para equipos con altas energías	48
Figura 3.20	
Dosis equivalente calculada transmitida por unidad de fluencia de neutrones con una energía promedio de E_n incidente normalmente en placas de hormigón	49
Figura 3.21	
Radiación debido a fotones dispersados desde el techo	49
Figura. 4.1	
Esquema donde se explican las distancias de la barrera primaria, el espesor y distancias minimas para el funcionamiento de un equipo	58
Figura 4.2	
Archivos necesarios para el programa.....	62
Figura 4.3	
Primer diagrama de la estructura del programa.....	63
Figura 4.4	
Continuación del diagrama principal	64
Figura 4.5	

Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (1/4).....	65
Figura 4.6	
Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (2/4)	66
Figura 4.7	
Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (3/4).....	67
Figura 4.8	
Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (4/4)	68
Figura 4.9	
Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera secundaria (1/2)	69
Figura 4.10	
Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera secundaria (2/2).....	70
Figura 4.11	
Diagrama de flujo que explica el cálculo de la puerta para el cuarto de blindaje (1/2).....	71
Figura 4.12	
Diagrama de flujo que explica el cálculo de la puerta del cuarto (2/2).....	72
Figura 5.1	
Esquema de los puntos de medición para las barreras primarias y secundarias.....	77

Capítulo 1

Introducción

Desde el descubrimiento de la radiación ionizante, no han pasado ni 200 años cuando ya, hoy en día, los avances para la salud son innumerables, existen muchos métodos de tratamientos y diagnóstico que la utilizan, desde placas radiográficas, angiografías, las tomografías computarizadas, radioterapias, etc. Estas radiaciones benefician al paciente, pero a la vez, también perjudican si no se utilizan con precaución, sobre todo para los que están en contacto constantemente con estas radiaciones (POE¹), donde estos deben protegerse y monitorearse periódicamente.

Tal y como describen en la Covenin 3496 [9], desde los primeros estudios de los rayos X y gamma, se observaron que la exposición a niveles elevados a esta radiación, podía causar daños clínicamente identificables a los tejidos del cuerpo humano tales como enrojecimiento de la piel, náuseas, así como enfermedades malignas.

Por estas razones, se debe proteger al personal, por lo tanto, es primordial, además de innovar técnicas de tratamientos, considerar al personal a la hora de la construcción de una instalación.

A pesar de las mejoras en los tratamientos, la protección del personal es engorrosa. Dependiendo de la especialidad del centro, deben usar petos pesados e incómodos, en otros casos, deben abrir y cerrar puertas pesadas, o manipular una pantalla blindada, entre otros. En algunas ocasiones, un peto no es suficiente para su protección y es allí cuando el cuarto donde se manipula el equipo debe estar blindado. Este blindaje viene calculado por ecuaciones las cuales se realizan

¹ POE: Personal ocupacionalmente expuesto, el cual está obligado por su trabajo, a estar en áreas donde puede haber radiaciones ionizantes.

manualmente y se juega con los resultados, para poder lograr una instalación que beneficie tanto al personal expuesto, como las dimensiones necesarias para el buen funcionamiento del equipo, respetar los espacios con que se cuentan y el factor monetario. Donde muchas veces, por errores humanos, se debe volver a calcular manualmente los blindajes hasta lograr los objetivos deseados.

El tratamiento llamado radioterapia, utiliza las radiaciones ionizantes para tratamientos de cáncer, hemorragias o anomalías como queloides, etc., esta terapia se divide en dos, una donde el paciente tiene contacto directo con la fuente de radiación, esta terapia se llama braquiterapia, y otra llamada teleterapia, donde el paciente esta aproximadamente a 1 metro de distancia con la fuente, por eso el nombre de “tele” de distancia, en la mayoría de los casos, estas radioterapias cuentan con una fuente considerablemente energética, sintiéndose en la obligación, el POE, en estar distanciado del paciente cuando este es irradiado por el equipo, además de la distancia, también se debe contar con una instalación blindada tanto en las paredes como en el techo y suelo, si es necesario. Este trabajo se inclinará en equipos de radioterapia a distancia, es decir de teleterapia.

En equipos de teleterapia se producen rayos X o rayos gamma. Entre los equipos de rayos X, existen dos grandes categorías, los equipos de bajas energías, donde el voltaje de aceleración es igual o menor a 10MV^2 , y los de altas energías, donde el voltaje de aceleración supera los 10MV . Cuando se habla de aceleradores de bajas energías, el blindaje está orientado en proteger al POE de los fotones producidos por los rayos X debido a las dispersiones y transmisiones, sin embargo, si se habla de los de altas energías, se debe considerar, además, la producción de neutrones y rayos gamma, esto se debe a que existe, a partir de estas energías, producción de

² A lo largo de este trabajo, “MV” será utilizado para los voltajes de aceleración y la energía del espectro por bremsstrahlung, mientras que “MeV” se referirá a las energías de los electrones y fotones mono energéticos directamente.

neutrones y rayos gamma debido a la activación de los materiales circundantes del acelerador y cuarto.

La idea primordial de este estudio, es facilitar el trabajo, a la hora del cálculo para los blindajes del cuarto de tratamiento, sin tener que improvisar y de manera automática, obtener todos los valores necesarios para construirlo. Para esto, se tomará en cuenta la norma internacional del NCRP³ número 151, donde se extienden con equipos no sólo de altas energías, sino que están actualizados con equipos un poco más actuales para tratamientos, tales como el CyberKnife®, tomoterapias, entre otros. En la norma además de plasmar las ecuaciones necesarias, también hablan de las consideraciones que se deben de tomar en cuenta a la hora de la construcción y el comportamiento que debe optar el personal. A pesar de tener normas internas nacionales (COVENIN), este trabajo se basará principalmente en la norma mencionada anteriormente, ya que las COVENIN, para este tipo de manejos, tienen mas de 20 años que no se actualizan. Sin embargo, esto no es impedimento y nunca lo ha sido, para que en Venezuela se continúe innovando con los tratamientos con radiaciones ionizantes, y protegiendo al personal expuesto. Se utilizará como herramienta para el cálculo, Matlab, donde se realizarán todos los cálculos y analizarán los resultados. Las tablas necesarias se sacarán mayormente de la misma norma NCRP 151 y algunas veces, se harán interpolaciones/extrapolaciones, para poder lograr un espectro más amplio de valores.

³ NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements, en inglés.

Capítulo 2

1. Reseña histórica

La física de la radiación es un concepto que en 1890 aún no se tenía bien definido, pero no fue sino hasta 1895, cuando Röntgen descubre los rayos X, a partir de este descubrimiento, no pasaron 20 años, cuando ya se tenía un amplio conocimiento y lograron formalizar el modelo atómico (el átomo de Bohr en 1913) [1].

Gracias a estos experimentos realizados en este periodo, se tuvo claro que los átomos no eran esferas sólidas. Y se abrió un nuevo mundo en la física llamada física moderna: descubriendo de esta manera, la estructura y dinámica del sistema atómico, así como nuevas leyes que describían los fenómenos de la naturaleza, ampliando los conceptos físicos de la radiación y su importancia.

El descubrimiento de los rayos X, la radioactividad y el electrón, fueron gracias al estudio de los gases. Cuando un tubo de rayos catódicos se llenaba con gas, ocurría una descarga, emitiendo luz con las longitudes de ondas características del gas del tubo, sin embargo, cuando usaban una bomba de vacío para vaciar considerablemente el tubo y repetían el experimento, el brillo cambiaba, produciendo una fosforescencia verde-azul en las paredes del tubo, llamando estos rayos, rayos catódicos.

Luego en 1895, Wilhelm Conrad Röntgen investigó aún más el comportamiento de estos tubos, cubriéndolos con un papel opaco y oscureciendo el laboratorio, para así observar mejor el fenómeno, muy cerca del tubo, había una pantalla de platino cianuro de bario en el cual se observaban flashes de luces tenues. Röntgen lo nombro rayos X debido a su naturaleza “desconocida”. La primera experiencia de Röntgen con estos rayos, que tuvo con un cuerpo humano, fue al observar los

huesos de la mano y muñeca de su esposa. A partir de ahí, divulgó su hallazgo y su descubrimiento se convirtió en un nuevo método de diagnóstico para lesiones óseas, contenidos en el tórax, hasta el aparato digestivo. En las primeras radiografías con frecuencia se requería de 30 minutos a una hora, para formar una imagen radiográfica de una parte considerablemente gruesa del cuerpo, debido a la ineficacia de la radiación de baja energía producida por los primeros tubos radiográficos. Con el tiempo, se observó en los investigadores, radiólogos y técnicos que trabajaban con estos rayos, que tendían a presentar lesiones en su piel, justo donde era expuesta a la radiación, y en algunos casos, anemias graves e incluso cáncer.



Figura 2.1 Fotografía en rayos X de la mano de Anna Röntgen [1]

Seguido de este descubrimiento, Becquerel realizó experimentos los cuales determinaron que los cristales de uranio tenían un efecto similar a las placas fotográficas, como el producido de los rayos de Röntgen. Sucesivamente los Curie, realizaron experimentos sobre la radioactividad, los cuales empezaron a estudiar la radioactividad pero agregándole campos magnéticos, descubriendo de esta manera

los rayos alfa, beta y gamma. Es importante resaltar, que estos investigadores tenían un total desconocimiento de las consecuencias de manipular este tipo de isótopos y los rayos X. Se conoce que Marie Curie murió de anemia aplásica, probablemente causada por las radiaciones las cuales estuvo expuesta, al parecer, llevaba isotopos radioactivos en los bolsillos. Además, luego de descubrir el peligro de la radiación ionizante, se determinó que tanto sus documentos, e incluso su libro de cocina, eran altamente radioactivos, por lo cual sus trabajos se encuentran guardadas en cajas plomadas.

Luego de estos descubrimientos siguieron muchos de gran importancia, tales como al descubrimiento del electrón (Thomson, 1897), la ley de radiación (Planck⁴, 1900) y el modelo del átomo (Bohr, 1913). Avanzando aún más para lograr manipular y aprovechar la radiación ionizante.

A medida que se fue descubriendo lo peligroso que eran estas ionizaciones en el cuerpo, se fueron realizando técnicas de bloqueo y evitar así la sobreexposición innecesaria. A los principios de 1900 ya conocían que el plomo era un material muy efectivo para detener los rayos X producido en los tubos. En 1902 William Herbert Rollins propuso que el plomo podría usarse para las unidades de rayos X, con fines de protección. Él decía que si una placa fotográfica no se veía afectada cuando se bloqueaba con plomo, por estos rayos X, entonces no era dañino. Rollins logró realizar muchos trabajos e invenciones para el bloqueo y protección radiológica, además de limitar la exposición de los pacientes y el operador. Pero no fue sino hasta en 1920 cuando los American Röntgen Ray Society se organizaron y crearon un comité de radioprotección en septiembre de 1920, y el siguiente año los ingleses también se organizaron y formaron un comité de X-Ray and Radium Protection Comitee. Ambos comités publicaron recomendaciones para la radioprotección, promocionando el uso del plomo para la atenuación, usando carcassas de metal y

⁴ Con la ley de radiación de Planck, aún se calcula la radio protección en nuestros días.

plomo en las paredes del cuarto de tratamiento, además de enseñar la importancia de la distancia para reducir la exposición.

Mutscheller (1925) fue el primero en determinar que el tiempo (t) diario en el que el generador de rayos X estaba en operación, la corriente del tubo (I) y la distancia (d) desde la fuente al operador, pueden ayudar a los operadores a no sobreexponerse. Consideró que la dosis de tolerancia debían ser 0.01 de dosis eritemática⁵ por mes (esto es 0,06Gy mensual). Entonces, la dosis aritmética mensual es

$$E = \frac{36,8 I t}{d^2}$$

Donde 36,8 es un número empírico. Entonces el blindaje requerido estaba basado en la reducción fraccional de este número E para lograr conseguir el valor de 0,01. Años posteriores, Mutscheller realizó estudios sobre la radiación dispersada por el paciente y las superficies del tratamiento, determinando que además de los factores señalados anteriormente, la superficie y coeficiente de dispersión del material donde ocurría la dispersión, también jugaban un papel fundamental. A partir de este momento, ya se tenían factores los cuales jugando un poco con sus valores, podrían obtener mejor manejo de estos rayos sin perjudicar quienes trabajaban allí.

Ya en los años 30 se estaban iniciando las consideraciones de las barreras primarias, donde se debía estar a un pie⁶ (0,304m) de distancia más allá de dicha barrera, regla de hasta nuestros días aún se utiliza. Los comités realizaron cálculos y publicaron tablas del espesor de la barrera basándose en el voltaje del generador, además consideraron que el cuarto tenía que estar totalmente blindado, y donde no era barrera primaria (explicado más adelante), es decir, barrera secundaria, se debía blindar pero con 1mm más delgado que la barrera primaria.

⁵ Dosis eritemática es la dosis de radiación necesaria para producir un enrojecimiento de la piel de una persona

⁶ Por redondeo se utilizará el valor de 0,3m

Teniendo ya un mejor manejo de la protección radiológica, empezaron a construir equipos con mayor producción de voltaje y más precisos, gracias a esto, empezaron a tratarse tumores profundos con el mínimo de daño en los tejidos circundantes sanos. Además empezaron a construir (1933) tubos hasta de 9m de longitud para poder hacerlos más energéticos. Pero no fue sino en 1953 que en el Hospital Hammersmith de Inglaterra, cuando trataron por primera vez a un paciente con un acelerador lineal. En esa época lograron construir aceleradores tan energéticos como de 25MeV.

En 1946 se renombra el “Advisory Committee on X-Ray and Radium Protection” como el “National Council on Radiation Protection and Measurement” (NCRP), los cuales redujeron la exposición de 0,1R por día a 0,3R⁷ por semana. Tres años más tarde, el “International Commission on Radiation Units and Measurements” (ICRU) determinan junto al NCRP, que una dosis permisible podría ser de 5R anuales.

Actualmente se utilizan ecuaciones empíricas descritas principalmente en el Reporte No 49 y el Reporte No 151 del NCRP. Las técnicas básicas del cálculo del blindaje son básicamente iguales a las utilizadas hace varios años, con pequeñas variaciones en consideraciones y valores.

Cuando se utilizan aceleradores de altas energías, se emplean consideraciones y cálculos un poco más engorrosos debido a la producción fotoneutrónica, las cuales se explicaran más adelante.

⁷ R = Röentgen es la unidad de medida antigua la cual se utilizaba para medir el efecto de las radiaciones ionizantes

2. Conceptos generales

La finalidad de blindar la radiación, es proteger a los miembros expuestos del público y empleados, a un nivel aceptable. En este trabajo, presentaremos los métodos utilizados, recomendaciones y técnicas para el diseño, instalación de la estructura blindada, con la finalidad de entender y analizar los resultados antes de construir el cuarto de tratamiento⁸.

2.1 Áreas controladas y áreas no controladas

Las áreas controladas son las áreas de acceso limitado en el que la exposición ocupacional del POE a la radiación está estrictamente bajo supervisión. Esto implica que tanto el acceso, la ocupación y las condiciones de trabajo están controladas con el propósito de proteger contra la radiación. Esto incluye los cuartos de tratamiento, las consolas de control y otras áreas que requieren limitar el acceso. Los trabajadores de estas áreas deben estar debidamente entrenados y tener conocimiento amplio sobre la radiación ionizante, además de esto, deben estar individualmente monitoreados⁹. En cambio las áreas no controladas para propósitos de la radio protección son todas las otras áreas del hospital y sus alrededores las cuales no son monitoreadas.

⁸ En este estudio, se utilizará la palabra cuarto de tratamiento, al bunker o cuarto blindado.

⁹ En Venezuela se utilizan los dosímetros personales, los cuales van como un prendedor junto a un lado del pecho del personal.

2.2 Límite de dosis (P)

Los límites de dosis (P) son los niveles de dosis equivalente¹⁰ (H) permitidos y usados en los cálculos del diseño y evaluación de las barreras a construir para la protección. Si es un área controlada, es un valor y si es un área no controlada, es otro.

En este trabajo se hablará en términos de H (mili sievert) en el punto más cercano de ocupación más allá de la barrera protectora, para este caso se utilizará el reglamentario el cual es 0,3m.

En el caso de las áreas controladas, se recomienda un límite de dosis (en dosis equivalente) de 0,1 mSv/semana (5mSv/año). Para las áreas no controladas P (en dosis equivalente) debe ser 0,02mSv/semana (1mSv/año).

2.3 Capas décimorreductoras (TVL) y hemirreductoras (HVL)

La capa decimorreductora (TVL) es el espesor de una determinada substancia que cuando se somete al haz de radiación, esta reduce la intensidad del haz, a su décima parte, en cambio la capa hemirreductora es el espesor de una determinada substancia el cual atenúa el haz a la mitad, normalmente estos valores se encuentran tabulados y en este trabajo se utilizan los valores presentados en el NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements) 151.

Existe una relación entre las capas décimorreductoras y la hemirreductoras

$$HVL=0,301TVL \quad (2.1)$$

¹⁰ La dosis equivalente es el producto de la dosis absorbida por un factor de calidad característico de la radiación incidente, en un punto específico de interés en el tejido.

2.4 Carga de trabajo (W)

Para un equipo de radioterapia, la carga de trabajo es la dosis absorbida por el paciente en el isocentro multiplicado por el número de pacientes tratados a la semana. Las unidades son Gy/semana a 1 metro de distancia.

2.5 Factor de uso (U)

El factor de uso es la fracción de la carga de trabajo que se dirige hacia cada barrera. Para las barreras primarias, si la distribución es simétrica, se otorga un valor del 0,25 a cada uno de los cuatro ángulos primarios (ver tabla I).

GRADOS DE LA FUENTE	FACTOR DE USO
0	0,25
90	0,25
180	0,25
210	0,25

Tabla I. Factor de uso utilizado en este trabajo para las barreras primarias [2].

2.6 Factor de ocupación (T)

Para un área, el factor de ocupación es la fracción de tiempo promedio en el que el individuo (más allá de la barrera), es expuesto mientras el haz esta encendido. Debido a que en las áreas controladas, quienes están allí son normalmente los POE, los cuales supuestamente están el 100% de su tiempo laboral en el mismo sitio, se considera el factor de ocupación como 1, en cambio para otras áreas no controladas, es otro valor, mostrado en la tabla II.

Zonas adyacentes	Factor de ocupación
Áreas de ocupación tiempo completo, oficinas administrativas, áreas de planificación de tratamientos, centro de control, estación de enfermería, salas de espera, áreas de recepción, etc.	1
Adyacencias de la sala de tratamiento y cuartos de consultas de pacientes tratados	1/2
Corredores, comedor y cuartos de descanso	1/5
Puerta de la sala de tratamiento	1/8
Baños públicos, almacenes, áreas externas de libre acceso, áreas libres con asientos, salas de espera sin personal, conserjerías, etc.	1/20
Escaleras, áreas libres peatonales, ascensores sin personal, áreas de estacionamientos y circulación de vehículos	1/40

Tabla II. Factor de ocupación [2].

2.7 Tamaño del campo (F)

Es el máximo tamaño de campo en la superficie que ocupa el haz de la radiación en el isocentro, el isocentro normalmente es donde está el paciente. Los aceleradores convencionales permiten un apertura hasta de 40cm x 40cm. Normalmente el campo es considerablemente más pequeño, sin embargo, en esta trabajo consideraremos el tamaño máximo del campo.

2.8 Bremsstrahlung¹¹

Esta radiación de frenado ocurre por la desaceleración de las partículas cargadas. Por ejemplo, los electrones. Los electrones de alta velocidad son partículas beta, y estos producen bremsstrahlung, cuando pasa a través de la materia, especialmente si esta materia es de un material de alto Z. Lo que ocurre es que el electrón acelerado pasa cerca del núcleo del material y experimenta la fuerza de desviación debido al núcleo, al desviar el electrón, este cambia su aceleración, emitiendo un fotón llamado fotón de bremsstrahlung.

2.9 Suposiciones en el diseño del blindaje

En este trabajo realizaremos ciertas suposiciones, los cuales nos benefician y aseguran aún más, una eficaz barrera blindada.

- ✓ A pesar de que la atenuación del haz primario por el paciente es del 30%, este se desprecia.
- ✓ Los cálculos para el espesor siempre se asumen perpendiculares a la incidencia de la radiación.
- ✓ La radiación de fuga debido al equipo es considerado para las radiaciones secundarias.
- ✓ Los factores de ocupación para áreas no controladas son considerablemente altas, se asume que los trabajadores están el 100% de su horario de trabajo en el mismo sitio, cuando realmente no es así.
- ✓ La distancia mínima desde la barrera blindada y el trabajador es de 0,3m.
- ✓ La “regla de las dos fuentes” es considerada si se tiene un equipo con diferentes energías o cuando existe radiación de diferentes tipos. Una vez se ha determinado el espesor para cada energía o tipo de radiación, se calcula su

¹¹ Radiación de frenado en alemán.

diferencia, si esta es mayor a la capa decimorreductora (TVL) más restrictiva, se toma como espesor final esta capa. Pero si la diferencia es menor, se toma como espesor final el espesor más restrictivo más un HVL (también tomada de la capa más restrictiva).

2.10 Aceleradores de altas energías y su producción neutrónica

Para realizar un cálculo de blindaje, es indispensable saber qué tipo de acelerador se instalará, ya que si el acelerador es de bajas energías ($< 10\text{MeV}$), solo se debe de tomar en cuenta los fotones, en cambio, si el acelerador es de altas energías o dual y una de sus energías es alta ($\geq 10\text{MeV}$), existe producción no sólo de estos fotones energéticos, sino de neutrones y rayos gamma.

Los haces de fotones de alta energía producen dosis más bajas en piel, pero una dosis mayor en profundidad y una menor dosis dispersada a los tejidos sanos circundantes. Sin embargo, estos fotones pueden ocasionar un proceso llamado fotodesintegración, que inclusive puede transformar el núcleo de un átomo. Ya que los fotones proveen energía cinética, el cual puede ser tan próximo a la energía de amarre de los nucleones, se hace fácil que un neutrón logre escapar del núcleo, debido a que no tiene que vencer la barrera de potencial coulombiana el cual si están sometidas las partículas cargadas. La energía del fotón necesaria para que ocurra esto, es de aproximadamente 8-10MeV para cualquier material, a excepción del deuterio (2,22MeV) y el berilio (1,67MeV). Este lanzamiento y captura de neutrones producen núcleos radiactivos que pueden irradiar incluso cuando el acelerador no está funcionando.

Estos aceleradores exponen tanto a los pacientes como al personal a radionucleídos, por lo tanto, estos fotones muy energéticos, deben tratarse con cuidado en las instalaciones de los aceleradores.

El hidrógeno es muy efectivo para absorber neutrones, cuando el neutrón colisiona con el hidrogeno, su energía puede reducirse a la mitad [1].

Capítulo 3

Métodos para el cálculo

Para diseñar el blindaje en instalaciones que son sometidas a radiaciones ionizantes, se utilizan ecuaciones empíricas desarrolladas por Mutscheller y luego redefinidas por la NCRP. El concepto básico está dibujado en la figura a continuación

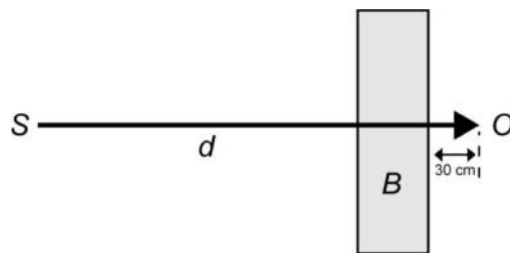


Figura 3.1. Esquema del blindaje básico de un individuo ubicado en el punto O a una distancia d y el cual debe estar protegido de la fuente S por la barrera B [2].

En esta figura el individuo ubicado en el punto O, se encuentra a una distancia de 0,3m de la barrera B, esta barrera debe ser capaz de atenuar el haz S a una distancia d . El nivel de protección está definido por P el cual depende si la persona de ese lugar es un POE en un área controlada o es un miembro del público en un área no controlada. Por lo tanto, la barrera B, debe ser capaz de atenuar la fuente S, de tal manera que el individuo ubicado en O, pueda ser expuesto al haz atenuado con un valor menor a P.

En este trabajo, las fuentes de radiación son fotones producidos por bremsstrahlung debido a aceleradores lineales o rayos gamma de equipos isotópicos. Si la energía del fotón supera la energía de ligadura del neutrón del núcleo, el cual es 8MV, para la mayoría de los elementos, se debe considerar la una producción foto neutrónica, sin embargo, dicha producción se toma en cuenta sólo cuando la energía excede de los 10MV, debido al incremento de la sección eficaz del proceso. Por esta razón, si la

energía del equipo supera los 10MV, se deberá de considerar esta producción de neutrones a la hora del blindaje, es aquí donde los materiales que contienen hidrógeno, son considerados para capturar neutrones. De esta manera, se tienen dos tipos de equipos, aceleradores de altas energías, los que superan los 10MV; y los equipos de bajas energías, los que son iguales o menores a 10MV. Además de esto, se debe considerar que algunos equipos son de producción de energía dual.

En un bunker o cuarto de tratamiento, se tienen dos tipos de barreras, la barrera primaria y la barrera secundaria. En la barrera primaria, es incidido directamente el haz de la fuente, mientras que la barrera secundaria blindo el haz producido por la dispersión del paciente y la fuga del cabezal, es decir, el resto del bunker el cual no abarca la barrera primaria.

3.1 Barrera primaria

Las barreras primarias son diseñadas para atenuar el haz incidente que viene directamente de la unidad de tratamiento a la barrera. Una barrera adecuada, debe ser capaz de atenuar el haz, de tal manera, que al atravesar dicha barrera, su dosis tiene que ser menor a la dosis objetivo P , en una distancia ya explicada. Para demostrar que evidentemente es menor, se tiene la ecuación del factor de transmisión

$$B_{pri} = \frac{Pd_{pri}^2}{WUT} \quad (3.1)$$

Donde

P = la dosis objetivo (expresado en dosis equivalente) más allá de la barrera por un tiempo de una semana (Sv/semana)

d_{pri} = distancia desde el haz hasta el punto de interés más allá de la barrera (m)

W = carga de trabajo por semana (Gy/semana)

U = factor de uso. Dependiendo del lugar donde el haz es proyectado, se tiene un valor (ver tabla I)

T = factor de ocupación del lugar protegido o fracción de tiempo en el que una persona estará en el punto de interés (ver tabla II).

Obteniendo el factor de transmisión, se calcula el espesor que necesita la barrera primaria para atenuar el haz. Normalmente se utilizan capas décimorreductoras, las cuales reducen el haz hasta diez veces su intensidad, por lo tanto se utiliza el logaritmo para determinar el número de capas (TVL) necesarias para atenuar el haz

$$n = -\log(B_{pri}) \quad (3.2)$$

Por lo tanto, el espesor termina siendo

$$t_{barrera} = TVL_1 + (n - 1)TVL_e \quad (3.3)$$

Endpoint Energy (MV) ^b	Material	TVL_1 (cm)	TVL_e (cm)
4	Concrete	35	30
	Steel	9.9	9.9
	Lead	5.7	5.7
6	Concrete	37	33
	Steel	10	10
	Lead	5.7	5.7
10	Concrete	41	37
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
15	Concrete	44	41
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
18	Concrete	45	43
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
20	Concrete	46	44
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
25	Concrete	49	46
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
30	Concrete	51	49
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
Co-60	Concrete	21	21
	Steel	7.0	7.0
	Lead	4.0	4.0

Tabla III. Valores de los TVL para concreto ordinario (con densidad de 2,35 g/cm³), acero (7,87 g/cm³) y plomo (11,35 g/cm³) [2]

Donde TVL_1 es la primera capa decimo reductora y TVL_e es la de equilibrio, de un material dado (normalmente se trabajara con plomo, acero y concreto) (ver tabla

III). En alguno de los casos, se pueden calcular el factor de transmisión, partiendo del espesor y los TVL involucrados

$$B = 10^{-\left\{1 + \left[\frac{(t - TVL_1)}{TVL_e}\right]\right\}} \quad (3.4)$$

Si el material usado es el concreto y el acelerador es de alta energía, entonces no hará falta un blindaje especial adicional, debido a la absorción de todos los neutrones, sin embargo, si este no es el caso, se deben hacer consideraciones especiales, las cuales más adelante se explicarán.

En general, el espesor de la barrera primaria debe ser calculada para un haz perpendicularmente incidente y constante, además de tomar en cuenta controles de calidad con respecto a la construcción del mismo, siendo de espesor uniforme y el material debe cumplir con la densidades establecidas, evitando burbujas y respetando su densidad. Si no es posible el espesor adecuado, puede considerarse oblicuidad en la incidencia del haz, instalando, en cierto ángulo, el equipo y de esta manera se reduciría el espacio y por lo tanto el espesor podría ser menor, sin embargo, este tipo de instalaciones tienen que venir acompañados de factores de uso pequeños.

Cuando el haz incidente es oblicuo en la barrera, el espesor requerido es menor. Este espesor dependerá de: (1) la oblicuidad del ángulo (θ) entre la dirección de la radiación y la barrera primaria, (2) el material de la barrera, (3) la atenuación requerida, y (4) la energía de la radiación. Si no hay dispersión de radiación en la barrera, el espesor se determina como $t / \cos \theta$, tal y como se muestra en la figura a continuación

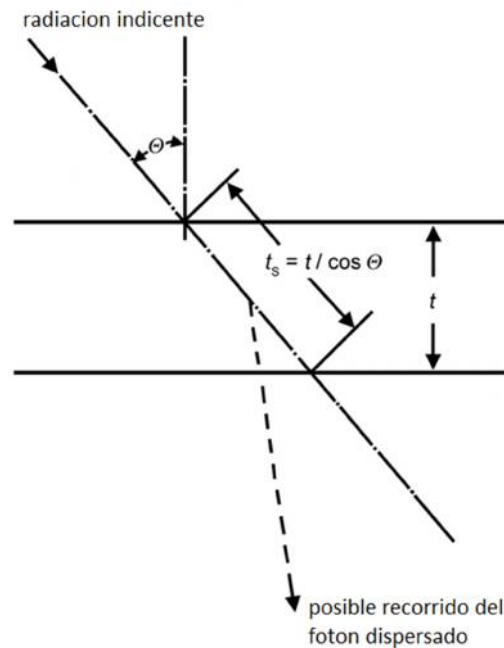


Figura 3.2 Relación entre el espesor calculado, y el espesor de una barrera donde el haz incidente es oblicuo

Para grandes ángulos, existe una desventajas, podrían dispersarse y lograr escapar fotones que tengan un recorrido mayor al espesor calculado, para evitar este fenómeno, algunas veces se necesita un espesor aun mayor al espesor original calculado, por lo tanto se debe de tomar en cuenta que si se utiliza oblicuidad, este ángulo no afecte y permita el escape de fotones. La oblicuidad es normalmente tomada en cuenta solo para radiaciones del haz primario ya que tanto la radiación de fuga como la dispersa puede ser confusa para aplicar un ángulo específico de incidencia. Sin embargo, en este estudio si se considerara para las barreras secundarias.

3.1.1 Ancho de la barrera

Otro cálculo importante en la construcción de la barrera primaria, es su anchura, esta está determinada por el tamaño máximo del haz en diagonal, sumándole a cada

lado, 30cm de margen. En aceleradores convencionales, el tamaño del campo máximo F es de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ en una distancia de 1m de la fuente, dando un tamaño máximo de campo oblicuo dado (en metros) por

$$\text{ancho} = 2 \cdot d_w \cdot \tan(\Theta) + 0,6 \quad (2.5)$$

Nótese que se le toma un margen de 0,6m adicionales, esto es un margen de seguridad total de ambos lados, Θ es el ángulo de dispersión del haz y por otro lado, d_w es la distancia entre el haz a la barrera, esta distancia puede variar, dependiendo si la barrera es hacia dentro, afuera o son laminadas con materiales mixtos (ver figura 3.3, 3.4 y 3.5).

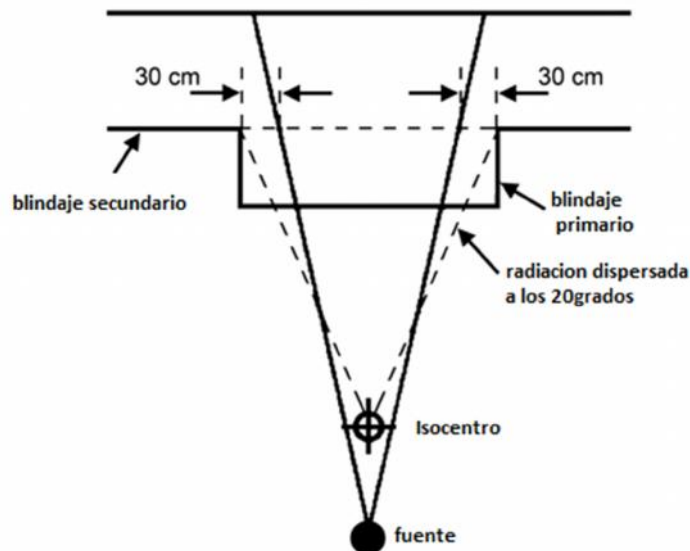


Figura 3.3 Ancho de la barrera primaria cuando el blindaje es interno

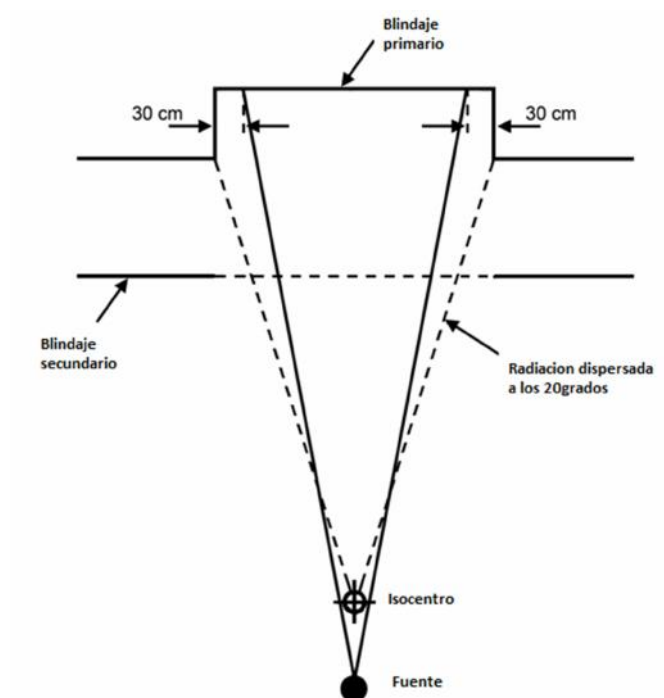


Figura 3.4 Ancho de la barrera primaria cuando el blindaje es externo

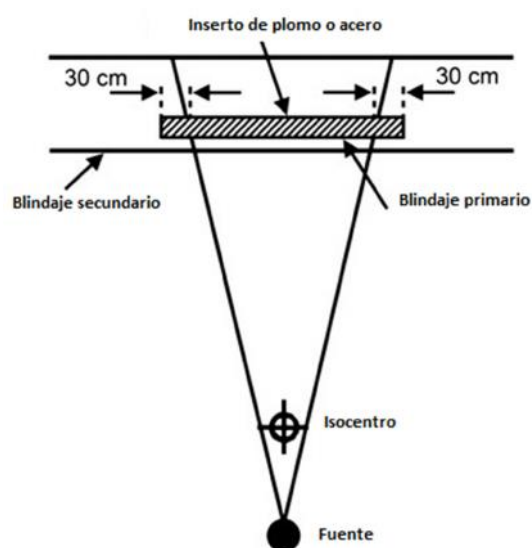


Figura 3.5 Ancho de la barrera primaria cuando se tienen insertos.

3.1.2 Barreras laminadas

No en todas las situaciones se compone la barrera primaria de hormigón. Algunas veces por cuestiones de espacio, se utiliza combinadamente el hormigón con plomo o acero. Para el haz primario, el factor de transmisión total, es producto de todos los factores de transmisión de cada material que contiene la barrera¹² (por ejemplo, si la barrera constara de los tres materiales, el factor de transmisión total, sería $B_T = B_{hormigon}B_{Plomo}B_{acero}$, para el concreto, plomo y acero respectivamente). Normalmente, para lograr frenar la producción de neutrones, se utilizan capas de hormigón con una de metal en el centro (ver figura 3.6), sin embargo, se han realizado estudios los cuales indican que para optimización de espacio y efectividad del blindaje, es aconsejable utilizar primero la capa metálica seguido de la de concreto ($t_m + t_1$) [6].

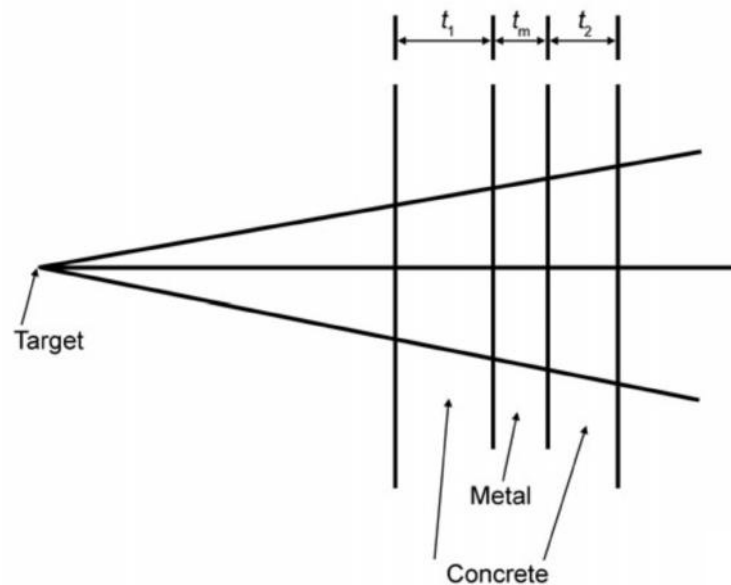


Figura 3.6 Barrera laminada con tres capas, una de metal con espesor t_m entre dos capas de concreto con espesor t_1 y t_2 respectivamente.

¹² Si el caso es un acelerador de altas energías, hay que considerar la posible producción de neutrones debido a los metales de estas capas.

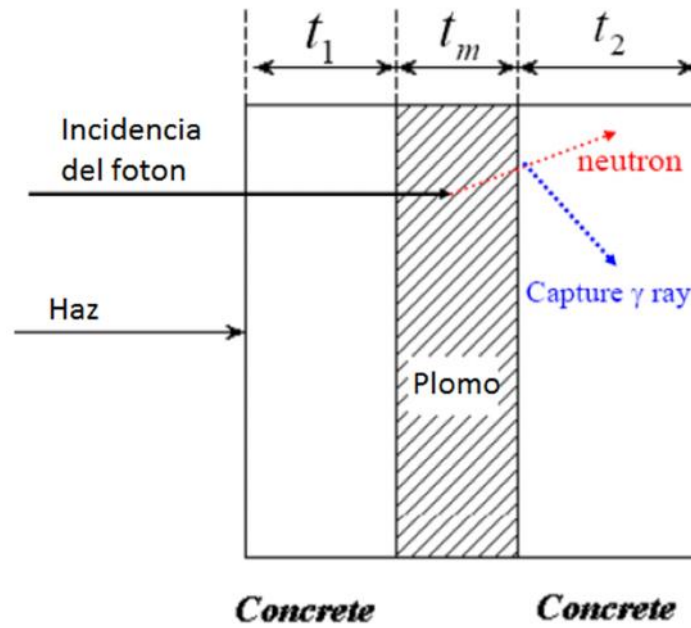


Figura 3.7 Esquema explicativo de cómo funcionan las barreras laminadas con un haz de altas energías

La dosis equivalente neutrónica sería [2]

$$H_n = \frac{D_0 R F_{max}}{\left(\frac{t_m}{2} + t_2 + 0,3\right)} \left[10^{-\left(\frac{t_1}{TVL_X}\right)} \right] \left[10^{-\left(\frac{t_2}{TVL_n}\right)} \right] \quad (3.6)$$

Donde

H_n = dosis neutrónica equivalente por semana ($\mu\text{Sv/semana}$)

D_0 = dosis absorbida por los rayos X por semana en el isocentro (cGy/semana)

R = coeficiente de producción neutrónica (viene presentado en neutrones micro sievert por rayos X en centigray por haz cuyo área está en m^2) ($\mu\text{Sv/cGy}^{-1}\text{m}^2$)

Para el acero [5], $R=1,7\mu\text{Sv/cGym}^2$

Para el plomo, $R = \begin{cases} 3,5\mu\text{Sv/cGym}^2, & E < 15\text{MeV} \\ 19\mu\text{Sv/cGym}^2, & E \geq 18\text{MeV} \end{cases}$

F_{max} = área máximo del campo en el isocentro (m^2)

t_m = espesor de la lámina metálica (m)

t_1 = el espesor de la lámina situada antes del metal (m)

t_2 = el espesor de la lámina situada después del metal (m)

TVL_x = el TVL de concreto para el haz primario (ver tabla III)

TVL_n = el TVL para neutrones del material correspondiente a t_1 (m)

Para el hormigón, $TVL_n=0,25m$

Para el polietileno borado, $TVL_n=0,10m$

Luego de haber calculado este valor, la dosis total equivalente, sería

$$H_{tot} = H_n + 2,7H_{tr} \quad (3.7)$$

Donde

H_n = dosis neutrónica equivalente por semana ($\mu Sv/semana$)

H_{tr} = es la dosis equivalente de los rayos X transmitida

Si B_{pri} es conocida, se podría sustituir H_{tr} por P en la ecuación 2.1 y obtener

$$H_{tr} = \frac{WUTB_{pri}}{d_{pri}^2} \quad (3.8)$$

Donde

H_{tr} = es la dosis equivalente de los rayos X transmitida

W = carga de trabajo (Gy/semana)

U = factor de uso

T = factor de ocupación

B_{pri} = factor de transmisión en la barrera primaria

d_{pri} = distancia desde el haz de los rayos X hasta el punto proyectado a 0,3cm mas allá de la barrera (m)

Para obtener el valor adecuado y reglamentario $H_{tot} < P$, se debe iterar el espesor de las láminas hasta conseguir el valor adecuado.

3.1.3 Tasa de dosis equivalente promediada (TARD, por sus siglas en ingles)

Cuando las barreras de blindaje se diseñan, es usual asumir una carga de trabajo el cual será eventualmente distribuido alrededor de un año. En ocasiones se logra utilizar el intervalo de una semana para valores de medición. Sin embargo, para mediciones y controles de calidad, se utiliza muy a menudo la tasa de dosis equivalente instantánea (IDR, por sus siglas en ingles), donde se coloca al acelerador en su máxima operación y en la pared más cercana se emite el haz, imitando la “peor” condición posible.

3.1.3.1 Tasa de dosis equivalente promedio en una semana

La tasa de dosis equivalente promedio en una semana (R_w) es el TARD en un lugar en específico en 40 horas de trabajo. En barreras primarias se obtiene

$$R_w = \frac{IDR W_{pri} U_{pri}}{\dot{D}_o} \quad (3.9)$$

Donde

R_w = TARD promediado semanal (Sv/semana)

$\dot{D}_o$ = tasa de dosis absorbida de salida en 1m (isocentro) (Gy/h)

W_{pri} = carga de trabajo semanal en la barrera primaria (Gy/semana)

U_{pri} = factor de uso

IDR =tasa de dosis equivalente instantánea (Sv/h) medida con un equipo donde la tasa de dosis absorbida de salida es $\dot{D}_o$. IDR es tomado a 30cm más allá de la barrera.

$$IDR = \frac{\dot{D}_o B_{pri}}{d_{pri}^2} \quad (3.10)$$

Donde

$\dot{D}_o$ = tasa de dosis absorbida de salida en 1m (isocentro) (Gy/h)

B_{pri} = es el factor de transmisión en la barrera primaria

d_{pri} = distancia desde el haz de los rayos X hasta el punto proyectado a 0,3cm mas allá de la barrera (m)

3.1.3.2 Tasa de dosis equivalente promediado en cualquier hora (R_h)

Este valor deriva de un máximo de número de pacientes que se pueden tratar en una hora. Entonces el límite de dosis en cualquier hora para barreras primarias

$$R_h = \left(\frac{N_{max}}{hN_h} \right) R_W \quad (3.11)$$

Donde

N_{max} = número máximo de pacientes tratados en una hora

h = hora máxima de trabajo por semana (normalmente son 40 horas)

N_h = numero promedio de pacientes tratados en una hora

R_W = TARD promediado semanal (Sv/semana)

No existe una regla establecida para este valor, sin embargo, en este trabajo se considerará un límite para este valor de $R_h < P$, de lo contrario se añadirán capas HVL hasta cumplir con el límite.

3.2 Barrera secundaria

Las barreras secundarias son necesarias para proteger al personal y público en general que se encuentra más allá del acelerador, estas barreras blindan ante la radiación de fuga debido al cabezal y la dispersa por el paciente. Normalmente se calculan por separado y posteriormente se intercomparan con la regla de las dos fuentes.

El primer paso es calcular el factor de transmisión debido al paciente

$$B_{ps} = \frac{P}{aWUT} d_{sca}^2 d_{sec}^2 \frac{400}{F} \quad (3.12)$$

Donde

P = la dosis objetivo (expresado en dosis equivalente) más allá de la barrera por un tiempo de una semana (Sv/semana)

W = carga de trabajo (Gy/semana)

U = factor de uso

T = factor de ocupación

F = tamaño del campo en el isocentro (cm^2)

d_{sca} = es la distancia de la fuente al isocentro (m)

d_{sec} = es la distancia del isocentro al punto de medición (m) (ver figura 3.7))

a = es la fracción de radiación dispersada por el paciente para un ángulo en particular (ver tabla IV)

Angulos (grados)	Fraccion de dispersion (a)			
	6 MV	10 MV	18 MV	24 MV
10	1.04×10^{-2}	1.66×10^{-2}	1.42×10^{-2}	1.78×10^{-2}
20	6.73×10^{-3}	5.79×10^{-3}	5.39×10^{-3}	6.32×10^{-3}
30	2.77×10^{-3}	3.18×10^{-3}	2.53×10^{-3}	2.74×10^{-3}
45	1.39×10^{-3}	1.35×10^{-3}	8.64×10^{-4}	8.30×10^{-4}
60	8.24×10^{-4}	7.46×10^{-4}	4.24×10^{-4}	3.86×10^{-4}
90	4.26×10^{-4}	3.81×10^{-4}	1.89×10^{-4}	1.74×10^{-4}
135	3.00×10^{-4}	3.02×10^{-4}	1.24×10^{-4}	1.20×10^{-4}
150	2.87×10^{-4}	2.74×10^{-4}	1.20×10^{-4}	1.13×10^{-4}

Tabla IV. Fracciones de dispersión a 1m desde un maniquí de tamaño humano, la distancia entre el maniquí y la fuente es de 1m, y el campo es de tamaño de 400cm^2 [2]

Teniendo el factor de transmisión debido a la dispersión del paciente (B_{ps}), se puede ahora calcular el espesor adecuado para atenuar dicha transmisión (t_{ps})

$$t_{ps} = TVL_1 + \left[\log \left(\frac{1}{B_{ps}} \right) - 1 \right] TVL_e \quad (3.13)$$

Donde TVL_1 es la primera capa decimo reductora y TVL_e es la de equilibrio, de un material dado

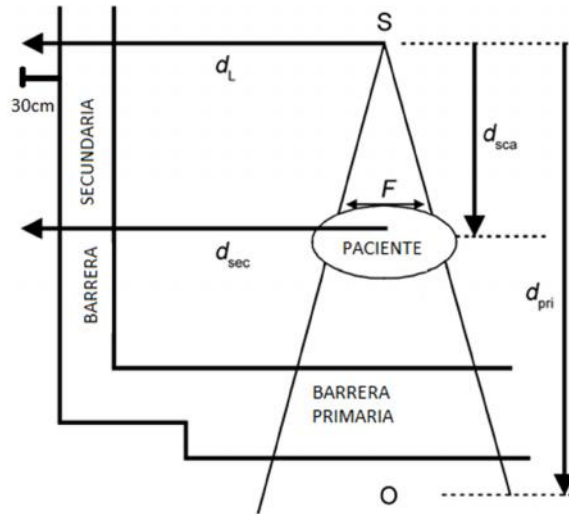


Figura 3.8 Cuarto de tratamiento mostrando las distancias importantes para cálculos de blindaje

Para el factor de transmisión considerando la radiación de fuga, se tiene

$$B_L = \frac{P d_L^2}{10^{-3} W_L T} \quad (3.13)$$

Donde

T = factor de ocupación

P = la dosis objetivo (Sv/semana)

d_L = es la distancia del isocentro al punto de medición (m)

W_L = es la carga de trabajo para fugas (Gy/semana)

El factor 10^{-3} se debe a que se considera que la fuga de radiación por el cabezal es del 0,1%.

Lo mismo se aplica como la ecuación 3.12, para obtener el espesor (t_L) necesario para atenuar la radiación debido a fugas, utilizando el factor de transmisión B_L

$$t_L = TVL_1 + \left[\log \left(\frac{1}{B_L} \right) - 1 \right] TVL_e \quad (3.14)$$

Donde TVL_1 es la primera capa decimo reductora y TVL_e es la de equilibrio, de un material dado

Para barreras secundarias, se aplica la regla de las dos fuentes, tomando en cuenta t_L y t_{ps} .

3.2.1 Tasa de radiación promedio semanal

En el caso de las barreras secundarias, el caso es un poco diferente, ya que en estas barreras, los valores considerados son los de radiación de fuga y dispersa por el paciente.

$$R_W = \left(IDR_L \frac{W_L}{D_0} \right) + \left(IDR_{ps} \frac{W U}{D_0} \right) \quad (3.15)$$

Donde

$$IDR_{ps} = \frac{\dot{D}_0 \alpha F B_{sca}}{400 d_{sec}^2} \quad (3.16a)$$

$$IDR_L = \frac{\dot{D}_0 B_L}{10^3 d_L^2} \quad (3.16b)$$

IDR_L = tasa de dosis equivalente medida en un punto ubicado a 30cm mas alla de la barrera secundaria en ausencia de un maniquí en el isocentro.

IDR_{ps} = tasa de dosis equivalente en el mismo punto, debido a la dispersión del paciente

W_L = es la caga de trabajo para fugas (Gy/semana)

$\dot{D}_0$ = tasa de dosis absorbida de salida en 1m (isocentro) (Gy/h)

W = carga de trabajo (Gy/semana)

U = factor de uso

α = factor de dispersión según el ángulo

F = tamaño máximo del campo (m^2)

B_{sca} = factor de transmisión debido a los fotones dispersos

d_{sec} = distancia desde el isocentro al punto de medición (m)

B_L = factor de transmisión debido a la radiación por fugas

d_L = distancia desde el isocentro al punto de medición (m)

Y para la tasa de radiación promedio a cualquier hora R_h , se utiliza la misma ecuación 3.11.

3.3 Puertas y laberintos

El acceso a la instalación se puede realizar mediante dos maneras, una puerta mas laberinto o una puerta de acceso directo. Se debe tomar con precaución la ubicación del mismo, considerando que únicamente se diseña para radiaciones secundarias, por lo tanto no puede ser en una barrera primaria. En el caso de las instalaciones con laberinto, primero se toma en cuenta el espesor de la pared interna y luego la puerta, entre más largo y ancho es el laberinto, más ligera puede ser la puerta. Si en otro caso se utiliza una puerta de acceso directo, se debe tomar mucha precaución para evitar fugas, este tipo de accesos están reservadas exclusivamente para instalaciones con aceleradores de bajas energías, ya que si se blindo con una puerta directa una instalación de alta energía, esta sería muy pesada.

3.3.1 Instalaciones con laberintos y puerta

Para las instalaciones con laberinto, se debe tomar en cuenta los fotones producidos por las fugas y dispersión que logran pasar (o atravesar) el laberinto hasta la puerta. Las radiaciones (en dosis equivalente) a considerar en el laberinto son

1. $H_S = \text{dosis equivalente semanal debido al haz primario dispersado en la pared A (ver figura 3.9).}$

$$H_S = \frac{W U_A \alpha_0 A_0 \alpha_z A_z}{(d_h d_r d_z)^2} \quad (3.171)$$

Donde

W = carga de trabajo (Gy/semana)

U_A = factor de uso en la pared A

α_0 = coeficiente de reflección en la superficie A_0 (todos los coeficientes de reflección se encuentran tabulados en el NCRP 151)

A_0 = área de proyección del campo F sobre la pared A (m^2)

α_z = coeficiente de reflección de la superficie A_z (se asume que el fotón ya tiene una energía de 0,5MeV)

A_z = área de proyección de A_0 sobre la pared externa del laberinto (m^2)

d_h = distancia perpendicular desde la fuente al punto central de la superficie A_0 (es decir, la distancia d_{pp} más 1m de distancia) (m)

d_r = distancia desde el punto central de la superficie A_0 al punto b en la línea media del laberinto (m)

d_z = la distancia desde el punto central del laberinto a la puerta (m)

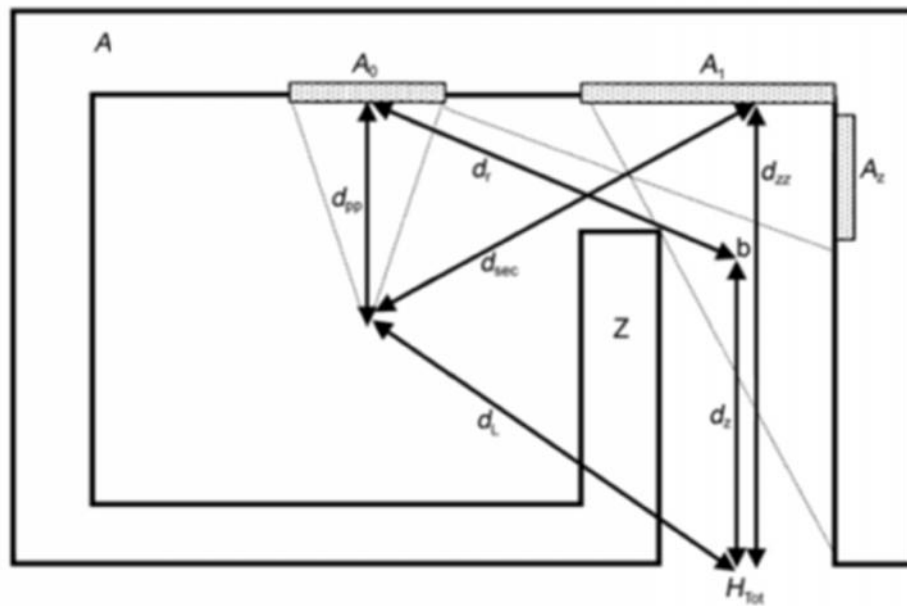


Figura 3.9 Esquema de las distancias en instalaciones de radioterapia con laberinto [2]

En la ecuación 3.17I se habla de la dosis si el eje del gantry se encuentra perpendicular al laberinto, en el caso que sea paralelo, esta ecuación es la única modificada, y se toma en cuenta de la siguiente manera [10]

$$H_S = \frac{W U_P \alpha_P A_P}{(d_P d'')^2} \quad (3.17II)$$

Donde

$W \approx$ carga de trabajo (Gy/semana)

U_P = factor de uso en la pared P (que normalmente se toma como 1[10])

α_P = coeficiente de reflexión en la superficie A_P

A_P = área de proyección del campo F sobre la pared A (ver figura 3.10) (m^2)

d_P = distancia perpendicular desde la fuente al punto central de la superficie A_P (m)

d'' = distancia desde el punto central P en la línea media del laberinto hasta la entrada (m)

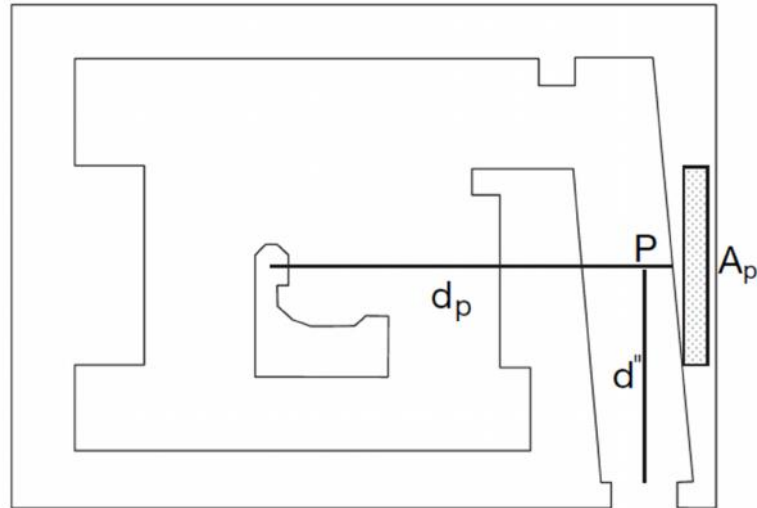


Figura 3.10 Esquema de las distancias necesarias para calcular las dosis H_S en un bunker donde el laberinto está ubicado paralelo al eje del gantry.

2. H_{LS} = dosis equivalente semanal debido a la fuga de fotones por el cabezal del acelerador dispersado por la pared A_1 opuesta a la puerta (puede ocurrir que los fotones que chocan con dicha pared, alcancen escapar por el laberinto hasta la puerta)

$$H_{LS} = \frac{W_L U_A \alpha_1 A_1 L_f}{(d_{sec} d_{zz})^2} \quad (3.18)$$

Donde

W_L = carga de trabajo debido a fugas (Gy/semana)

U_A = factor de uso en la pared A

α_1 = coeficiente de reflexión de la superficie A_1

A_1 = superficie de la pared A que puede ser vista desde el laberinto (m^2)

L_f = coeficiente debido a la radiación de fuga por el cabezal del acelerador, normalmente se toma el valor de 10^{-3} , es decir que solo el 0,1% de la radiación producida se escapa por el cabezal.

d_{sec} = distancia del isocentro al punto central de la superficie A_1 (m)

d_{zz} = distancia del punto central de la superficie A_1 a la puerta

3. H_{ps} = dosis equivalente semanal debido a la radiación primaria dispersada por el paciente en un ángulo en específico

$$H_{ps} = \frac{W U_A \alpha_1 A_1 \left(\frac{F}{400}\right) a(\theta)}{(d_{sca} d_{sec} d_{zz})^2} \quad (3.19)$$

Donde

W = la carga de trabajo (Gy/semana)

U_A = factor de uso en la pared A

α_1 = coeficiente de reflexión de la superficie A_1

A_1 = superficie de la pared A que puede ser vista desde el laberinto (m^2)

F = tamaño del campo en el isocentro (cm^2)

$a(\theta)$ = fracción de dispersión por el paciente a un ángulo específico θ (ver tabla IV)

d_{sca} = distancia desde la fuente al isocentro

d_{sec} = distancia del isocentro al punto central de la superficie A_1 (m)

d_{zz} = distancia del punto central de la superficie A_1 a la puerta (m)

4. H_{LT} = dosis equivalente semanal debido a la radiación de fuga del cabezal transmitida a través de la pared interna del laberinto (pared Z)

$$H_{LT} = \frac{W_L U_A L_f B_Z}{(d_L)^2} \quad (3.20)$$

Donde los factores desconocidos son

W_L = la carga de trabajo debido a las fugas (Gy/semana)

U_A = factor de uso en la pared A

L_f = coeficiente debido a la radiación de fuga por el cabezal del acelerador, normalmente se toma el valor de 10^{-3} , es decir que solo el 0,1% de la radiación producida se escapa por el cabezal.

B_Z = factor de transmisión para la pared Z (laberinto interior)

d_L = la distancia de la fuente a la puerta a través de la pared interna del laberinto (m)

Determinando los 4 componentes por separado explicado anteriormente, ahora se calcula la dosis equivalente total en el laberinto donde el haz es desviado por la pared A.

$$H_A = f H_S + H_{LS} + H_{ps} + H_{LT} \quad (3.21)$$

Donde

f = fracción de radiación primaria que atraviesa al paciente es [10]

Energía	Co-60	6MV	10MV	15MV	18MV	25MV
Transmisión f	0.15	0.23	0.28	0.33	0.34	0.38

Con este valor, se obtiene la dosis equivalente para una pared primaria, correspondiendo sólo la cuarta parte del factor de uso de toda la instalación, para calcular el total, no se estima un factor de 4, sino de 2,64[6]

$$H_{tot} = 2,64 H_A \quad (3.22)$$

Existe otro parámetro que se debe tomar en cuenta para que la ecuación 3.22 sea válida, las dimensiones del laberinto, deben cumplir que

$$2 < \frac{d_{zz}}{\sqrt{\text{anchura} \times \text{altura del laberinto}}} < 6 \quad (3.23)$$

Y

$$1 < \frac{\text{altura del laberinto}}{\text{anchura del laberinto}} < 2 \quad (3.24)$$

Teniendo estos valores, ya se tienen todas las contribuciones de la dosis, cuando se habla de aceleradores de baja energía, y se pasa a calcular el blindaje de la puerta

$$t_{puerta} = TVL_{puerta} \log\left(\frac{1}{B_{puerta}}\right) \quad (3.25)$$

Donde

B_{puerta} = factor de transmisión debido a la puerta

$$B_{puerta} = \frac{P}{H_{TOT}} \quad (3.26)$$

TVL_{puerta} = capa decimorreductora para fotones de 0,2MV (mm)¹³

Hasta aquí se calcula la dosis equivalente si el acelerador es de bajas energías, ahora, si el acelerador es de altas energías, hay que considerar los fotones gamma de captura neutrónica y los fotoneutrones.

La dosis equivalente total para **aceleradores de alta energía**, sería

$$H_W = H_{tot} + H_{cg} + H_n \quad (3.27)$$

¹³ Se acostumbra usar plomo para este tipo de blindaje (TVL=5mm)

Donde

1. H_{cg} = dosis equivalente debido a los fotones gamma de captura neutrónica

$$H_{cg} = W_L K \left(\frac{\beta Q_n}{4\pi d_1^2} + \frac{5,4\beta Q_n}{2\pi S_r} + \frac{1,3Q_n}{2\pi S_r} \right) 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} \quad (3.28)$$

Con

W_L = la carga de trabajo debido a las fugas (Gy/semana)

K = eficiencia de fotones de captura neutrónica por unidad de fluencia. Un valor promediado es de $6,9 \times 10^{-16} \text{Sv m}^2$ [8]

β = factor de transmisión para neutrones que penetra el blindaje del cabezal

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{para plomo} \\ 0,85, & \text{para tungsteno} \end{cases} \quad (\text{el material del cabezal})$$

Q_n = intensidad neutrónica emitida desde el cabezal por cada Gy absorbido en el isocentro (n/Gy) (ver tabla V)

d_1 = distancia del isocentro al punto E (m) (ver figura 3.9)

d_2 = distancia del punto E a la puerta (m)

S_r = área de la superficie total del cuarto (m^2)

TVD = distancia decimorreductora. Esta es la distancia necesaria para que el haz descienda diez veces su valor original (m)

$$TVD = \begin{cases} 3,9m, & E < 15M \\ 5,4m, & E \geq 18M \text{ a } 25M \end{cases}$$

Y por ultimo

1. H_n = dosis equivalente semanal (Sv/semana) debido a los neutrones

$$H_n = W_L H_{n,D} \quad (3.27)$$

Donde

W_L = la carga de trabajo debido a las fugas (Gy/semana)

$H_{n,D}$ = dosis equivalente neutrónica en la entrada del laberinto (Sv/Gy)

d_1 = distancia del isocentro al punto A (m) (ver figura 3.9)

d_2 = distancia del punto A a la puerta (m)

El otro método para calcular esta dosis equivalente, es la de McGinley

$$H_{n,D_McGinley} = 2,4 \cdot 10^{-15} \varphi_A \sqrt{\frac{S_0}{S_1}} \cdot \left[1,64 \cdot 10^{-\left(\frac{d_2}{1,9}\right)} + 10^{-\left(\frac{d_2}{TVD}\right)} \right] \quad (3.29)$$

Donde

TVD = distancia decimorreductora (m)

$$TVD = 2,06 \sqrt{S_1} \quad (3.29a)$$

S_0 = área de acceso al laberinto (m^2) (ver figura 3.9)

S_1 = área transversal del laberinto (m^2)

d_1 = distancia del isocentro al punto A (m) (ver figura 3.9)

d_2 = distancia del punto A a la puerta (m)

φ_A = es la fluencia de neutrones por unidad de dosis absorbida de fotones ($m^{-2}Gy^{-1}$) en el isocentro

$$\varphi_A = \frac{\beta Q_n}{4\pi d_1^2} + \frac{5,4\beta Q_n}{2\pi S_r} + \frac{1,3Q_n}{2\pi S_r} \quad (3.30)$$

β = factor de transmisión para neutrones que penetra el blindaje del cabezal

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{para plomo} \\ 0,85, & \text{para tungsteno} \end{cases} \quad (\text{el material del cabezal})$$

Q_n ≈ intensidad neutrónica emitida desde el cabezal por cada Gy absorbido en el isocentro (n/Gy) (ver tabla V)

d_1 = distancia del isocentro al punto A (m) (ver figura 3.9)

S_r = área de la superficie total del cuarto (m^2)

Vendor	Model	Endpoint Energy (MV)		H_0	Q_n	Reference
		Nominal	Using AAPM (1983)	mSv / Gy	Neutrons per gray ($\times 10^{12}$)	
Varian	1800	18	16.6	1.02 – 1.6	1.22	McGinley (2002)
	1800	15		0.79 – 1.3	0.76	McGinley (2002)
	1800	10		0.04	0.06	McGinley (2002)
	2100C ^a	18			0.96	Followill <i>et al.</i> (2003)
	2100C ^a	18			0.87	Followill <i>et al.</i> (2003)
	2300CD	18			0.95	Followill <i>et al.</i> (2003)
	2500	24			0.77	Followill <i>et al.</i> (2003)
Siemens	KD	20	16.5	1.1 – 1.24	0.92	McGinley (2002)
	MD ^a	15		0.17	—	McGinley (2002)
	MD2	10			0.08	Followill <i>et al.</i> (2003)
	MD ^a	15			0.2	Followill <i>et al.</i> (2003)
	KD	18			0.88	Followill <i>et al.</i> (2003)

Tabla V. Dosis equivalente de neutrones (H_0) en 1,41m de la fuente por unidad de dosis absorbida de los rayos X en el isocentro (mSv/Gy) y el número total de neutrones (Q_n) emitidos por el cabezal del acelerador [2].

Teniendo las contribuciones necesarias de la dosis, se deben calcular los factores de transmisión, a continuación se supone que la contribución de los fotones y los neutrones representan cada uno el 50% del límite de dosis de la zona [2]

$$B_{puerta.tot} = \frac{P}{2H_{tot}} \quad (3.31)$$

De esta manera, se puede calcular el espesor de la puerta [4]

$$t_{puerta.fotones.tot} = TVL_{puerta.tot} \log \left(1/B_{puerta.tot} \right) \quad (3.32)$$

Donde

$TVL_{puerta.tot}$ = capa decimorreductora para fotones de 0,2MV (mm)

Normalmente se acostumbra usar plomo para este blindaje (TVL=5mm)

Para los fotones generados por la captura neutrónica, se tiene

$$B_{puerta.cg} = \frac{P}{2H_{cg}} \quad (3.33)$$

Calculando de esta manera, el espesor

$$t_{puerta.fotones.cg} = TVL_{puerta.cg} \log \left(\frac{1}{B_{puerta.cg}} \right) \quad (3.34)$$

Donde

$TVL_{puerta.cg}$ = capa decimorreductora para fotones de 3,6MV¹⁴

Como se acostumbra usarse plomo, el TVL necesario es de 61mm

Obteniendo el espesor debido a los fotones tanto en la ecuación 3.34 como en la 3.32, se suman.

Ahora, debido a los neutrones el espesor de la puerta debe ser

$$t_{puerta.n} = TVL_{puerta.n} \log \left(\frac{1}{B_{puerta.n}} \right) \quad (3.35)$$

Donde

$TVL_{puerta.n}$ = capa decimorreductora para neutrones de 0,1MV (mm)

Se acostumbra usar polietileno borado para el blindaje de los neutrones (TVL=45mm)

$$B_{puerta.n} = \frac{P}{2H_n} \quad (3.36)$$

Lo que se acostumbra es utilizar una lámina de polietileno borado en el centro y situar en ambos lados (como un emparedado) láminas de plomo iguales.

¹⁴ Debido a que el espesor del TVL es mucho mayor al del TVL para 0.2MeV para fotones de dispersión y transmisión, se realiza una comparación, si el espesor del $t_{puerta.fotones.cg}$ es mayor al TVL para 0.2MeV, entonces el espesor de plomo de la puerta solo será debido a H_{cg} , en cambio, si este espesor es inferior, se sumara el espesor calculado debido a los fotones con 0.2MeV.

3.3.2 Puertas de acceso directo

En algunos casos, la mejor opción es hacer una puerta sin laberinto, ya que existen casos en donde el espacio es reducido y se hace casi imposible construir un laberinto, por lo tanto, se hace una puerta blindada de acceso directo. Esta puerta se blindade igual manera como la barrera secundaria. Los materiales que normalmente se utilizan son plomo y acero laminado con BPE (polietileno borado), si existen fotoneutrones. Estas puertas están recubiertas con acero por todos lados para mejor blindaje, y la concentración de boro suele ser del 5%. Estas puertas suelen ser muy pesada (entre 8000Kg y 9000Kg), por lo tanto se hacen las puertas corredizas o con brazos mecánicos para poderlos mover, esto también depende de los recursos con los cuales se cuenta y la practicidad del mismo. Las instalaciones de estas puertas vienen acompañadas con blindajes en las paredes adyacentes para evitar fugas en lo mínimo en todas direcciones.

El principal problema se muestra en la figura 3.10, donde hay tres rayos. Como se puede observar, los rayos atraviesan solo una parte del blindaje, en algunos casos para evitar esto, se hace la puerta mucho más larga o cubriendo los bordes de las paredes por donde atraviesan estos rayos, con plomo y BPE (ver figura 3.12)

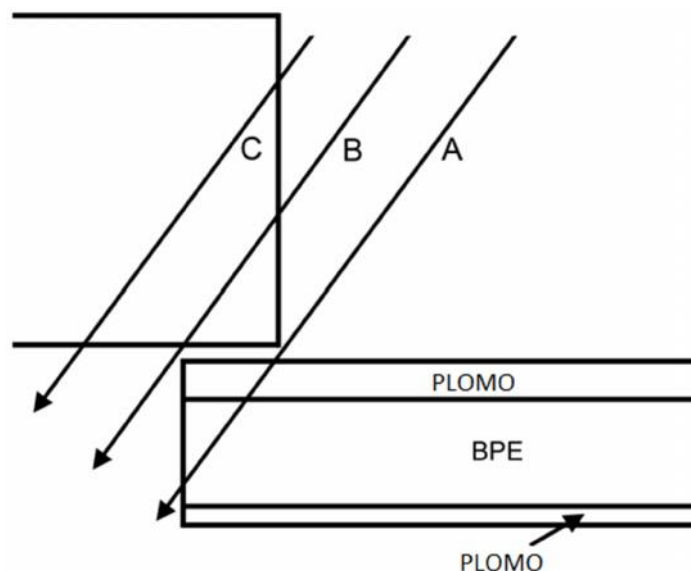


Figura 3.12. Blindaje incompleto de una puerta

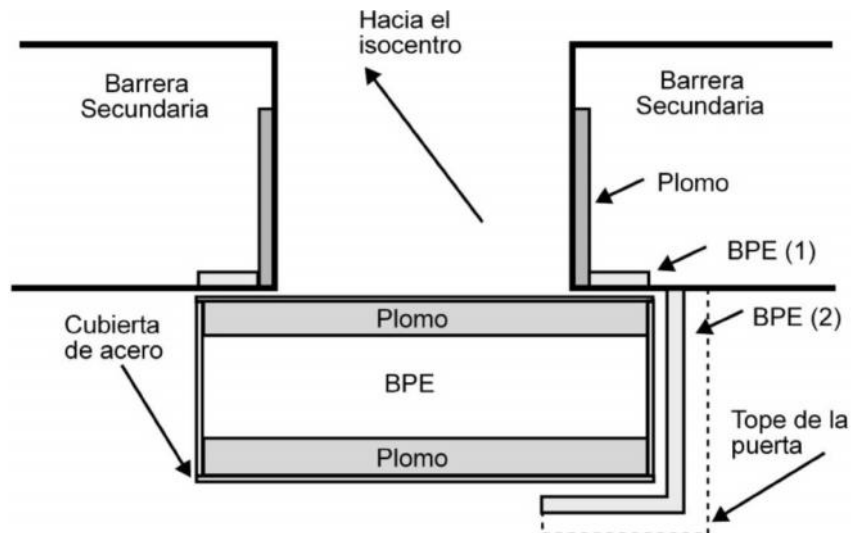


Figura 3.13. Alternativa para evitar fugas [4]

En algunos casos se blindan las paredes adyacentes con plomo y BPE, también se puede blindar mejor la puerta, agregándole más laminas, pero esto significaría mayor peso, esto se traduce a mayor tiempo en abrir y cerrar la puerta y un mejor sistema de brazos mecánicos. Otra consideración en este tipo de instalaciones es el tope de la puerta, el cual debe ser de concreto para evitar posibles fugas.

3.4 Consideraciones

Los fotones son capaces de lograr escapar del cuarto de tratamiento por los lugares más vulnerables, tal como los conductos necesarios para el traslado de cables utilizados para el monitoreo, controles de calidad, agua, electricidad, entre otros, otra posible fuga que se debe tomar en cuenta es cuando se tiene un cuarto hecho de barreras laminadas de metal, ya que son delgadas y los fotones pueden lograr dispersarse por el suelo, además de esto, el descuido que normalmente se tiene del

techo, puede causar problemas a la hora de las fugas, en este estudio, explicaremos algunas técnicas de blindaje para su bloqueo.

3.4.1 Conductos

Los conductos es otra consideración importante a la hora de construir el cuarto de tratamiento. Las consideraciones para su construcción dependerán de su función y tamaño necesario. Los conductos más grandes son usualmente para propósitos HVAC (calentamiento, ventilación y aire acondicionado, en inglés), y dos conductos (entrada y salida) para el cuarto de tratamiento. Los conductos más grandes (30x10cm) son normalmente para los cables de la máquina. También puede ser de forma circular, donde su diámetro no debe ser mayor a 10cm, allí es donde se transportan los cables para controles de calidad, mediciones físicas e inclusive cables para el monitoreo a tiempo real de parámetros específicos del paciente durante el tratamiento. Otros conductos necesarios son para la electricidad y agua, que tampoco deben medir más de 10cm de diámetro.

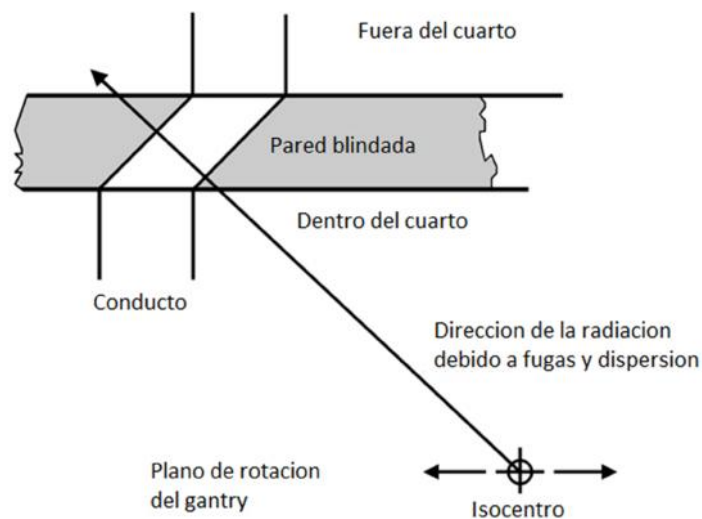


Figura 3.14 Dirección y abertura posible para un ducto.

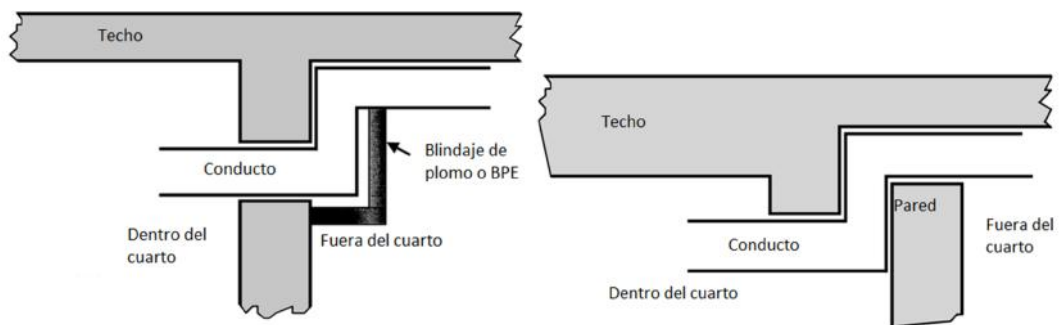


Figura 3.15 Formas de pasar conductos a través del techo

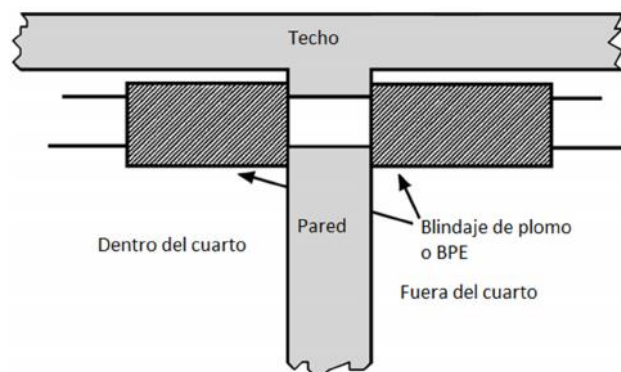


Figura 3.16. Conducto blindado en ambos lados de la barrera (pared)

Existen diferentes maneras de construirlo correctamente para evitar fugas, uno es desplazando el ángulo del conducto en la pared blindada, en orientación perpendicular a las radiaciones secundarias (ver figura 3.14), son las radiaciones secundarias ya que estos tienen que estar contruidos solo en barreras secundarias, jamás en las primarias. Otra posible solución es entre el techo y la pared, desviándolo 90 grados y/o apantallados con hormigón y plomo (ver figuras 3.15 y 3.16), pero siempre respetando de que la pared sea una barrera secundaria.

3.4.2 Fugas debido al suelo

En algunos casos, debido al espacio, se considera construir el cuarto sólo con barreras metálicas, siendo las barreras considerablemente delgadas, estas láminas son prácticas por el espacio y construcción, sin embargo, debido a lo delgado de la

barrera resultante, puede ser un problema entre el piso y la barrera, donde existe la posibilidad de que la radiación logre escapar debido a su dispersión (ver figura 3.17). Cuando este es el caso, se recomienda blindar el suelo en las posiciones más desfavorables.

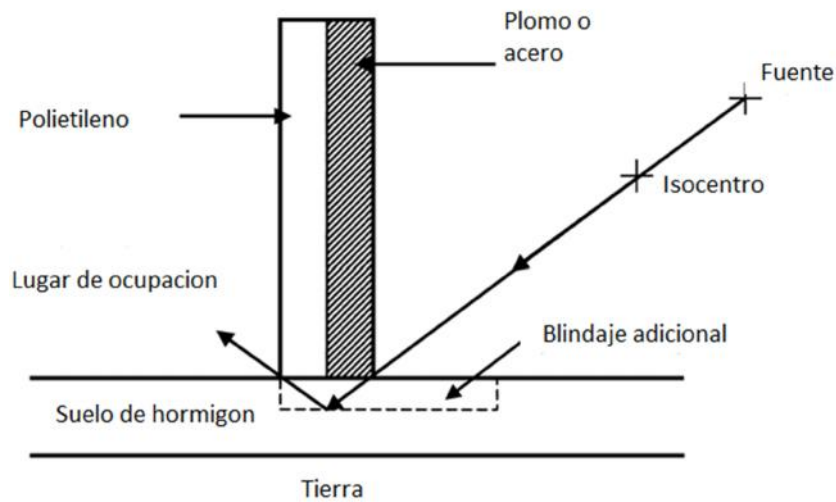


Figura 3.17 Consideraciones debido a barreras delgadas

3.4.3 Radiación dispersada desde el techo

Existen muchas instalaciones que son diseñadas con poco blindaje en el techo, debido al factor peso, monetario y cuando no existen oficinas ni personal arriba, solo el sistema de aire. Sin embargo esto podría ser un problema debido a la radiación dispersada por la atmosfera, logrando llegar al suelo o alguna oficina adyacente a la instalación. En la figura 3.18 muestra cómo puede ocurrir esta dispersión, la tasa dosis equivalente en una distancia d_s (metros) desde el isocentro seria

$$\dot{H} = \frac{2,5 \times 10^7 (B_{XS} \dot{D}_0 \Omega^{1,3})}{(d_i d_s)^2} \quad (3.37)$$

Donde

B_{XS} = es el factor de transmisión debido a fotones

Ω = es el ángulo sólido subtendido por el máximo tamaño del campo (radianes)

$\dot{D}_0$ = tasa absorbida en el isocentro a 1m de la fuente (Gy/h)

d_i = la distancia vertical desde la fuente a un punto 2m por encima del techo (m)

d_s = distancia horizontal del isocentro a más allá de la pared exterior (m)

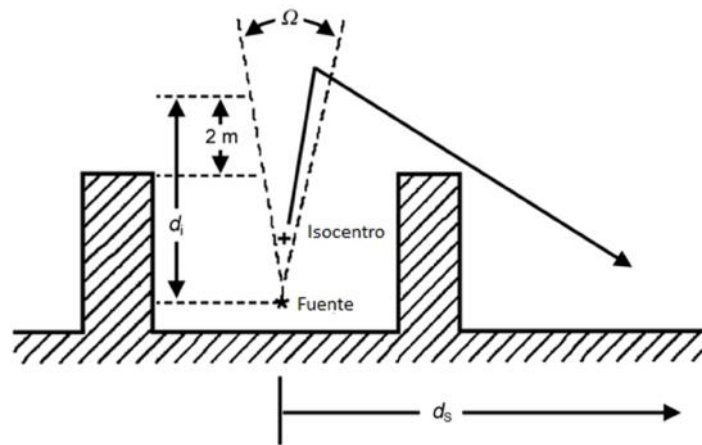


Figura 3.18 Esquema simplificado mostrando como ocurre la dispersión por la atmósfera.

En el caso de equipos de altas energías, para considerar los neutrones, el ángulo sólido abarca un ángulo desde la fuente hasta las paredes y ahora d_i empieza desde la fuente hasta la distancia de 2m más allá del techo (ver figura 3.19), la tasa de dosis equivalente de neutrones viene dado por

$$\dot{H}_n = \frac{0,68 H_{ns} \beta Q_n \dot{D}_0 \Omega}{d_i^2} \quad (3.38)$$

Donde

H_{ns} = la relación de la dosis equivalente 2m más allá del techo por flujo de neutrones incidentes en el techo ($\text{Sv cm}^2/\text{n}$). En la figura 3.18 muestra como es la fluencia de estos electrones en el hormigón.

β = factor de transmisión para neutrones que penetra el blindaje del cabezal

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{para plomo} \\ 0,85, & \text{para tungsteno} \end{cases} \quad (\text{el material del cabezal})$$

Q_n = intensidad neutrónica emitida desde el cabezal por cada Gy absorbido en el isocentro (n/Gy) (ver tabla V)

$\dot{D}_0$ ≈ tasa de dosis absorbida en el isocentro (Gy/h)

Ω = ángulo sólido del tamaño máximo del campo (radianes), ver figura 3.17

d_t = distancia vertical de la fuente en la posición superior a un punto 2m por encima del techo (m)

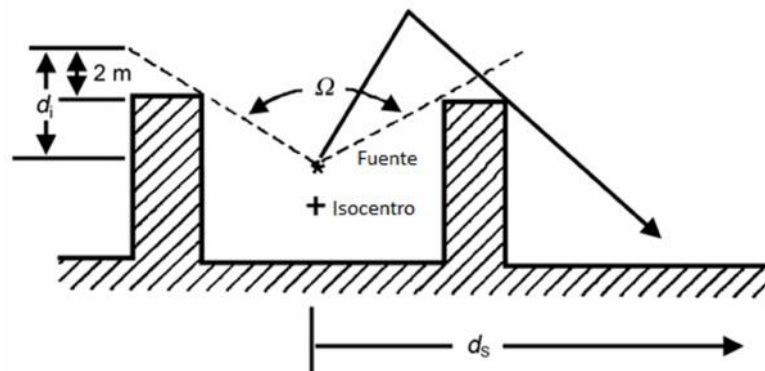


Figura 3.19 esquema simplificado mostrando como ocurre la dispersión por la atmosfera para equipos con altas energías

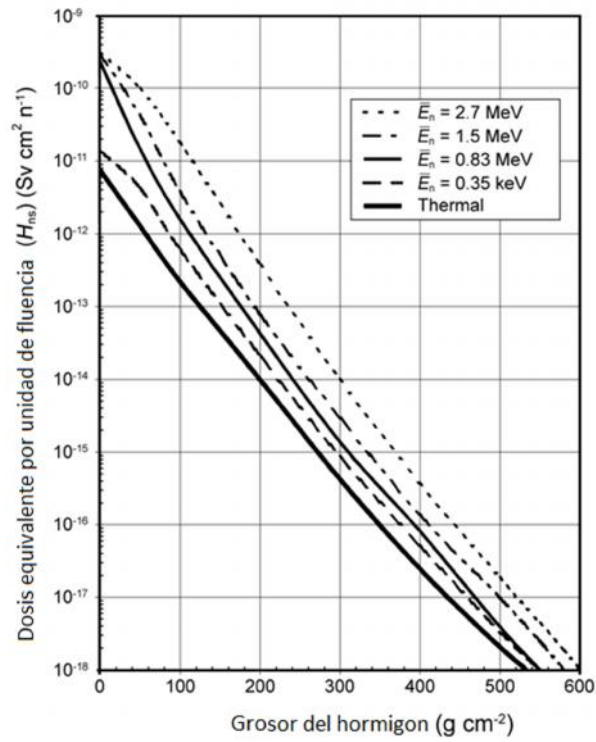


Figura 3.20 Dosis equivalente calculada transmitida por unidad de fluencia de neutrones con una energía promedio de $\bar{E}_n$ incidente normalmente en placas de hormigón [2]

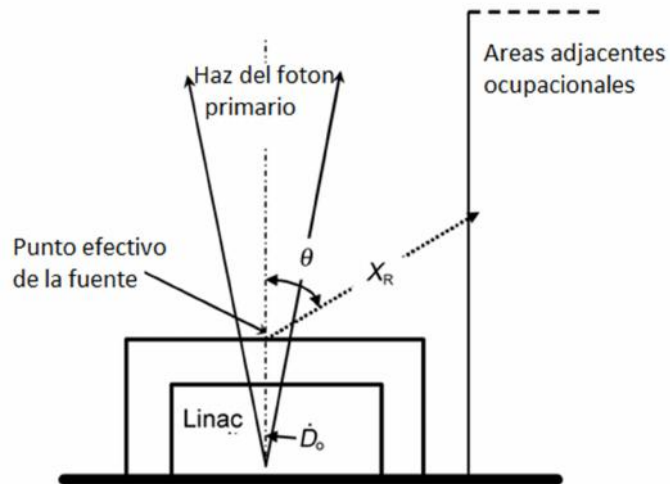


Figura 3.21 Radiación debido a fotones dispersados desde el techo.

En algunas instalaciones ocurre que en sus adyacencias se encuentran edificaciones los cuales pueden estar ocupados, debido a que se pueden desviar los fotones desde el techo, existe una ecuación empírica de la contribución de la radiación debido a estos fotones dispersados

$$\dot{H}_{ss} = \frac{\dot{D}_0 F f(\theta)}{X_R^2 10^{1 + \left[\frac{(t - TVL_1)}{TVL_e} \right]}} \quad (3.39)$$

Donde

$\dot{H}_{ss}$ = tasa de dosis equivalente debido a la dispersión (side-scattered en inglés, por eso las ss)

$\dot{D}_0$ = tasa de dosis absorbida de los rayos X del acelerador a una distancia de 1m de la fuente (Gy/h)

F = área del campo cuadrado a una distancia de 1m de la fuente (m²)

$f(\theta)$ = distribución angular de los fotones dispersados por el techo (ver tabla VI y figura 3.19)

X_R = distancia desde el centro del haz en el tope del techo hasta el punto de interés (m)

t = espesor del techo (m)

TVL_e y TVL_1 = son las láminas (de equilibrio y primera) décimorreductoras (tabla III) de la radiación primaria en el blindaje del techo, respectivamente (m).

Angulo (θ)	Funcion de distribucion angular $[f(\theta)]$
20	0.38
30	0.26
40	0.16
50	0.10
60	0.065
70	0.035
80	0.014
85	0.005

Tabla VI. Función de distribución angular $f(\theta)$ para fotones desviados desde el techo.

3.5 Técnicas especiales

Debido al avance en las técnicas de tratamiento, no siempre se aplica la carga de trabajo y factor de uso utilizado en técnicas convencionales. Por lo tanto se deben aplicar consideraciones excepcionales cuando las técnicas son distintas a las convencionales.

3.5.1 Consideraciones para irradiación de cuerpo entero

Este tratamiento consiste en irradiarle el cuerpo entero al mismo tiempo al paciente, colocándolo a una distancia necesaria, en una de las barreras primarias del cuarto de tratamiento.

Cuando la irradiación es cuerpo entero, la carga de trabajo primaria y de fugas es significativamente más alta que los tratamientos de radioterapias convencionales, ya que se utilizan distancias extendidas del tratamiento. Por lo tanto, esta carga de trabajo (W_{TBI}) este es el producto de la dosis absorbida TBI semanal total (D_{TBI}) por el cuadrado de la distancia del tratamiento (d_{TBI}), tal y como se muestra en la siguiente ecuación

$$W_{TBI} = D_{TBI}d_{TBI}^2 \quad (3.37)$$

3.5.2 Consideraciones para radioterapia con intensidad modulada (IMRT)

La IMRT consiste en pequeños haces producidos por colimadores multiláminas y conos con aberturas estrechas. Debido a los pequeños tamaños de campo y el gran número de haces usados, las unidades de monitor totales son mucho más elevadas que las requeridas para radioterapia convencional. Existe un factor (C_I) el cual define la relación entre el promedio de unidades de monitor utilizadas en IMRT, entre las unidades de monitor usadas en radioterapia convencional. De esta manera, se obtiene la carga de trabajo debido a las fugas:

$$W_L = W_{conv}(1 - \%_{IMRT}) + W_{conv}C_I \%_{IMRT} \quad (3.38)$$

Donde

$\%_{IMRT}$ = es el porcentaje de pacientes tratados con IMRT

Si en un acelerador, si se utilizan distintas técnicas de tratamiento, se debe tomar en cuenta la carga de trabajo total para luego realizar los cálculos para el blindaje. Normalmente se tiene que la carga de trabajo debido a fugas es modificada de la siguiente manera

$$W_L = W_{conv} + W_{TBI} + C_I W_{IMRT} + C_{QA} W_{QA} + \dots \quad (3.41)$$

Donde

$C_{QA} W_{QA}$ Está determinado por las fugas ocasionadas a la hora de realizar los controles de calidad los cuales deben ser diarios, semanales y otros mensuales.

3.5.3 Consideraciones para tomoterapia

La tomoterapia es un método de radioterapia que combina los principios de la tomografía computarizada con IMRT. Esta técnica se utiliza en aceleradores de 6MV, junto con un gantry tipo tomógrafo computarizado y colimadores multiláminas, el tamaño del campo es de 40cms aproximadamente por unos pocos centímetros de espesor. Este equipo va girando tal cual un tomógrafo alrededor del paciente mientras que la intensidad del haz de radiación es modulada mientras que el paciente es trasladado a través del gantry. Mientras el haz es emitido, el lado opuesto del mismo es opacado por el mismo gantry, debido a esto, el espesor de las barreras primarias deben ser más estrechas que las del tratamiento convencional, sin embargo, son 1TVL más gruesas. En cambio, para las barreras secundarias se debe proteger más debido a la radiación de fuga, siendo hasta 2TVL más gruesas, estas barreras secundarias, a las de radioterapia convencional. Por lo tanto, el factor utilizado normalmente para la carga de trabajo debido a fugas en este tipo de instalaciones es:

$$W_L = 16W_{conv} \quad (3.39)$$

3.5.4 Brazo robótico

Un equipo de radiocirugía estereostática (SRS por sus siglas en inglés) consiste en una fuente de rayos X de 6MV en un brazo robótico, en principio, este haz primario puede apuntar a cualquier dirección del cuarto de tratamiento, exceptuando el techo. Para una máquina de Cyberknife®, el promedio de unidades de monitor transmitido viene dado por un factor C_I de 15 aproximadamente. El tamaño máximo del campo a una distancia de 80cm del haz, es de 6cm de diámetro (el campo es circular). Debido al pequeño tamaño del campo, el factor de uno U se fija en 0,05. Todas las paredes del cuarto de tratamiento se consideran como barreras primarias exceptuando el techo que es el único considerado como barrera secundaria. La carga de trabajo debido a fugas es entonces 15 ($C_I = 15$) veces mayor al tratado convencionalmente [2]

$$W_L = C_I W_{conv} \quad (3.40)$$

La carga de trabajo recomendada por cada paciente es de 8Gy/paciente a 1m de distancia, o lo que es igual 12,5Gy/paciente a 80cm de la superficie del paciente.

3.5.5 Unidades de radioterapia intraoperatoria

Existe un tratamiento que permite la administración directa de haces de electrones al tumor o área a tratar. Estos equipos pueden utilizarse en los cuartos de operación sin ningún blindaje [2], siempre y cuando el tiempo de exposición no sobrepase 30min/semana. La radiación de fuga es muy baja, porque no se utilizan imanes de flexión, además de esto, es baja la producción de bremsstrahlung porque el recorrido del haz se cubre con materiales de bajo Z y por ultimo utilizan bajas energías para evitar la producción de neutrones. Estas consideraciones deben estudiarse con delicadeza para poder concluir que no es necesario el blindaje en estos cuartos de tratamiento.

3.5.6 Unidades de Cobalto-60

Estas unidades constan de una fuente de ^{60}Co con una actividad mayor a 10^{16}Bq . El isótopo produce rayos γ , estos rayos emiten energías de 1,17MeV y 1,33MeV y la vida media es de 5,27años. El equipo tiene una bomba o pistón neumático para el desplazamiento del isótopo el cual guarda o expone dicho isótopo para el tratamiento. El haz es colimado según el tamaño y forma de campo necesario, utilizando cuñas y barras. El gantry es capaz de girar alrededor del paciente. Su eje o isocentro varía entre 60cm y 100cm dependiendo del modelo del equipo. El espesor requerido para las barreras se calcula con los métodos mencionados en la sección 3.2 y 3.3. El valor requerido para el blindaje, debe ser de 0.02mSv a cualquier hora (R_h). La tasa de dosis equivalente instantánea debe estimarse en el punto de interés asumiendo la tasa de dosis absorbida máxima. Para calcular R_h se utiliza la ecuación 3.11, utilizando la carga de trabajo semanal y estimando el número máximo de pacientes que pueden ser tratados en una hora, si al calcularlo excede el valor esperado, se le agrega mayor blindaje hasta alcanzar los valores adecuados.

3.6 Evaluaciones del blindaje y sistemas de seguridad

Las evaluaciones del blindaje deberán incluir una revisión de los cálculos que se realizaron para el blindaje, una inspección durante la construcción, las mediciones fuera de cada barrera después de que el acelerador este instalado y una evaluación de la idoneidad del blindaje. Todas las áreas ocupadas cercanas a las instalaciones deben ser evaluadas para determinar si el blindaje cumple con su objetivo, y que cualquier persona cercana no reciba más de los valores de dosis efectiva máxima reglamentaria. Estas evaluaciones deben de ser informadas tanto a los organismos gubernamentales competentes, como quienes la construyeron y los físicos médicos responsables de la unidad.

3.6.1 Inspección de la construcción

Se recomienda que debe existir personal capacitado para inspeccionar las instalaciones en el momento de la construcción, esta inspección deberá tomar en cuenta

- ✓ Lugar y anchura de las barreras primarias en proporción con el isocentro.
- ✓ Espesor y densidad los tipos de materiales utilizados en las barreras.
- ✓ Espesor del blindaje metálico y del polietileno en el caso de blindajes para neutrones.
- ✓ Si son puertas de acceso directo, se debe tomar con mayor cuidado, asegurándose que este plomada las cercanías a la puerta (ver figura 3.13). Verificar que los materiales especiales para el blindaje estén en su lugar antes de colocar la puerta. Tomar con cuidado las distancias de los solapamientos entre la puerta.
- ✓ El espesor del metal detrás de los agujeros en el hormigón, que normalmente se dejan para las cajas del láser.
- ✓ El espesor y composición del blindaje del HVAC.
- ✓ Localizar y medir el conducto el cual será usado para mediciones y controles de calidad.
- ✓ Verificar que efectivamente el diseño del blindaje sea como el esperado.

3.6.2 Interlocks, medios de restricción y luces de emergencia y señalización

Es necesario, antes de empezar a utilizar un equipo como un acelerador de esta naturaleza, que los sistemas de seguridad estén en funcionamiento, además de inspeccionar periódicamente su efectividad.

Existen sensores que se colocan en las puertas de las entradas del cuarto, donde, asegura si la puerta está abierta o cerrada y se configura de tal manera de que el acelerador no funcionara si la puerta está abierta, y si accidentalmente se abre la puerta mientras el acelerador está en funcionamiento, el equipo dejara de funcionar, además de este sensor, debe haber un botón, el cual le indique al equipo,

que todo el personal está saliendo del cuarto antes de que arranque en funcionamiento.

Es necesario una luz indicando cuando el equipo está emitiendo el haz justo en la puerta de acceso, en la parte exterior del cuarto, en las normas internacionales y nacionales, se recomienda una luz roja, y junto a esta una luz verde, donde esta luz verde se encenderá cuando el equipo no este emitiendo la luz, y cuando la luz roja este encendida, significara que el equipo emite el haz, por lo tanto el personal debe permanecer alejado hasta que se apague.

Además de estos sistemas de seguridad, es necesario tener acceso visual al cuarto de tratamiento, donde normalmente se utiliza un sistema de televisión junto a un micrófono, ya que para aceleradores lineales y Co60 no se permiten ventanas plomadas para visualizar.

3.6.3 Reporte sobre la evaluación del blindaje

Para enviar un reporte sobre la evaluación, es necesario conocer:

- ✓ El tipo de tratamientos, número de serial, los tipos de haces de electrones y fotones, localización de la instalación y los nombres de los responsables y evaluadores.
- ✓ Técnicas e instrumentación y métodos utilizados para obtener las mediciones de la dosis equivalente (H), para áreas controladas y no controladas.
- ✓ Los datos y números de seriales de los dosímetros utilizados para las mediciones y fechas de sus últimas calibraciones.

Capítulo 4

4.1 Programa

El programa se realizó basándose en el NCRP 151, conjuntamente con las ecuaciones indicadas en los capítulos anteriores del presente trabajo.

Este programa calcula los datos necesarios para la construcción de un cuarto de tratamiento utilizando un acelerador lineal con tratamiento convencional, con IMRT o Radiocirugía (SRS). Esto incluye las barreras primarias y secundarias, laberinto, si es el caso y la puerta de acceso.

El programa fue escrito y compilado en Matlab. Y consta de una tabla de entrada donde se reciben los datos necesarios tanto del modelo, energías, tratamientos, métodos, tipo de barrera, materiales que desea para las barreras, si es el caso, así como las distancias de los puntos explicados en el capítulo anterior.

Para el techo, existe una condición especial, ya que si existe plomo o acero, el programa considera primeramente una capa de concreto de 30.5cm como soporte, tanto para barreras primarias como secundarias. Y si el equipo es de altas energías con materiales diferentes, el programa automáticamente calcula dosis equivalente debido a los neutrones producidos.

Es necesario estar seguros de que la instalación cumplirá con los estándares y normas establecidas, el programa tiene un bloque donde determina si cumple con los límites de dosis establecidos en las normas, si esto no sucede, el programa automáticamente le suma un HVL a la barrera, hasta cumplir con el P reglamentario.

Para barreras primarias, existe una condición especial, ya que si es altas energías, se debe tomar con cuidado el HVL, por lo tanto, independientemente de que sean barreras laminadas de diferentes materiales, se sumaría HVL de concreto. En cambio, si es bajas energías, o es para barreras secundarias, el programa le pregunta al usuario, que prefiere, si ahorrar espacio o no, de esta manera, el programa elige el material de mayor densidad o no.

Por otro lado, existe un grave error que se comete muy a menudo a la hora de calcular las barreras primarias, ya que no solo se debe tomar en cuenta las dimensiones con que se cuentan, sino también los valores mínimos que el fabricante exige para el buen funcionamiento del equipo. Si se tiene una distancia d_a (la cual obligatoriamente el usuario debe suministrar), y se obtiene un espesor t_a , la resta de ambos no debe perjudicar el movimiento de la camilla del equipo y su buen funcionamiento, por lo tanto, se crea una subrutina dentro del programa el cual resta ambos valores, y cumpla así con la distancia mínima deseada

$$(d_a - 0,3 - t_a) < d_{isocentro_barrera} \quad (4.1)$$

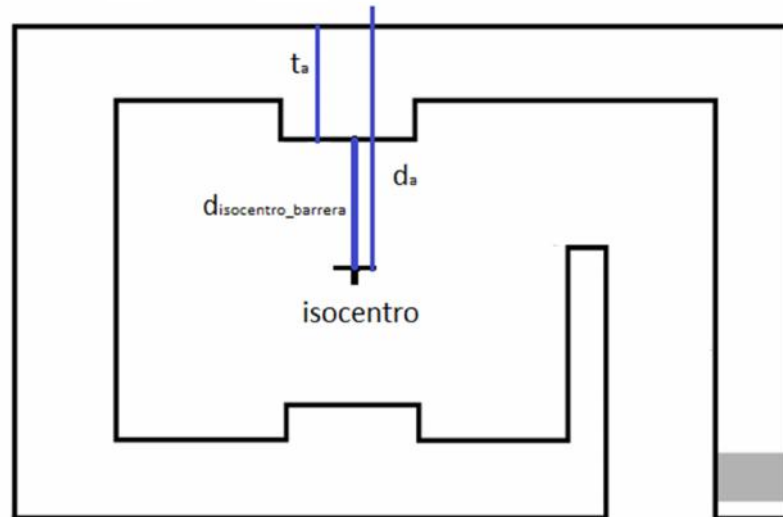


Figura 4.1 Esquema donde se explican las distancias de la barrera primaria, el espesor y distancias mínimas para el funcionamiento de un equipo.

Si esto no se cumple, se calcula un nuevo d_a con

$$d_a = t_a + d_{isocentro_barrera}$$

Y con este valor, se determina entonces la dosis equivalente¹⁵ en el punto d_a .

¹⁵ La dosis se verifica con la distancia anterior de d_a por lo tanto el nuevo valor d_a también cumple con los valores objetivo, ya que este será mayor.

Por esta razón, se recomienda calcular las barreras primarias en primer lugar, así se podrá obtener los valores dimensionales tanto para calcular las barreras secundarias, como la puerta.

Para las barreras secundarias, como ya se tienen las dimensiones posibles de construcción principales, se realizan los cálculos manuales de las distancias que se necesitan. Para SRS, solo se considera el techo, por lo tanto el programa automáticamente elegirá el techo, teniendo en cuenta y cuidado si se trata de una barrera con diferentes materiales, porque como ya se nombró anteriormente, es necesario un soporte de 30,5cm de concreto para soportar láminas de acero o plomo. Otro punto importante en la barrera secundaria, es que a pesar de tener equipos con altas energías, la producción de neutrones se desprecia. Aquí también es posible calcular el ancho de un laberinto.

En el caso de la puerta y el laberinto, el usuario podrá elegir entre ambos, sin importar la energía del acelerador. Y arrojará los valores necesarios para que la puerta este blindada tanto para neutrones como para fotones gamma y debido a las dispersiones y transmisiones.

4.2 Estructura del programa

El programa consta de un programa raíz llamado **Programa_Raiz.m**, en este programa se introducen todos los datos necesarios para cualquier cálculo del blindaje, el cual está dividido en tres acciones (cálculo de barrera primaria, secundaria o puerta), bien sea para determinar el espesor y materiales de la puerta, como las barreras primarias y secundarias, el usuario tendrá la libertad de elegir cualquiera de los tres, sin embargo, en primer lugar se aconseja calcular las barreras primarias¹⁶ el cual utiliza la función **calculo_primaria.m**, ya que estas pueden modificar las distancias restantes, esto sucede porque si el espesor de la barrera

¹⁶ Como se explicó en la sección anterior, las distancias de la construcción deben asegurar el buen funcionamiento del equipo.

primaria es mayor a la esperada afectarían el resto de las distancias y se debe reestructurar nuevamente todo. Esta función arroja la opción de pared, techo o laberinto¹⁷, según sea el caso. Además el usuario puede elegir 4 materiales diferentes para la barrera, dependiendo de las energías del equipo.

Otra acción que ofrece el programa, es **calculo_secundaria.m**, la cual calcula las barreras secundarias que el usuario desee, arrojando la opción de ser laberinto, techo o pared¹⁸, dependiendo del equipo. Al igual que la barrera primaria, se tiene la opción de tres materiales diferentes y el usuario elige cuantos y la cantidad fraccionaria de TVL que utilizará para cada uno.

Y por último, se tiene la función **Laberinto.m** el cual determina el espesor y materiales necesarios para una puerta blindada, según sea el caso del equipo e instalación. En este caso, el programa arroja tanto la trayectoria del haz en el laberinto, como el espesor de la puerta, bien sea con láminas de plomo, o BPE más plomo para equipos de altas energías.

Dependiendo de la acción, cada acción llamara a la librería con la cual se cuenta.

A continuación explicare resumidamente cada uno de las funciones y datos necesarios para el funcionamiento del programa (ver figura 4.2):

- calculo_primaria.m → función que calcula las barreras primarias
- calculo_secundaria.m → función que calcula las barreras secundarias
- deqneutron.dat → tabla de la dosis equivalente neutrónica para neutrones directos originados en el cabezal del acelerador
- dosiseq.m → función que calcula la dosis equivalente de fotones en el haz primario
- EFE.dat → fracción de radiación primaria que atraviesa al paciente

¹⁷ Laberinto exclusivamente para SRS, ya que todas las barreras de las paredes son consideradas como primarias.

¹⁸ En el caso de SRS, solo seria techo.

- FRAC.dat → fracción de dispersión
- ftransm.m → función que calcula el factor de transmisión B cuando se posee el espesor de la barrera
- HLMV.m → función que calcula la dosis equivalente debido a la fuga
- hresultados_laberinto.m → función que imprime los resultados de la puerta
- hresultados_prim.m → función que imprime los resultados de las barreras primarias
- hresultados_secun.m → función que imprime los resultados de las barreras secundarias
- inter.m → función que interpola (1/2)
- interp.m → función que interpola (2/2)
- Laberinto.m → función que calcula el espesor de la puerta del cuarto
- Programa_Raiz.m → es el programa el cual tiene todo lo necesario para introducir los datos de cada acción
- regla2fuentes.m → función que aplica la regla de las dos fuentes
- Resultados_Barrera_Prim.dat → hoja de datos, la cual arroja el programa una vez compilado todo con los resultados de las barreras primarias
- Resultados_Barrera_Secun.dat → hoja de datos, la cual arroja el programa una vez compilado todo con los resultados de las barreras secundarias
- Resultados_Laberinto.dat → hoja de datos, la cual arroja el programa una vez compilado todo con los resultados de la puerta blindada
- TVL_BPE.dat → tabla de datos para los TVL de BPE
- TVL_L_acero.dat → tabla de datos para los TVL debido a fugas para el acero
- TVL_L_BPE.dat → tabla de datos para los TVL debido a fugas para el BPE
- TVL_L_plomo.dat → tabla de datos para los TVL debido a fugas para el concreto

- TVL_sca_acero.dat → tabla de datos para los TVL debido a la dispersión del paciente para el acero
- TVL_sca_concreto.dat → tabla de datos para los TVL debido a la dispersión del paciente para el concreto
- TVL_sca_plomo.dat → tabla de datos para los TVL debido a la dispersión del paciente para el plomo
- TVLacero.dat → tabla de datos para los TVL de acero para el haz primario
- TVLconcreto.dat → tabla de datos para los TVL de concreto para el haz primario
- TVLplomo.dat → tabla de datos para los TVL de plomo para el haz primario

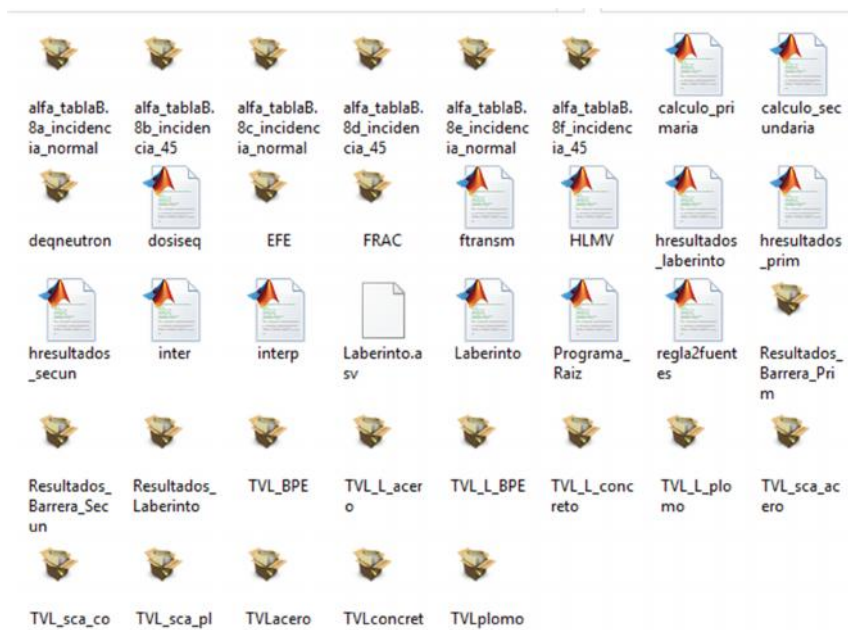


Figura 4.2 Archivos necesarios para el programa.

4.3 Diagrama de flujo del programa

En primer lugar, se compila Programa_Raiz.m, en este primer bloque, se introducirán los valores característicos del equipo, el programa completo incluyendo los subprogramas, constan de 2075 líneas de código incluyendo las funciones de impresión de las hojas de los resultados.

A continuación, se mostrara, el diagrama de flujo explicativo de cómo funciona

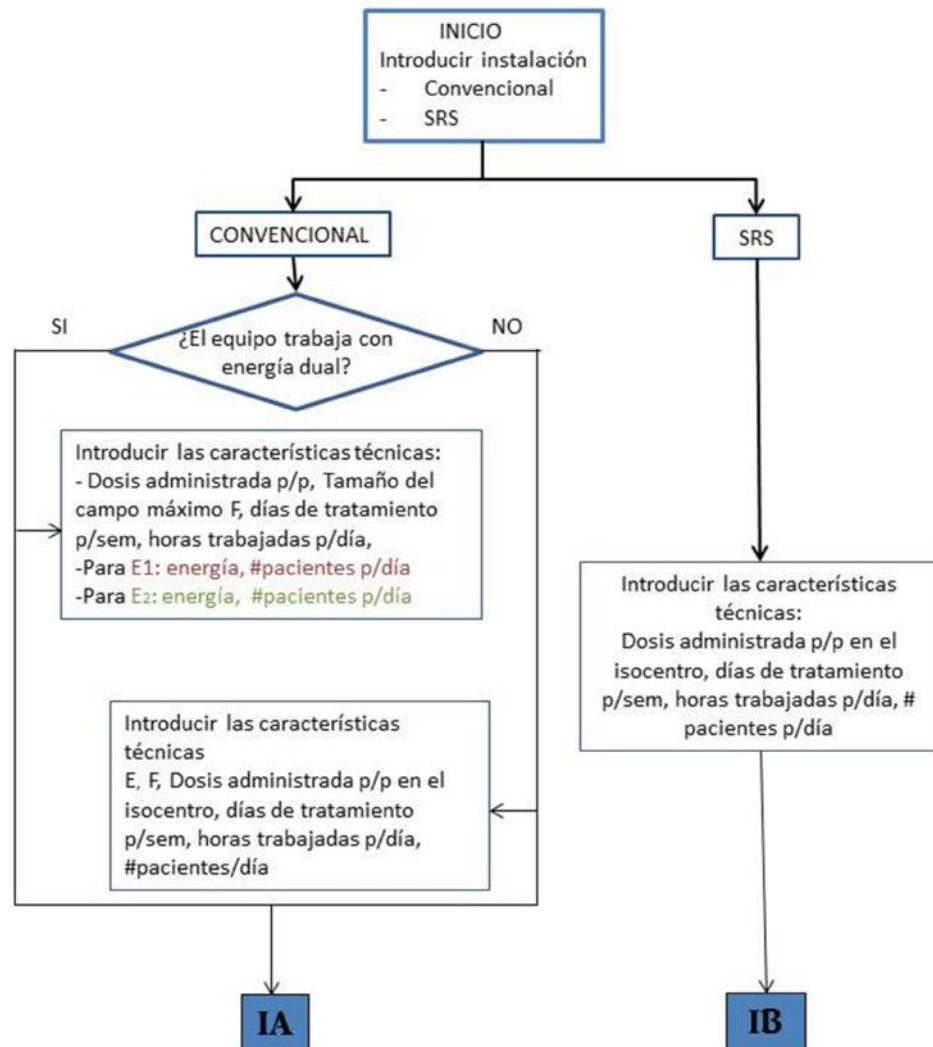


Figura 4.3 Primer diagrama de la estructura del programa

Seguido de las características generales del equipo, se empieza a solicitar las características específicas del equipo y su estructura, dependiendo de la acción que el usuario solicite.

Si el usuario solicita que se realice la acción 1, entonces se solicitaran las características específicas y materiales los cuales son necesarios para su construcción.

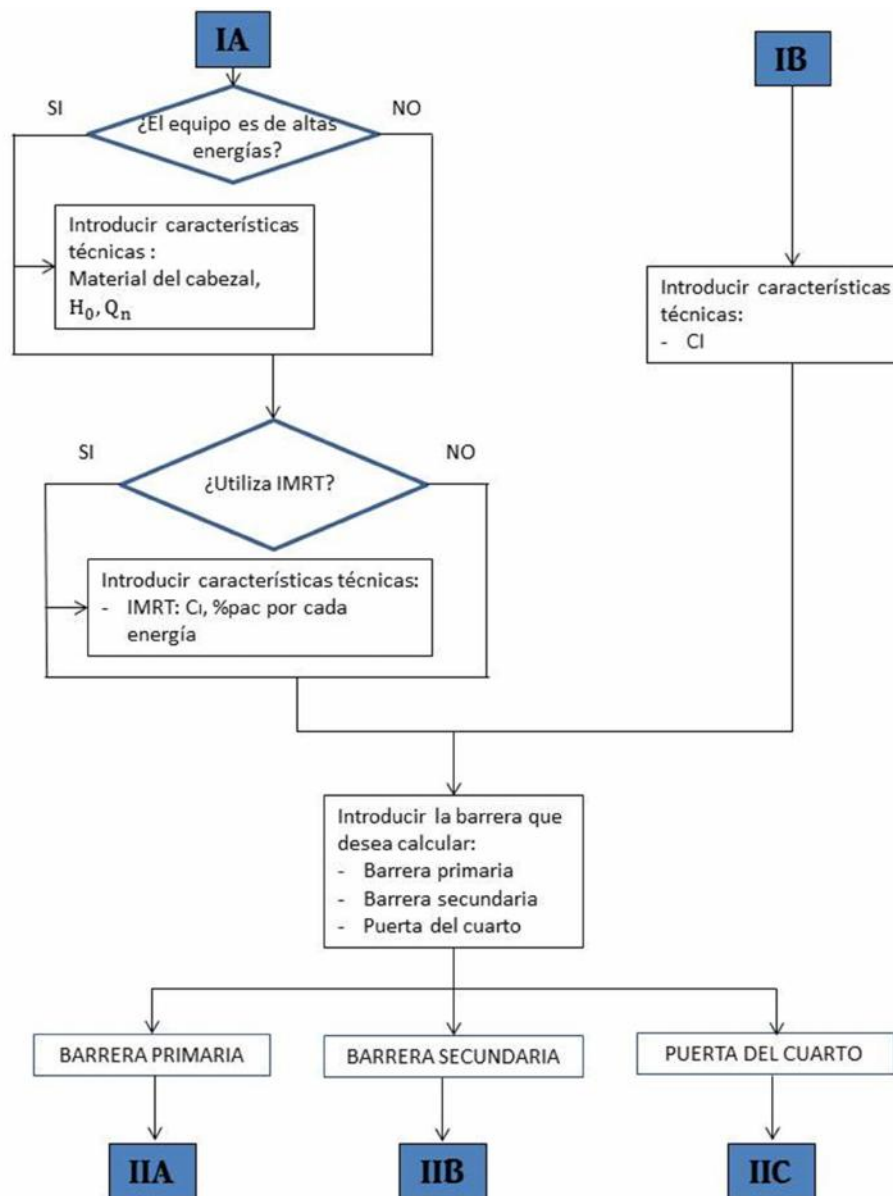


Figura 4.4 Continuación del diagrama principal.

La acción 1, te da la opción de elegir el número de barreras primarias que se desean blindar, tipo de materiales para cada barrera, etc., esta acción llama al programa **calculo_primaria.m**, este programa arroja una hoja de datos llamado **Resultados_Barrera_Prim.dat**, donde en el Apéndice C se encuentra.

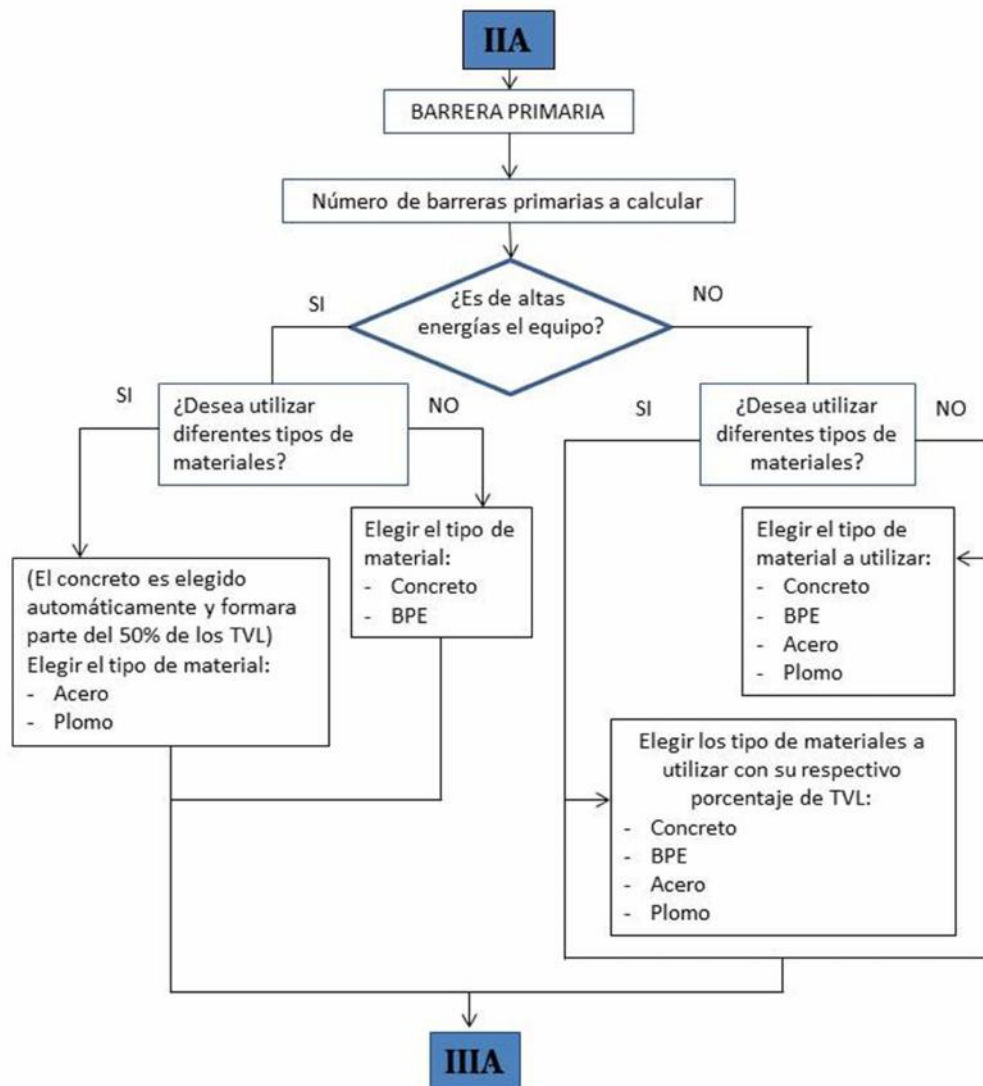


Figura 4.5 Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (1/4)

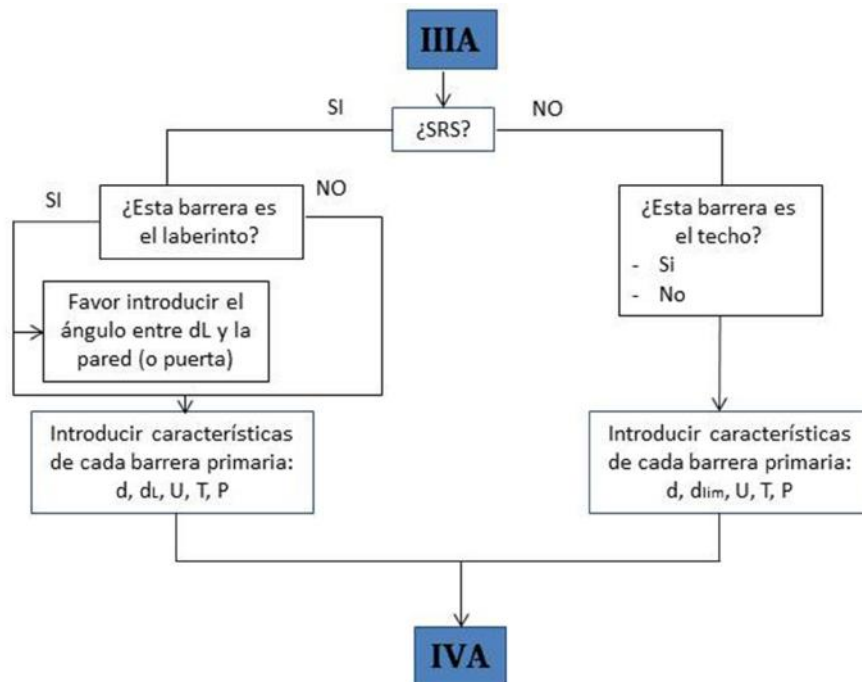


Figura 4.6 Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (2/4)

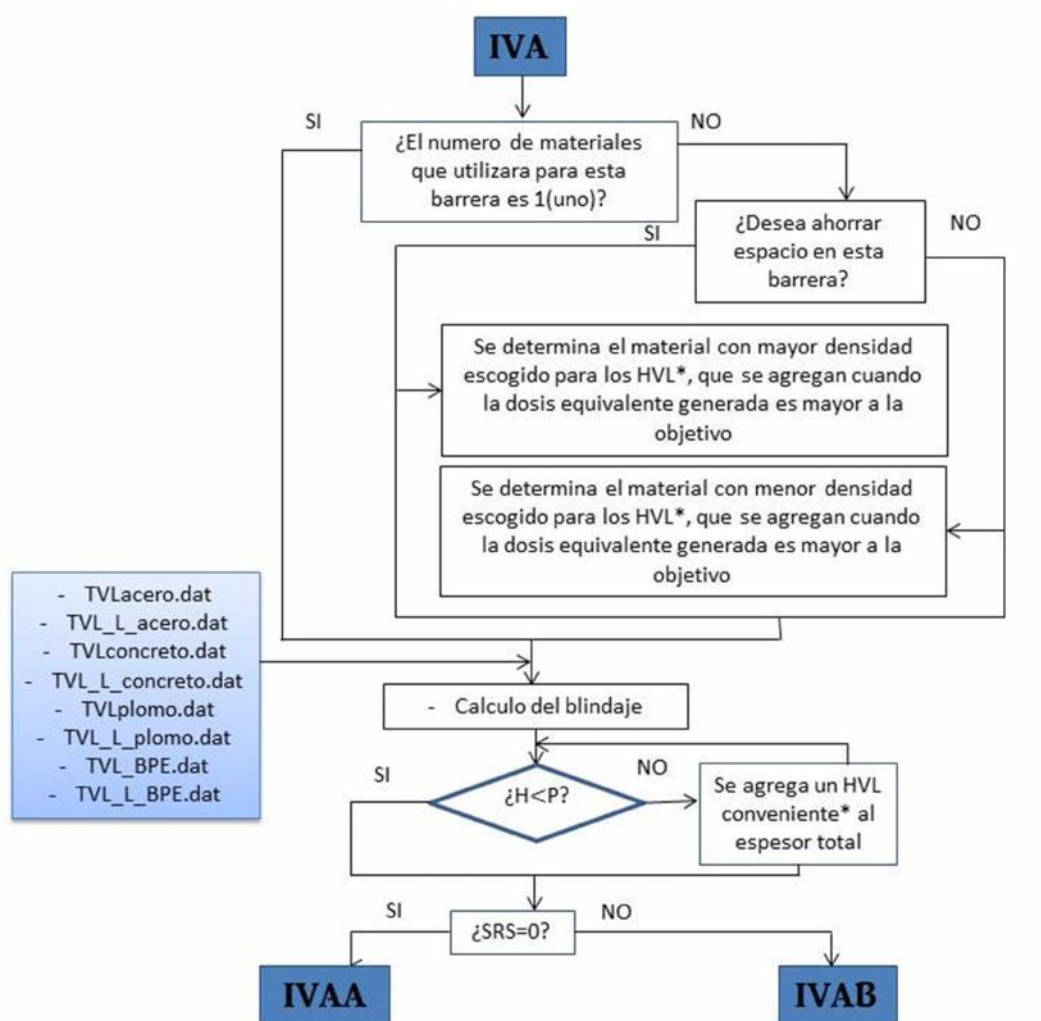


Figura 4.7 Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (3/4)

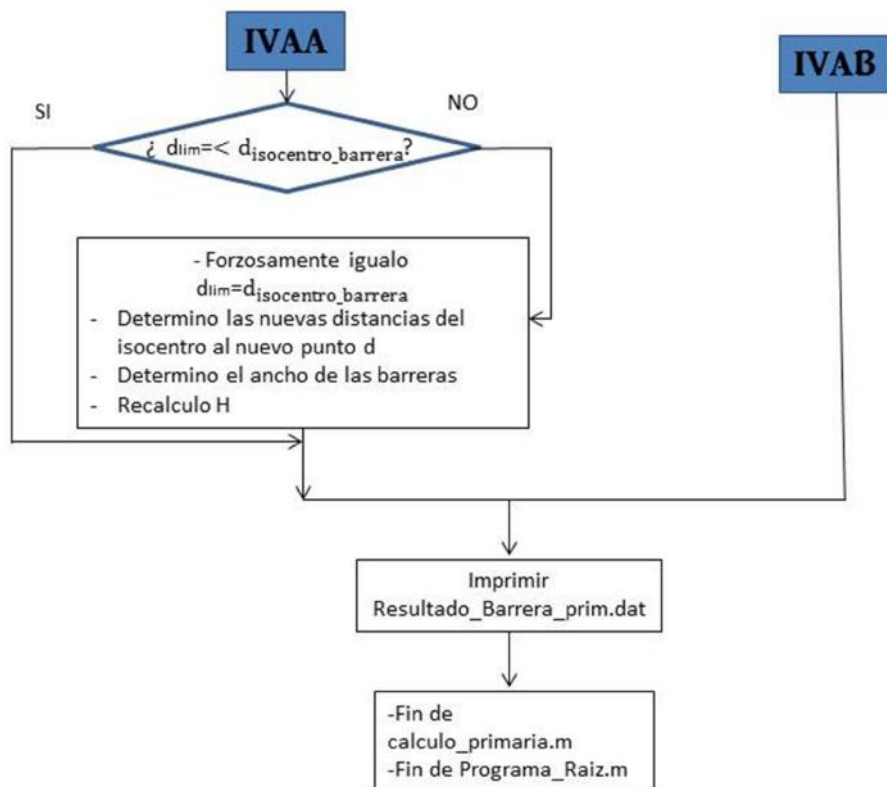


Figura 4.8 Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera primaria (4/4)

En el caso de solicitar la acción 2, el programa solicita los datos necesarios para los cálculos de las barreras secundarias y llamaría al programa **calculo_secun.m** y la hoja de los resultados sería **Resultados_Barrera_secun.dat**

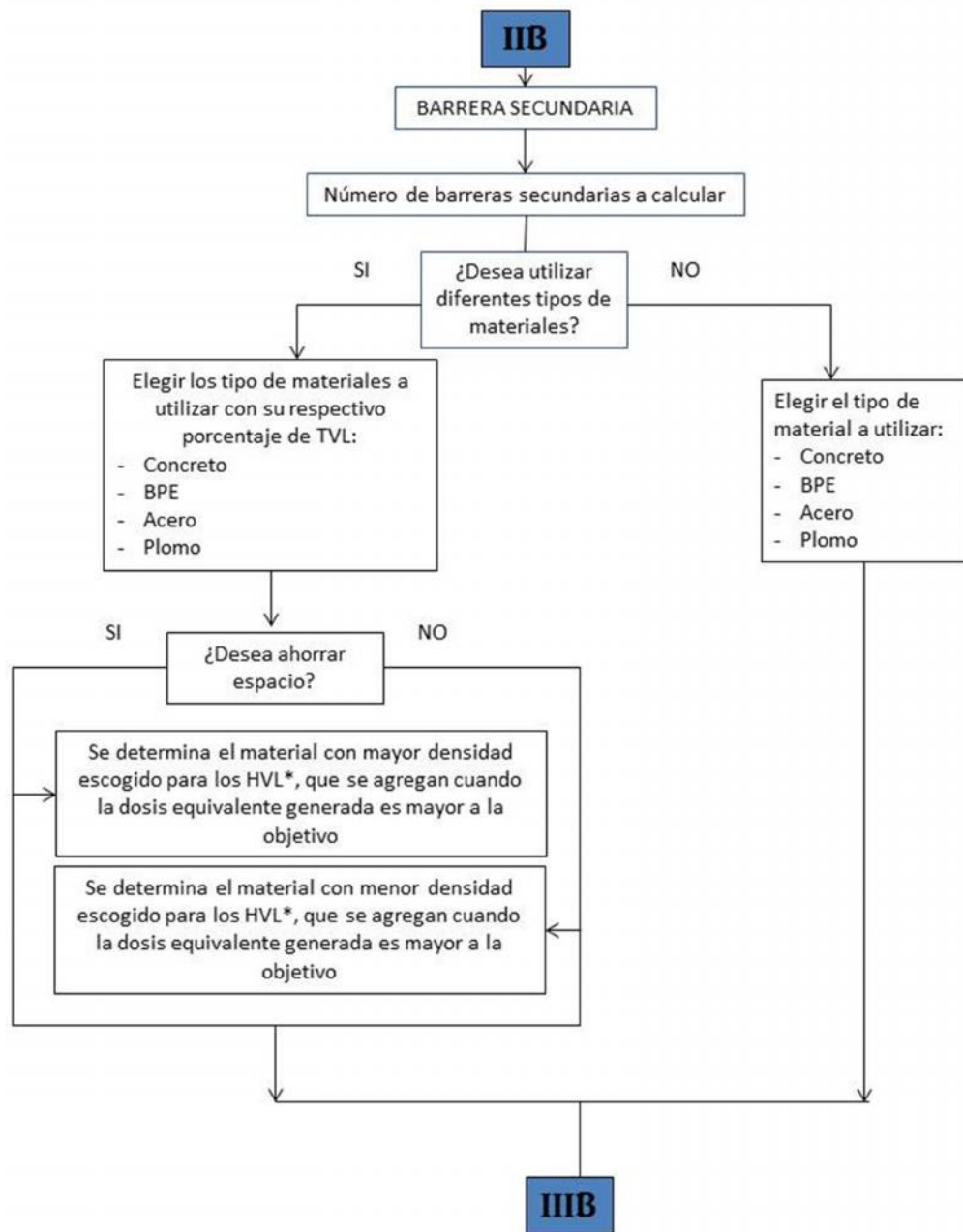


Figura 4.9 Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera secundaria (1/2)

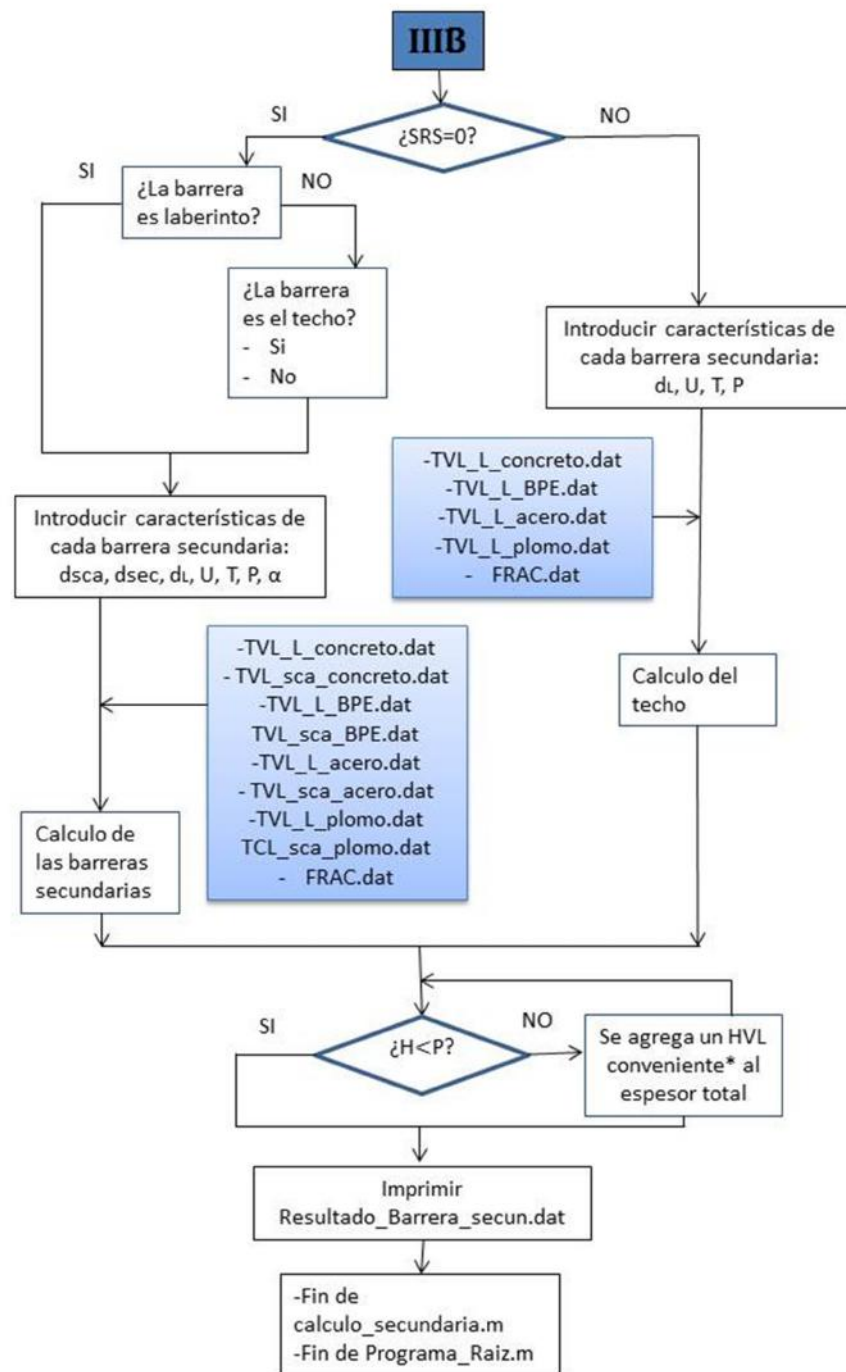


Figura 4.10 Diagrama de flujo para el cálculo de la barrera secundaria (2/2)

Finalmente, si se elige la acción 3, entonces, el programa arroja el espesor de la puerta, dependiendo de la energía del equipo y si posee o no laberinto.

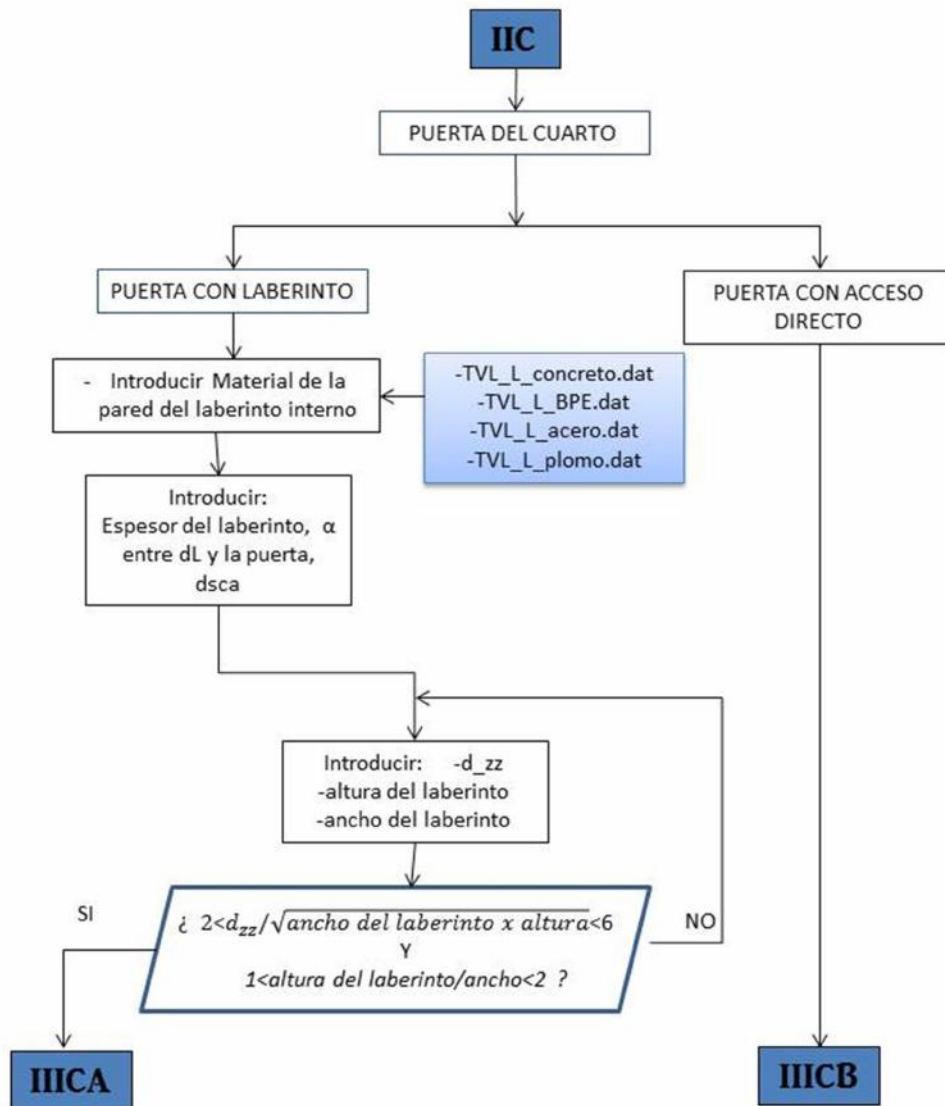


Figura 4.11 diagrama de flujo que explica el cálculo de la puerta para el cuarto de blindaje (1/2)

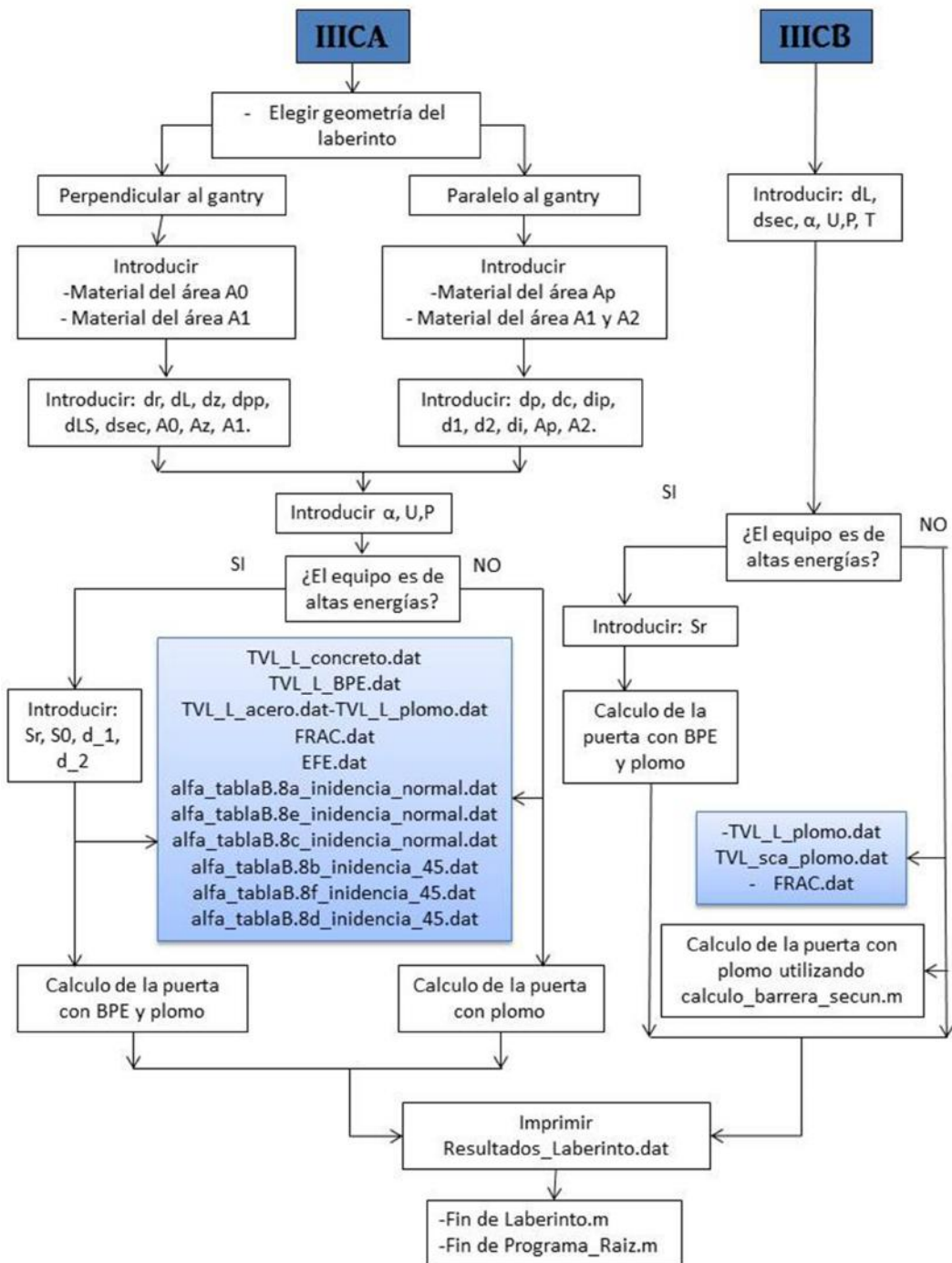


Figura 4.12 Diagrama de flujo que explica el cálculo de la puerta del cuarto (2/2).

Capítulo 5

En el presente capítulo, se realizará una comparación de datos y cálculos arrojados en el Programa_Raiz.m aplicado a un equipo de radioterapia, con una instalación específica, dicha instalación se encuentra en el Hospital Clínico de Maracaibo, en Venezuela.

5.1 Características de la instalación y equipo.

Se tiene un acelerador lineal Clinac iX con energías de fotones de 6MV y 18MV y electrones de 4 a 18MeV. El acelerador es capaz de ser utilizado para IMRT. El espesor calculado para esta instalación, garantiza los requerimientos necesarios para una seguridad radiológica adecuada, tanto para los pacientes, como para el personal ocupacionalmente expuesto. La gran ventaja del proyecto de construcción de este cuarto, es que se instaló en una edificación que se encontraba sin edificar con anterioridad, y en consecuencia, se disponía de áreas necesarias para garantizar la operatividad del equipo y las consideraciones para la protección radiológica, contando de esta manera, con espacio suficiente y por lo tanto, se pudo utilizar concreto en todas las barreras que lo requerían.

El cálculo suministrado para la comparación, fueron suministrados por el tutor del presente trabajo, Dr. Miguel Martin Landrove, el cual se rigió principalmente utilizando el NCRP 151. El mismo lo realizó con el fin de cumplir con la solicitud del Ing. Pedro Itriago, Presidente del Centro Diagnostico Docente Las Mercedes. Los planos y recomendaciones fueron suministrados por la empresa Cardilma, C.A.

5.2 Materiales y características del diseño

Tanto para las barreras primarias como secundarias, se utilizó concreto (densidad= 2.35g/cm^3), el cual posee un alto contenido de hidrógeno, por lo tanto no hay riesgo considerable de generación de neutrones, y sólo es necesario tomar

en cuenta la producción de neutrones en la puerta, que con la ayuda del laberinto, se podrá obtener una puerta menos pesada.

5.3 Parámetros y dosis objetivos para los cálculos

Los valores de dosis objetivo se dividen en dos: $P=20 \mu\text{Sv/semana}$ para zonas no controladas, y $100 \mu\text{Sv/semana}$ para áreas controladas.

El factor de uso, para la radiación primaria, se consideró $U=1/4$ en cambio, para las radiaciones secundarias, $U=1$.

Por otro lado, para el factor de ocupación se consideró como $T=1$. Debido a que la instalación se encuentra en una sola planta, el techo de la instalación tendrá un factor de ocupación de $T=1/40$, tanto para las barreras secundarias como la primaria, esto se debe a que periódicamente técnicos de refrigeración tienen que encargarse del mantenimiento y reparaciones de los aires acondicionados necesarios para que el acelerador funcione correctamente.

Los valores de los TVL, fueron extraídos del NCRP 151¹⁹, así como las fracciones de dispersión, entre otros. Si de alguna manera, la tabla no muestra exactamente el ángulo con el cual se desea determinar la fracción de dispersión o el TVL debido a la dispersión del paciente, el programa automáticamente interpola los valores necesarios.

A la hora de calcular la carga de trabajo, para el tratamiento convencional, se tiene que $W_{conv} = 50 \frac{\text{paciente}}{\text{dia}} \times 5 \frac{\text{dia}}{\text{semana}} \times 2 \frac{\text{Gy}}{\text{paciente}} = 500 \text{Gy/sema}$, para ambas energías, en cambio, para la carga de trabajo debido a IMRT, en esta instalación se consideró que $W_{IMRT} = 30 \frac{\text{paciente}}{\text{dia}} \times 5 \frac{\text{dia}}{\text{semana}} \times 2 \frac{\text{Gy}}{\text{paciente}} \times 3 = 900 \text{Gy/sema}$ y para la carga de trabajo debido a fugas

¹⁹ En las tablas mostradas en el Apéndice B, aparecen todas las tablas necesarias para los cálculos mostrados en este estudio.

$W_L = 0.85W_{conv} + (0.15W_{IMRT} * 3) = 560Gy/semana$, a la hora de calcular utilizando este programa, aquí hubo una discrepancia que más adelante, se explicará.

5.4 Cálculos de blindaje y comparaciones

Para los cálculos del blindaje se utilizó el programa aquí explicado, y se comparó con los valores de la instalación antes mencionada. En ambos casos se cumplieron con las normas establecidas en el NRCP y se respetaron los materiales de blindaje, dimensiones del cuarto, entre otros valores necesarios.

Valores considerados:

- 50 pacientes tratados diariamente utilizando 18MV, sin IMRT.
- 50 pacientes tratados diariamente utilizando 6MV, donde, 15% de estos aproximadamente son tratados con IMRT²⁰.
- Distancia fuente-isocentro $d_{sca} = 1m$.
- El factor IMRT CI=3.
- 2Gy dosis administrada por paciente en el isocentro.
- 5 días a la semana de trabajo.
- Para la carga de trabajo para tratamientos convencionales, se calcula como:

$$W(18MV)_{conv} = 50pacientes/dia * 5dia/semana * 2Gy/paciente = 500Gy/semana;$$

$$W(6MV)_{conv} = 50pacientes/dia * 5dia/semanas * 2Gy/paciente = 500Gy/semana.$$

- Para la carga de trabajo debido a fugas, se considera como:

$$W(18M^-)_L = W(18MV)_{conv} = 500Gy/semana ;$$

$$W(6M^-)_L = 0.85 * W(6M^-)_{conv} + (0.15 * 3 * W(6M^-)_{conv}) = 650Gy/semana$$

²⁰ En este caso hubo una discrepancia con las consideraciones del informe de la instalación, ya que, para W_{IMRT} se consideran 30 pacientes, sin embargo, a la hora de calcular la carga de trabajo para 6MV, se considera de la siguiente manera $W_L = 0.85W_{conv} + 0.15 * 3 * W_{IMRT}$, en cambio en este trabajo, se utilizó la ecuación número 3.38. Por lo tanto, la carga de trabajo debido a fugas considerada en la instalación fue de $W_L = 560Gy/semana$, y en el trabajo $W_L = 650Gy/semana$

Los datos suministrados fueron:

Punto (tipo de barrera) ²¹	P [μSv/sem]	T	U	Distancia [m]	Área [m ²]	Ángulo d mín[°]
A (primaria)	20	1	0,25	$d_{pri} = 7,01$	-	-
B (primaria)	20	1	0,25	$d_{pri} = 7,01$	-	-
C (secundaria)	20	1	1	$d_{sc} = 7,14$ $d_{sc} = 5,14$ $d_L = 5,14$	-	90
D (secundaria)	20	1	1	$d_{sc} = 5,38$ $d_{sc} = 9,38$ $d_L = 9,38$	-	62
E (secundaria)	20	1	1	$d_{sc} = 9,38$ $d_{sc} = 9,38$ $d_L = 9,38$	-	-
F (secundaria)	20	1	1	$d_{sc} = 9,38$ $d_{sc} = 9,38$ $d_L = 9,38$	-	-
G (secundaria)	20	1	1	$d_{sc} = 9,59$ $d_{sc} = 6,59$ $d_L = 6,59$	-	24
H (primaria)	20	1/40	0,25	$d_{pri} = 5,99$	-	-
I (secundaria)	20	1/40	1	$d_{sc} = 5,72$ $d_{sc} = 4,72$ $d_L = 4,72$	-	30
J (laberinto y puerta)	100	-	0,25	$d_{sc} = 7,49$ $d_{LS} = 7,49$ $d_L = 7,49$ $d_{pp} = 3,50$ $d_r = 6,19$ $d_z = 7,47$ $d_{zz} = 9,83$ $d_1 = 6,85$ $d_2 = 8,79$	$A_0 = 3,10$ $A_1 = 12,92$ $A_z = 12,31$ $S_r = 255,6$ $S_0 = 9,12$ $S_1 = 10,22$	$\alpha_{pe} = 28$ $\alpha_L = 52$

Tabla VII. Datos de la instalación a calcular.

²¹ Las posiciones de puntos de medición se muestran en la figura 5.1

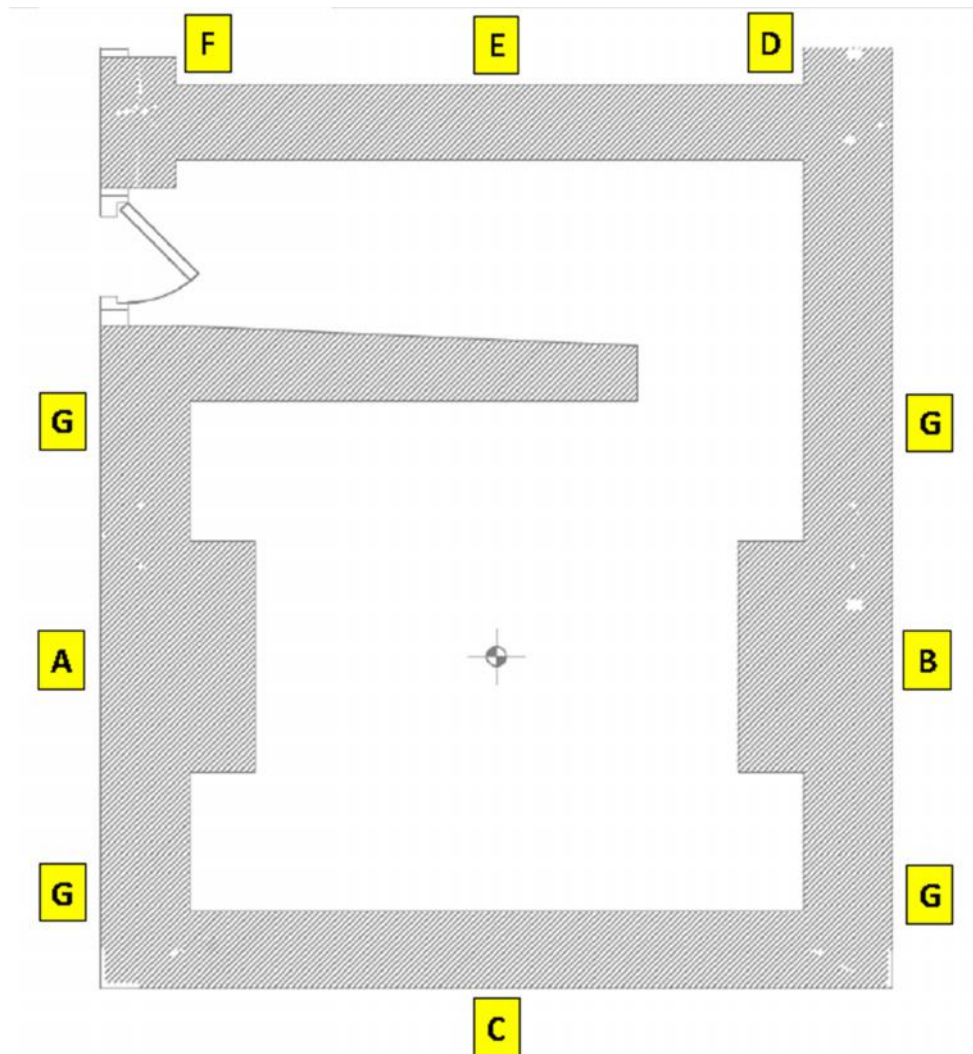


Figura 5.1 Esquema de los puntos de medición para las barreras primarias y secundarias

Con la tabla VII, es posible realizar un cálculo de blindaje completo, incluyendo el espesor de la puerta, para los materiales de la puerta, se utilizó BPE y plomo, en cambio, para todas las barreras como secundarias y primarias, se utilizó concreto. A continuación se muestran los resultados obtenidos con Programa_Raiz.m y se comparan con los datos suministrados.

Zona a proteger. Punto de medición	Material/ espesor [cm] (Programa)	Ancho [cm] (Programa)	Material/ espesor [cm] (datos)	Ancho [cm] (datos)	Diferencia [%]
A (primaria)	Concreto/ 229,45	330,05	Concreto/ 222	334	3,35 1,18
B (primaria)	Concreto/ 229,45	330,05	Concreto/ 222	334	3,35 1,18
C (secundaria)	Concreto/ 114.02	-	104	-	9,63
D (secundaria)	Concreto/ 94.56	-	86	-	9,95
E (secundaria)	Concreto/ 94.56	-	86	-	9,95
F (secundaria)	Concreto/ 94.56	-	86	-	9,95
G (secundaria)	Concreto/ 144.26	-	125	-	15,4
H (primaria)	Concreto/ 165.65	311	185	327	10,45 4,89
I (secundaria)	Concreto/ 85.71	-	78	-	9,87
Pared intern laberinto	90	-	90	-	-
J puerta del laberinto	- Plomo/ 0.86 - BPE/ 4.6	-	- Plomo/ 0.8 - BPE/4	-	7,5 15

Tabla VIII. Resultados obtenidos vs. resultados suministrados mediante el cálculo manual.

Al observar los resultados se tiene, en su mayoría, ambos valores son bastante cercanos y no existen discrepancias muy evidentes. Sin embargo, hay que observar detenidamente para percatar de que en su mayoría, los resultados que arroja el Programa_Raiz.m, son ligeramente mayores a los suministrados.

En primer lugar, en las barreras primarias de las paredes existe una pequeña diferencia de un 3,35%, en cambio, en la barrera primaria del techo, si hay una gran diferencia, esto se debe a que el programa obvia el cálculo de dosis instantánea. Debido a las diferencias en el espesor, el ancho de cada barrera también se encuentra afectado.

En segundo lugar, para las barreras secundarias si hubo una mayor diferencia, esto se debe a que el programa aplica tres veces (en el caso de equipos con energía dual. Cuando es mono energético, lo aplica una vez) la función de “regla de las dos fuentes”.

Por último, para la puerta, se tiene diferencias tanto para la lámina de plomo como para la lámina de BPE, de un 7,5% y 15% respectivamente. Al observar el método aplicado en la instalación, se tiene que, para la dosis equivalente producido por los neutrones, sólo se aplica la ecuación de Kersey modificado (Ecuación de McGinley, ver ecuación 3.29), en cambio el programa hace una comparación de valores entre la ecuación de Kersey (ver ecuación 3.29) y la de Kersey modificado y elige el valor mayor entre los dos para calcular el espesor de la lámina de BPE, el total de esta dosis, entre la mitad de la dosis objetivo ($P/2$) es el resultado. Por otro lado, para el cálculo del espesor de la lámina de plomo, el programa primeramente calcula los TVL necesarios para atenuar la dosis equivalente debido a los rayos gamma producidos por captura de neutrones (61mm), si este espesor es menor al TVL que atenúa los fotones (0.2MeV) producidos por las dispersiones y transmisiones (5mm) [2], entonces, suma el espesor de los TVL para los fotones de 0.2MeV, de lo contrario, solo considera los rayos gamma.

Además de estas diferencias, también hay que tomar en cuenta el valor de la carga de trabajo debido a fugas, la cual en el programa se rige con la ecuación 3.38, haciendo este valor más elevado ($W_L = 650Gy/sema$) que el suministrado en el informe del calculo manual ($W_L = 560Gy/sema$). Por estas razones, existen diferencias, sin embargo son válidas ambas.

Capítulo 6

Conclusiones

A medida que han evolucionado los métodos para el uso de radiaciones ionizantes para la salud, tanto de diagnóstico como para tratamiento, también deben evolucionar los métodos de blindar al personal, pacientes y público en general.

Uno de los métodos que utilizan radiaciones con energías de magnitud considerada, es la radioterapia, esta terapia es bastante delicada y el personal se siente en la obligación de permanecer afuera del cuarto de tratamiento mientras se aplica la dosis al paciente, al mismo tiempo, de permanecer a una distancia prudencial de la barrera. A la hora de construir un cuarto de tratamiento para radioterapia, se debe conocer el equipo el cual trabajara allí, ya que a partir de allí, dependerá el espesor de las barreras, techo, laberinto y puerta.

Por otro lado, para la realización de este estudio se respetaron las normas actuales tanto nacionales, como las más utilizadas en el mundo, los NCRP [2], también se consultó una amplia librería y tablas actuales de valores necesarios para lograr hacer un programa amplio y adecuado para diferentes necesidades de cada usuario. Logrando, de esta manera, que se calcularan los datos necesarios para la construcción adecuada y segura de una instalación que utiliza radiaciones ionizantes para uso radioterapeutas.

El programa es capaz de optimizar el espacio contado para la instalación que al mismo tiempo garantiza la seguridad necesaria para el personal, respetando las especificaciones que el fabricante del equipo aconseja. El mismo, puede utilizar diferentes tipos de materiales para una sola barrera y de esta manera, cumplir con las necesidades de cada usuario, dependiendo del espacio y dinero con que se cuenta.

Por otro lado, a la hora de barreras laminadas en las primarias con equipos de altas energías, se tomó con mucho cuidado el cálculo de la dosis neutrónica, y se optimizó el espacio para lograr una mínima dosis tanto neutrónica como de fotones.

La estructura fue de manera sencilla para poder realizar actualizaciones y modificaciones, cuando sea necesario, al igual que las tablas de datos, las cuales fueron tomadas de varias fuentes e interpolaciones, en algunos casos, ya que en muchas tablas, los valores eran limitados en algunas energías y ángulos. Además de ser amigable para el usuario que tenga un conocimiento básico de Matlab.

Los resultados que se arrojan, están en formato de dato (.dat) siendo bastante fácil de leer en cualquier computadora independientemente del sistema operativo, incluyendo en esta, todos los datos necesarios primordiales.

Para corroborar los resultados, se utilizaron los ejemplos mostrados en las normas NCRP #151[2], IAEA SRS #47 [10] y una instalación ya evaluada con anterioridad, esta instalación se encuentra en el Hospital Clínico de Maracaibo. Además de jugar un poco con los materiales que se utilizaron para las barreras en estos ejemplos (ver anexos).

En el estudio se logró plasmar, tanto un cálculo de blindaje para aceleradores lineales convencionales como los utilizados actualmente en SRS, además, de las opciones del IMRT, si el equipo posee dos energías, si son de altas energías o bajas, geometrías diferentes del laberinto, puertas blindadas cuando el cuarto posee o no laberinto, entre otras opciones. Si la barrera es techo se cuidan las láminas de plomo y acero, obligando al usuario a utilizar una capa de concreto, y si se habla de altas energías, se construye un “emparedado” para soportar el plomo o acero seguido del resto del concreto necesario para blindar los neutrones.

A la hora de calcular la puerta del laberinto, el programa te da la opción de elegir el espesor de la barrera de la pared interna del laberinto, además de su material, haciendo sentir libre al usuario a la hora de la construcción de la puerta, ya que la puerta puede llegar a ser muy pesada y tediosa para su instalación si no se toma con cuidado todas las dimensiones, por esto, si se desea, puede hacer la barrera del laberinto tan gruesa o fina como desee o pueda.

De cualquier manera, lo más recomendable, es utilizar el programa y siempre mantenerse actualizado con los nuevos métodos de blindaje y nuevos valores de las tablas ya obtenidas.

Referencias

- [1] JAMES E. MARTIN. *Physics for Radiation Protection*. Alemania. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim. 2006
- [2] NCRP Report #151. *Structural Shielding Desing and Evaluation for Megavoltage X and Gamma Ray Radiotherapy Facilities*. Bethesta, EEUU: National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005.
- [3] MCGINLEY, P. H. *Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities*. Madison, Estados Unidos: Medical Physics Publishing, 1998.
- [4] JIMENEZ, D. *Proyecto de Blindaje de un Acelerador de electrones con Finalidad de Radioterapia*. Catalunya, España: Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [5] MCGINLEY, P.H. *Photoneutron production in the primary barriers of medical accelerator rooms*. Health Physics Publishing, 1992.
- [6] MCGINLEY, P.H. *Shielding techniques for radiation oncology facilities*. Madison, EEUU. Medical Physics Publishing (2nd edition), 2002.
- [8] MCGINLEY, P.H. *Photon and neutron dose equivalent in the maze of a high energy medical accelerator facility*. Radiation protection management, vol. 17 nº 4. Stone Mountain, EEUU, 2000.
- [9] COVENIN 3496:1999. *Protección radiológica. Medidas de Seguridad para la Protección Contra las Radiaciones Ionizantes y las Fuentes de Radiación*. Fondonorma. Caracas, Venezuela. 1999
- [10] Safety Reports Series #47. *Radiation Protection in Design of Radiotherapy Facilities*. Interntional Atomic Energy Agency. Vienna, Alemania, 2006.
- [11] Gabriel Fonseca da Silva Rezende, Luiz Antonio Ribeiro da Rosa, Alessandro Facure. *Production of neutrons in laminated barriers of radiotherapy rooms: comparison between the analytical methodology and Monte Carlo simulations*.

Journal of Applied Clinical Medical Physics, volume 15, number 6, Rio de Janeiro, Brazil, 2014

[12] Charles R. Rhodes. *Development of an automated program for calculating radiation shielding in a radiotherapy vault*. Toledo, España. The University of Toledo. 2012.

[13] NCRP Report #144. *Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities*. Bethesda, EEUU: National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005

[14] E.B. Podgorsak. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. International Atomic Energy Agency. Vienna, Alemania, 2005.

[15] E.B. Podgorsak. *Radiation Physics for Medical Physics*. McGill University Health Centre. Montréal, Canada. 2005.

Apéndice A

A.1 Código de Programa_Raiz.m

```
Marca={'Varian','Elekta','Siemens','Philips','Otra marca'};
marc=cellstr(Marca);
tm=input('Por favor introduzca la marca del equipo:\n 1 Varian\n 2 Elekta\n 3 Siemens\n 4 Philips\n 5 Otra marca\n ');
marca=char(marc(tm));
%Ya tenemos la marca del equipo ahora, el modelo
modelo=input('Escriba el modelo del equipo ','s');
Dt0=720;
SRS=input('Por favor introduzca el tipo de instalación:\n 0 Convencional\n 1 Radiocirugía\n ');
while SRS~=0 && SRS~=1
    fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a escribirlo\n');
    SRS=input('Por favor introduzca el tipo de instalación:\n 0 Convencional\n 1 Radiocirugía\n De lo contrario, si desea salir del sistema escriba 99\n ');
    if SRS==99
        return
    end
end
fprintf('Introduzca las características técnicas\n')
if SRS==1
    l=1;
    energia(1)=6.0;
    IMRT=1;
    F=36;
    TBI=0;
    npacientes1(1)=input('El número de pacientes tratados diariamente con SRS [pacientes/día] ');
    porcentaje=100;
    pore(1)=1;
    dosisabpaciente=input('Dosis absorbida por paciente [Gy/pacientes] ');
    dias=input('Días de tratamiento semanal [días] ');
    horas=input('Horas de tratamiento diarios [horas] ');
    CI=input('Factor CI ');
    Nmax=1;
else if SRS==0
    dosisabpaciente=input('Dosis absorbida por paciente [Gy] ');
    F=input('Tamaño máximo del campo F [cm^2] ');
    dias=input('Días de tratamiento semanal [días] ');
    horas=input('Horas de tratamiento diarios [horas] ');
    Nmax=8;
    l=input('Si el equipo\n 1 Monoenergético\n 2 Si trabaja con dos energías\n ');
    while l~=2 && l~=1
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a escribirlo\n');
        l=input('Si el equipo es\n 1 Monoenergético\n 2 Si trabaja con dos energías, de lo contrario, si desea salir del sistema escriba 99\n');
        if l==99
            return
        end
    end
end
if l==1
```

```

        k=1;
        energia(k)=input('La energía del equipo [MV] (si trabaja con
cobalto, por favor escriba 1.25) ');
        while energia(k)~=4 && energia(k)~=6 && energia(k)~=10 &&
energia(k)~=15 && energia(k)~=18 && energia(k)~=20 && energia(k)~=25 &&
energia(k)~=1.25
            fprintf('Por favor, debe elegir una energía [MV] válida para
este estudio (1.25, 4, 6, 10, 15, 18, 20 o 25)\n ');
            energia(k)=input('La energía del equipo [MV], de lo contrario,
si desea salir del sistema, escriba 99\n ');
            if energia(k)==99
                return
            end
        end
        npacientes1(k)=input('El número de pacientes tratados diariamente
[pacientes/día] ');

        else if l==2
            energia(1)=input('Favor introducir la energía mayor en la cual el
equipo trabaja [MV] ');
            while energia(1)~=4 && energia(1)~=6 && energia(1)~=10 &&
energia(1)~=15 && energia(1)~=18 && energia(1)~=20 && energia(1)~=25
                fprintf('Por favor, debe elegir una energía válida para este
estudio ( 4, 6, 10, 15, 18, 20 o 25)\n');
                energia(1)=input('La energía mayor en la cual el equipo trabaja
el equipo [MV] de lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 99\n
');
                if energia(1)==99
                    return
                end
            end
            npacientes1(1)=input('Número de pacientes tratados diariamente con
dicha energía [paciente/día] ');
            energia(2)=input('La energía 2 del equipo [MV] ');
            while energia(2)~=4 && energia(2)~=6 && energia(2)~=10 &&
energia(2)~=15 && energia(2)~=18 && energia(2)~=20 && energia(2)~=25
                fprintf('Por favor, debe elegir una energía válida para este
estudio ( 4, 6, 10, 15, 18, 20 o 25)\n');
                energia(2)=input('La energía mayor en la cual el equipo trabaja
el equipo [MV], de lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 99\n
');
                if energia(2)==99
                    return
                end
            end
            npacientes1(2)=input('Número de pacientes tratados diariamente con
dicha energía [paciente/día] ');
        end
    end
    if energia==1.25
        l=1;
    end
    if energia(1)>10
        Betaa={'Plomo', 'Tugsteno'};
        Bet=cellstr(Betaa);
        b=input('Introducir el material del cabezal del equipo\n 1 Plomo,\n
2 Tungsteno\n ');
        while b~=1 && b~=2
            fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo \n')

```

```

        b=input('Introducir el factor beta de transmisión para neutrones
en el cabezal\n (1 si el cabezal es de plomo, 0.85 si el cabezal es de
tungsteno, de lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 99\n ');
        if b==99
            return
        end
        end
        Beta=char(Bet(b));
        if b==1
            beta=1;
        else
            beta=0.85;
        end
        Qn=input('Intensidad neutrónica Q_n emitida desde el cabezal [n/Gy]
');
        H0=input('Dosis equivalente neutrónica en el isocentro H_0 [Sv/Gy]
');
        deqneutron=dlmread('deqneutron.dat');
    end

    IMRT=input('Utiliza IMRT?\n 1 Si utiliza\n De lo contrario escriba 0\n
');
    while IMRT~=0 && IMRT~=1
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n');
        IMRT=input('Para IMRT escriba 1, de lo contrario escriba 0, si desea
salir del sistema, escriba 99 ');
        if IMRT==99
            return
        end
    end
    if IMRT==1
        CI=input('Favor introducir las características técnicas especiales,
empezando con el factor CI de IMRT ');
        if l==1
            porcentaje=input('Escriba el porcentaje de pacientes que son
tratados con IMRT [%] ');
            pore(1)=porcentaje/100;
        else if l==2
            porcentaje=input('Escriba el porcentaje de pacientes que son
tratados con IMRT para la energía 1 [%] ');
            pore(1)=porcentaje/100;
            porcentaje2=input('Escriba el porcentaje de pacientes que son
tratados con IMRT para la energía 2 [%] ');
            pore(2)=porcentaje2/100;
        end
    end
end
end
end
%INICIO DE LOS VALORES PARA LAS BARRERAS PRIMARIAS
accion={'Barrera Primaria','Barrera secundaria','Puerta con laberinto o
puerta de acceso directo directa'};
accion=input('Introduzca la acción que desea realizar:\n 1 Para calcular la
barrera primaria\n 2 Para barreras secundarias \n 3 Para puerta con
laberinto o puerta de acceso directo\n ');
while accion~=2 && accion~=1 && accion~=3
    fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')

```

```

    accion=input('1 Para barrera primaria\n 2 Para barreras secundarias \n 3
Para puerta con laberinto o puerta de acceso directo\n de lo contrario, si
desea salir del sistema, escriba 99 ');
    if accion==99
        return
    end
end
Accionn={'Barrera primaria','Barrera Secundaria','Puerta con Laberinto o
Acceso Directo'};
Acion=cellstr(Accionn);
Material={'Concreto','BPE','Acero','Plomo'};
densidad=[2.35 0.95 7.87 11.35];
Materia=cellstr(Material);
MaterialBS={'Concreto','Acero','Plomo'};
densidadBS=[2.35 7.87 11.35];
MateriaBS=cellstr(MaterialBS);

if accion==1
    laberinto(1)=0;
    Accion=char(Acion(accion));
    if SRS==1
        fprintf('Recuerde que en SRS todas las barreras son consideradas
primarias, a excepción\n del techo que se considera secundaria\n')
        nbarre=input('Número de barreras primarias que desea calcular ');
    else
        nbarre=input('Número de barreras primarias que desea calcular: ');
    end
    i=1;
    dsca=input('Distancia d_sca desde la fuente al isocentro [m] ');
    fprintf('Introduzca los parámetros de cada barrera\n')
    techo(1)=0;
    andiver=input('Favor introducir la divergencia del haz primario [°] ');
    for i=1:nbarre
        fprintf('\nPARA LA BARRERA %d \n', i)
        if SRS==0
            %El techo es considerado barrera secundaria para SRS
            if find(techo(:)==1)
                techo(i)=0;
            else
                techo(i)=input('La barrera es el techo? Si la respuesta es
si, escriba 1, de lo contrario, 0 ');
                while techo(i)~=1 && techo(i)~=0
                    fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
                    techo(i)=input('Si es techo, escriba 1, de lo contrario
0, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
                    if techo(i)==99
                        return
                    end
                end
            end
        end
        laberinto(i)=0;
    else
        techo(i)=0;
        if find(laberinto(:)==1)
            laberinto(i)=0;
        else
            laberinto(i)=input('La barrera es el laberinto? Si la
respuesta es si, escriba 1, de lo contrario, 0 ');
            while laberinto(i)~=1 && laberinto(i)~=0

```

```

        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
        laberinto(i)=input('Si es laberinto, escriba 1, de lo
contrario 0, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
        if laberinto(i)==99
            return
        end
    end
end
    nmaterial(i)=input('Escriba las cantidades de materiales diferentes
que utilizarán para esta barrera primaria del estudio, se permiten hasta 4\n
(plomo, acero, polietileno borado y concreto)\n Para altas energías, si
desea diferentes materiales, solo se permite concreto más uno de alto Z
(acero o plomo)\n ');
    while nmaterial(i)~=2 && nmaterial(i)~=1 && nmaterial(i)~=3 &&
nmaterial(i)~=4
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
        nmaterial(i)=input('Escriba las cantidades de materiales
diferentes que utilizarán para esta barrera primaria del estudio, se
permiten hasta 4\n (plomo, acero, polietileno borado y concreto) de lo
contrario, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
        if nmaterial(i)==99
            return
        end
    end
    if gt(energia(1),10)
        %el programa forzosamente te determina que la cantidad de
        %material utilizado seran 2 solamente, si es altas
        %energías
        if ge(nmaterial(i),2)
            nmaterial(i)=2;
            fprintf('Para equipos de altas energías, es necesario
utilizar un material con alto contenido de hidrógeno, por defecto,\n se
utilizará primeramente concreto\n');
            j1(i,1)=1;
            j1(i,2)=input('En este estudio, si se desea para la barrera
primaria diferentes materiales y el equipo es de alta(s) energía(s), por
defecto\n Se utilizará concreto más un material de alto contenido Z, por
favor escribir para:\n 3 Acero o \n 4 Plomo\n ');
            while j1(i,2)~=3 && j1(i,2)~=4
                fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
                j1(i,2)=input('para  acero 3 o para plomo escriba 4, de
lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 99\n ');
                if j1(i,2)==99
                    return
                end
            end
        else
            j1(i,1)=input('Por favor escriba el tipo de material que
utilizará para esta barrera,\n 1 Concreto\n 2 BPE\n ');
            while j1(i,1)~=2 && j1(i,1)~=1
                fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
                j1(i,1)=input('Por favor escriba el tipo de material que
utilizará para esta barrera,\n 1 Concreto\n 2 BPE,\n si desea salir del
sistema, escriba 99 ');
            end
        end
    end
end

```

```

        if j1(i,1)==99
            return
        end
    end
end
end
portotal(i)=0;
if le(energia(1),10)
    for m = 1:nmaterial(i)
        fprintf('Por favor escriba el material %d que utilizará para
esta barrera', m);
        j1(i,m)=input('\n 1 Concreto\n 2 BPE\n 3 Acero\n 4 Plomo\n
');
        while j1(i,m)~=2 && j1(i,m)~=1 && j1(i,m)~=3 && j1(i,m)~=4
            fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
            j1(i,m)=input('Por favor escriba el tipo de materiales
que utilizará para esta barrera,\n 1 Concreto\n 2 BPE\n 3 Acero\n 4 Plomo\n
De lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
            if j1(i,m)==99
                return
            end
        end
    end
    if gt(nmaterial(i),1) && energia(1)<=10
        por(i,m)=input('Escriba el porcentaje [%] del número de
capas decimorreductoras las cuales desea utilizar con este material ');
        portotal(i)=portotal(i)+por(i,m);
        while gt(portotal(i),100)
            fprintf('Disculpe pero la suma de los porcentajes da
mayor a 100\n');
            portotal(i)=portotal(i)-por(i,m);
            por(i,m)=input('Escriba el porcentaje [%] del número
de capas decimorreductoras las cuales desea utilizar con este material,\n
de lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 999 ');
            if por(i,m)==999
                return
            end
            portotal(i)=portotal(i)+por(i,m);
        end
    end
    elseif nmaterial(i)==1
        por(i,m)=100;
        portotal=100;
    end
end
elseif energia(1)>10 && eq(nmaterial(i),2)
    for m = 1:nmaterial(i)
        por(i,m)=50;
    end
elseif energia(1)>10 && eq(nmaterial(i),1)
    for m = 1:nmaterial(i)
        por(i,m)=100;
    end
end
if gt(nmaterial(i),1) && energia(1)<=10
    espacio(i)=input('Algunas veces, el utilizar diferentes
materiales, se realiza con el fin de ahorrar espacio, si esto es asi,\n por
favor escriba 1, de lo contrario, escriba 2 ');
    while espacio(i)~=2 && espacio(i)~=1
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
    end
end

```

```

        espacio(i)=input('Algunas veces, el utilizar diferentes
materiales, se realiza con el fin de ahorrar espacio, si esto es asi,\n por
favor escriba 1, de lo contrario, escriba 2, si desea salir del sistema,
escriba 99 ');
        if espacio(i)==99
            return
        end
    end
else
    espacio(i)=0;
end
%ahora determinamos el ancho de la barrera con lo siguiente
if SRS==1
    dentro(i)=1;
else
    dentro(i)=input('Por favor indicar si la barrera primaria se
encontrará hacia:\n 1 Dentro del cuarto\n 2 Afuera\n');
    while dentro(i)~=2 && dentro(i)~=1
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
        dentro(i)=input('Por favor indicar si la barrera primaria se
encontrará:\n 1 Dentro del cuarto\n 2 Afuera\n De lo contrario, si desea
salir del sistema, escriba 99 ');
        if dentro(i)==99
            return
        end
    end
end
d(i)=input('Distancia de esta barrera desde el isocentro al punto
más allá de 30cm [m] ');
if SRS==1
    dL(i)=d(i);
    angulo(i)=input('Ángulo de oblicuidad entre la dirección de dL y
la pared (o puerta) [°] ');
end
if SRS==0
    dlim(i)=input('Distancia mínima desde el isocentro a la pared,
suministrada por el fabricante [m] ');
else
    dlim(i)=1;
end
T(i)=input('Factor de ocupación T en esa zona ');
U(i)=input('Factor de Uso U ');
P(i)=input('Límite de dosis P [Sv/semana] ');
end
calculo_primaria;
hresultados_prim;
end

if accion==2
    Accion=char(Acion(accion));
    if SRS==1
        fprintf('Recuerde que en SRS todas las barreras son consideradas
primarias, a excepción\n del techo que se considera secundaria\n')
        nbarre2=1;
    else
        nbarre2=input('Número de barreras secundarias que desea calcular:
');
    end
end

```

```

i=1;
dsca=input('Distancia d_sca desde la fuente al isocentro [m] ');
if SRS==0
    fprintf('Introduzca los parámetros de cada barrera\n')
end
techo(1)=0;
laberinto(1)=0;

for i=1:nbarre2
    if SRS==0
        fprintf('\nPARA LA BARRERA SECUNDARIA NÚMERO %d \n', i)
    else
        fprintf('\nPARA EL TECHO, TENEMOS\n');
    end
    if SRS==0
        if find(laberinto(:)==1)
            laberinto(i)=0;
        else
            laberinto(i)=input('La barrera es el laberinto? Si la
respuesta es si, escriba 1, de lo contrario, 0 ');
            while laberinto(i)~=1 && laberinto(i)~=0
                fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
            end
            laberinto(i)=input('Si es laberinto, escriba 1, de lo
contrario 0, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
            if laberinto(i)==99
                return
            end
        end
    end
    else
        laberinto(i)=0;
        %En SRS se considera el laberinto como una barrera primaria
    end
    if laberinto(i)==1 || energia(1)==1.25
        nmaterial(i)=1;
    else
        if ne(energia(1),1.25)
            nmaterial(i)=input('Escriba las cantidades de materiales
diferentes que utilizarán para esta barrera secundaria del estudio, se
permiten hasta 3\n (plomo, acero y concreto) ');
            while nmaterial(i)~=2 && nmaterial(i)~=1 && nmaterial(i)~=3
                fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
            end
            nmaterial(i)=input('Si se utilizará un sólo material
para el blindaje de la barrera, escriba 1, de lo contrario,\n escriba las
cantidades de materiales diferentes que utilizará, en este estudio, se
permiten hasta 3\n (plomo, acero y concreto) de lo contrario, si desea salir
del sistema, escriba 99 ');
            if nmaterial(i)==99
                return
            end
        end
    end
    else
        nmaterial(i)=1;
    end
end

if SRS==0
    if find(techo(:)==1)

```

```

        techo(i)=0;
    else
        if laberinto(i)==1
            techo(i)=0;
        else
            techo(i)=input('La barrera es el techo? Si la respuesta
es si, escriba 1, de lo contrario, 0 ');
            while techo(i)~=1 && techo(i)~=0
                fprintf('No introdujo un número válido, por favor
vuelva a escribirlo\n')
                techo(i)=input('Si es techo, escriba 1, de lo
contrario 0, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
                if techo(i)==99
                    return
                end
            end
        end
    end

    end

    else
        techo(i)=1;
        %La barrera secundaria para SRS es el techo
    end
    portotal(i)=0;
    for m = 1:nmaterial(i)
        if le(energia(1),10) || gt(energia(1),1.25)
            fprintf('Por favor escriba el material %d que utilizará para
esta barrera', m);
            j1(i,m)=input('\n 1 Concreto\n 2 Acero\n 3 Plomo\n ');
            while j1(i,m)~=2 && j1(i,m)~=1 && j1(i,m)~=3
                fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
                j1(i,m)=input('Por favor escriba el tipo de materiales que
utilizará para esta barrera,\n 1 Concreto\n 2 Acero\n 3 Plomo\n De lo
contrario, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
                if j1(i,m)==99
                    return
                end
            end
        end
        else
            j1(i,m)=1;
        end
        if gt(nmaterial(i),1)
            por(i,m)=input('Escriba el porcentaje [%] del número de
capas decimorreductoras las cuales desea utilizar con este material ');
            portotal(i)=portotal(i)+por(i,m);
            while gt(portotal(i),100)
                fprintf('Disculpe pero la suma de los porcentajes da
mayor a 100\n');
                portotal(i)=portotal(i)-por(i,m);
                por(i,m)=input('Escriba el porcentaje [%] del número de
capas decimorreductoras las cuales desea utilizar con este material,\n de
lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 999 ');
                if por(i,m)==999
                    return
                end
            end
            portotal(i)=portotal(i)+por(i,m);
        end
    end
end
else

```

```

        por(i,m)=100;
        portotal=100;
    end
end
if gt(nmaterial(i),1)
    espacio(i)=input('Algunas veces, el utilizar diferentes
materiales, se realiza con el fin de ahorrar espacio, si esto es asi,\n por
favor escriba 1, de lo contrario, escriba 2 ');
    while espacio(i)~=2 && espacio(i)~=1
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
        espacio(i)=input('Algunas veces, el utilizar diferentes
materiales, se realiza con el fin de ahorra espacio, si esto es asi,\n por
favor escriba 1, de lo contrario, escriba 2, si desea salir del sistema,
escriba 99 ');
        if espacio(i)==99
            return
        end
    end
else
    espacio(i)=0;
end

if SRS==0
    dL(i)=input('Distancia del isocentro al punto proyectado por la
radiación de fuga d_L [m] ');
    angulo(i)=input('Ángulo de dispersión mínimo [°] ');
    if laberinto(i)==0
        dsec(i)=input('Distancia del objeto que dispersa al punto
proyectado d_sec [m] ');
    end
else
    dL(i)=input('Distancia del isocentro al punto proyectado por la
radiación de fuga d_L [m] ');
    angulo(i)=90;
end

T(i)=input('Factor de ocupación T en esa zona ');
U(i)=input('Factor de Uso U ');
P(i)=input('Limite de dosis P [Sv/semana] ');
end
calculo_secundaria;
hresultados_secun;
end

if accion==3
    Accion=char(Acion(accion));
    laberinto(1)=input('La intalación posee laberinto? \n 1 Si\n 2 No\n ');
    while laberinto(1)~=1 && laberinto(1)~=2
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
        laberinto(1)=input('Por favor escriba 1 si la instalación posee
laberinto, sino posee, escriba el número 2,\n de lo contrario, para salir
del sistema, escriba 99 ');
        if laberinto(1)==99
            return
        end
    end
end
Laberintoo={'Puerta con Laberinto','Puerta con Acceso Directo'};

```

```

Laberintooo=cellstr(Laberintoo);
Laberinto1=char(Laberintooo(laberinto));
techo(1)=0;
if laberinto(1)==1
    geometria=input('Favor elija la geometria del laberinto, si el
laberinto se encuentra\n 1 Perpendicular al eje del gantry,\n 2 Paralelo \n
');
    while geometria~=1 && geometria~=2
        fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
        geometria=input('Escriba 1 si el laberinto se encuentra
paralelo, o 2 si si esta perpendicular,\n de lo contrario, para salir del
sistema, escriba 99 \n');
        if geometria==99
            return
        end
    end
    if gt(energia(1),10) || energia(1)==1.25
        j1=1;
    else
        j1=input('Por favor, escriba el material con lo cual construirá
la pared interna del laberinto\n 1 Concreto\n 2 Plomo\n 3 Acero\n ');
        while j1~=2 && j1~=1 && j1~=3
            fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
            j1=input(' 1 Concreto\n 2 Plomo\n 3 Acero,\n de lo
contrario, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
            if j1==99
                return
            end
        end
    end
end

if geometria==1
    if energia(1)~=1.25
        j2=input('Tipo de material de la barrera primaria
comprometida en A_0,\n 1 Concreto\n 2 Plomo\n 3 Acero\n ');
        while j2~=2 && j2~=1 && j2~=3
            fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
            j2=input('para concreto 1, para plomo 2 y para acero 3,
de lo contrario, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
            if j2==99
                return
            end
        end
    end
    else
        j2=1;
    end
end
else
    if energia(1)~=1.25
        j2=input('Tipo de material de la barrera secundaria
comprometida en A_p:\n 1 Concreto\n 2 Plomo\n 3 Acero\n ');
        while j2~=2 && j2~=1 && j2~=3
            fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva
a escribirlo\n')
            j2=input('\n 1 Concreto,\n 2 Plomo y\n 3 Acero, de lo
contrario, si desea salir del sistema, escriba 99 ');
            if j2==99
                return
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
else
    j2=1;
end
end
Materialbp=char(Materia(j2));
if geometria==1
    if energia(1)~=1.25
        j3=input('Tipo de material de las barreras secundarias
comprometidas en A_1, \n 1 Concreto\n 2 Plomo\n 3 Acero\n');
    else
        j3=1;
    end
else
    if energia(1)~=1.25
        j3=input('Tipo de material de las barreras secundarias A_1 y
A_2, \n 1 Concreto\n 2 Plomo\n 3 Acero\n');
    else
        j3=1;
    end
end
while j3~=2 && j3~=1 && j3~=3
    fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
    j3=input(' \n 1 Concreto\n 2 Plomo\n 3 Acero\n de lo contrario,
si desea salir del sistema, escriba 99 ');
    if j3==99
        return
    end
end
Materialbs=char(Materia(j3));

    fprintf('Favor observar cuidadosamente las figuras mostrada en el
estudio y escriba los valores solicitados\n ')
    dzz=input('La distancia d_zz desde la pared Z de la línea media del
laberinto a la entrada de la puerta [m] ');
    altura=input('La altura del laberinto [m] ');
    ancho=input('La anchura del laberinto [m] ');
    while le(dzz/sqrt(altura*ancho),2) || gt(dzz/sqrt(altura*ancho),6)
    && le(altura/ancho,1) || gt(altura/ancho,2)
        fprintf('Disculpe, pero las dimensiones del laberinto no cumplen
con las condiciones para lograr hacer los cálculos\n a partir de las
ecuaciones de este programa, 2<dzz/sqrt(ancho*altura)<6; y 1<altura/ancho<2,
\n por favor, redimensione el laberinto y vuelva a intentarlo, de lo
contrario, si desea salir del sistema,\n escriba 999 \n')
        dzz=input('La distancia d_zz desde la pared Z de la línea media
del laberinto a la entrada de la puerta [m] ');
        altura=input('La altura del laberinto [m] ');
        ancho=input('La anchura del laberinto [m] ');
        if eq(dzz,999) || eq(altura,999) || eq(ancho,999)
            return
        end
    end
    tlaberinto=input('Por favor escriba el espesor de la pared interna
del laberinto [cm] ');
    angulopuerta=input('Ángulo de oblicuidad entre la dirección de dL y
la puerta [°] ');
    tdefinitivo=(tlaberinto/cos(angulopuerta*pi/180));

```

```

d sca=input('La distancia d_sca desde la fuente al isocentro [m] ');
if geometria==1
    dr=input('La distancia d_r del punto central del área A0 hasta
la línea proyectada media del laberinto [m] ');
    dz=input('La distancia d_z en la línea media del laberinto del
punto proyectado A [m] ');
    dpp=input('La distancia d_pp del isocentro a la pared Z [m] ');
    dLS=input('La distancia d_LS desde la fuente a la pared Z de la
línea media del laberinto [m] ');
    dh=dpp+d sca;
    dsec=input('La distancia d_sec desde el isocentro a la línea
media de A1 del laberinto proyectada en Z [m] ');
    dhd=input('La distancia más cercana d_L del cabezal a la puerta
[m] ');
    dL=dhd;
    A0=input('El área A_0 proyectado desde el isocentro hasta la
barrera primaria Z [m^2] ');
    Az=input('El área A_z proyectado desde el punto medio de A_0 a
la pared externa del laberinto [m^2] ');
else
    dr=1;
    dp=input('La distancia d_p de la fuente al punto medio de Ap [m]
');
    dc=input('La distancia d" del punto P a la puerta [m] ');
    dip=input('Distancia del isocentro al punto P [m] ');
    d11=input('Distancia d1 del isocentro al punto de la pared Z [m]
');
    d22=input('Distancia d2 del punto de la pared Z a la entrada del
laberinto [m] ');
    di=input('Distancia di desde la fuente al punto medio de A1 [m]
');
    dt=input('Distancia dt más cercana desde el cabezal a la puerta
[m] ');
    A0=1;
    Ap=input('El área A_p proyectado desde la fuente a la pared
externa del laberinto [m^2] ');
    A2=ancho*altura;
end
if geometria==1
    A1=input('El área A_1 proyectado desde la puerta hasta la pared
Z [m^2] ');
else
    A1=input('El área proyectado desde la dispersión del paciente
(isocentro) hasta la barrera secundaria [m^2] ');
end
angulopaciente=input('Ángulo de dispersión mínimo de la radiación
dispersada por el paciente a la superficie A_1 [°] ');
Ul=input('Factor de uso U en la pared ');
Pp=input('Limite de dosis P en la puerta [Sv/semana] ');
angulo(1)=angulopuerta;

if energia(1)>10
    Sr=input('Area superficial S_r interna del cuarto de tratamiento
(pared, techo y piso)[m^2] ');
    S0=input('Área transversal S_0 de la entrada al laberinto[m^2]
');
    S1=ancho*altura;
    d_1=input('Distancia d_1 isocentro al punto central E del
pasillo del laberinto [m] ');

```

```

        d2=input('Distancia d_2 del punto central E del pasillo del
laberinto a la puerta [m] ');
        TVLplomo0_2=0.5;
        laminaZ= TVLplomo0_2;
    else
        laminaZ=input('En este estudio, las puertas constaran de acero o
plomo\n escriba: 1 Si desea la lámina de acero\n 2 Si desea la lámina de
plomo');
        while laminaZ~=1 && laminaZ~=2
            fprintf('No introdujo un número válido, por favor vuelva a
escribirlo\n')
            laminaZ=input('Por favor escriba: 1 Si desea la lámina de
acero\n 2 Si desea la lámina de plomo,\n de lo contrario, para salir del
sistema, escriba 99 ');
            if laminaZ==99
                return
            end
        end
        end
        TVLBPE0_1=4.5;
        TVLplomo3_6=6.1;
        TVLacero0_2=2.6;
        TVLplomo0_2=0.5;
        if laminaZ==1
            TVLpuerta=TVLacero0_2;
        else
            TVLpuerta=TVLplomo0_2;
        end

    else
        TVLBPE0_1=8.5;
        TVLplomo3_6=6.1;
        if gt(energia(1),10)
            dL=input('Distancia dL desde el isocentro a la puerta [m] ');
            dsec=input('La distancia d_sec desde el isocentro a la puerta
[m] ');
            d_1=dL;
            Sr=input('Area superficial S_r interna del cuarto de tratamiento
(pared, techo y piso)[m^2] ');
            Pp=input('Dosis P mínima semanal en la puerta [Sv/semana] ');
            P(1)=Pp;
        else
            dsec=input('La distancia d_sec desde el isocentro a la puerta
[m] ');
            dL=input('Distancia mínima dL desde el cabezal a la puerta [m]
');
            U(1)=input('Factor de Uso U ');
            P(1)=input('Dosis P mínima semanal en la puerta [Sv/semana] ');
            Pp=P(1);

        end
        T(1)=input('Factor de ocupación T en la puerta ');
        Tp=T(1);
    end
    if SRS==1
        d(1)=dL;
    end
    Laberinto;
    hresultados_laberinto;
end

```

A.2 Código de calculo_primaria.m

```
%Programa que calcula las barreras primarias tanto en equipos
%convensionales como en SRS

horasemanales=horas*dias;

if l==1
    Npromedio=(npacientes1(1))/horas;
    % numero de pacientes promedio que se tratan
    M=Nmax/Npromedio;
else
    Npromedio=(npacientes1(1)+npacientes1(2))/horas;
    M=Nmax/Npromedio;
end
d1=d;
    %Para definir los maximos y minimos espesores de cada TVL, la posicion
    %de cada j1 esta acomodado de mayor volumen abarcado al menor

for i=1:nbarre
    Hntot(i)=0;
    [dmax(i),xx(i)]=max(j1(i,:));
    [dmin(i),xm(i)]=min(find(j1(i,:))>0);
    %para barreras con diferentes materiales, se determina la prioridad de
    %los materiales
    if espacio(i)==1
        mm(i)=xx(i);
        mx(i)=xm(i);
    else
        mm(i)=xm(i);
        mx(i)=xx(i);
    end

    BpritL(i,1)=1;
    BpritL(i,2)=1;
    Htot(i)=0;
    Btot(i,1)=1;
    Btot(i,2)=1;
    BLtot(i,1)=1;
    BLtot(i,2)=1;
    HLTOT(i)=0;
    %primero, empiezo con el barrido del material

    for m=1:nmaterial(i)

        %lo ddefino segun j1
        if j1(i,m)==1
            TVL = dlmread('TVLconcreto.dat');
            TVLL=dlmread('TVL_L_concreto.dat');
            mconcreto=m;
        elseif j1(i,m)==2
            TVL =dlmread('TVL_BPE.dat');
            TVLL=dlmread('TVL_L_BPE.dat');
            mBPE=m;
        elseif j1(i,m)==3
            TVL =dlmread('TVLacero.dat');
            TVLL=dlmread('TVL_L_acero.dat');
```

```

        macero=m;
elseif j1(i,m)==4
    TVL = dlmread('TVLplomo.dat');
    TVLL=dlmread('TVL_L_plomo.dat');
    mplomo=m;
end

for k=1:l

    W1(k)=npacientes1(k)*dosisabpaciente*dias;
    if dsca==0.8
        W1(k)=W1(k)*(dsca^2);
    end
    %busco lo TVL comprometidos dependiendo del material y energia
    [x,col]=find(TVL(:,1)==energia(k));
    tvl11(k,m)=TVL(x,2);
    tvle1(k,m)=TVL(x,3);
    if find(2<j1(i,:))
        if techo(i)==1
            %para determinar el grosor del techo, tambien se debe
            tomar en cuenta el
            %grosor del concreto, ya que en esta condicion, se
            %tienen capas de acero y/o plomo, los cuales no pueden
            %sostenerse solos
            TVLconcreto = dlmread('TVLconcreto.dat');
            [f,col]=find(TVLconcreto(:,1)==energia(1));
            tvlconcreto=TVLconcreto(f,2);
        end
        tvll1(k,m)=TVLL(x,2);
        tvll2(k,m)=TVLL(x,3);
        Bpri1(i,k)=P(i)*((d1(i)+dsca)^2)/(W1(k)*U(i)*T(i));
        ncdecimo1(i,k)=log10(1/Bpri1(i,k));
        %Al obtener el total del numero de capas decimorreductoras, es
        %necesario saber cual del porcentaje se utilizará para cada
        %material
        nmate(i,k,m)=ncdecimo1(i,k)*por(i,m)/100;

        if gt(nmate(i,k,m),1)
            t(i,k,m)=tvll1(k,m)+((nmate(i,k,m)-1)*tvle1(k,m));
        else
            t(i,k,m)=tvll1(k,m)*nmate(i,k,m);
        end
        if SRS==1
            %defino mi espesor segun la radiacion de fuga ocasionada en
            el

            %cabezal del robot
            WL1(k)=CI*W1(k);
            BpriL1(i,k)=(10^3)*(P(i)*(d1(i)^2)/(WL1(k)*T(i)));
            nL(i,k)=log10(1/BpriL1(i,k));
            nmateL(i,k,m)=nL(i,k)*por(i,m)/100;
            if gt(nL(i,k),1)
                %determino el espesor para atenuar la fuga
                tL(i,k,m)=tvll1(k,m)+((nmateL(i,k,m)-1)*tvll2(k,m));
            else
                tL(i,k,m)=tvll1(k,m)*nmateL(i,k,m);
            end
            %defino la regla de las dos fuentes para los espesores t y tL

```

```

[t(i,k,m),tmayor(i,k,m),tvlmayor(k,m)]=regla2fuentes(t(i,k,m),tL(i,k,m),tvle
1(k,m),tvll2(k,m));
    tvle1(k,m)=tvlmayor(k,m);
end
end
if l==2

[tdef(i,m),tmayordef(i,m),tvlmayordef(i,m)]=regla2fuentes(t(i,1,m),t(i,2,m),
tvle1(1,m),tvle1(2,m));
else
    tdef(i,m)=t(i,1,m);
    tvlmayordef(i,m)=tvle1(1,m);
    tmayordef(i,m)=t(i,1,m);
end
ndef(i,m)=tdef(i,m)/tvlmayordef(i,m);
%con este valor, sabremos cuantos nTVL necesitamos
%ahora hago el calculo del factor de transmision para para energia
%segun el material

for k=1:l
    %ahora determino el factor de transmision para cada material
    %calculado

    Bprim(i,k,m)= ftransm ( tdef(i,m), tvll1(k,m), tvle1(k,m) );
    %aqui multiplico los factores de transmision de cada material,
    %segun su energia
    Btot(i,k)=Btot(i,k)*Bprim(i,k,m);
    if SRS==1
        BLm(i,k,m)=ftransm ( tdef(i,m), tvll1(k,m), tvll2(k,m) );
        BLtot(i,k)=BLtot(i,k)*BLm(i,k,m);
    end
end
end

for k=1:l
    [IDR(i,k), H(i,k), Rw(i,k),Rh(i,k)] = dosiseq (Btot(i,k), W1(k),
U(i), T(i), d1(i), dsca, Dt0,M,horasemanales);
    if SRS==1

        [IDRL(i,k),HL(i,k),RWL(i,k),RHL(i,k)]=HLMV(BLtot(i,k),WL1(k),T(i),dL(i),Dt0,
M,horasemanales);
        Htot(i)=HL(i,k)+H(i,k)+Htot(i);
        HLTOT(i)=HLTOT(i)+HL(i,k);
    else
        Htot(i)=H(i,k)+Htot(i);
    end
end
k=1;

if energia(1)<=10 || nmaterial(i)==1
    %Esta condicion se debe a que si el equipo es de bajas energias, NO
existe
    %produccion de neutrones, o si el equipo es de altas energias, pero
el material
    %es UNO solo, el programa automaticamente lo calcula como concreto,
siendo
    %este un material ideal para frenar los neutrones
    while gt(Htot(i),P(i))

```

```

%calcularlo con el nuevo grosor del material, el material elegido
%(mm(i)) es el que cumple con la condicion de espacio o no
tdef(i,mm(i))=tdef(i,mm(i))+(0.301* tvlmayordef(i,mm(i)));
ndef(i,mm(i))=tdef(i,mm(i))/tvlmayordef(i,mm(i));
for k=1:l
    Bprim(i,k,mm(i))= 10^(-(1+((tdef(i,mm(i))-
tvll1(k,mm(i)))/tvle1(k,mm(i)))));
    %aqui multiplico los factores de transmision de cada
material,
    %segun su energia
    if SRS==1
        BLm(i,k,mm(i))=ftransm ( tdef(i,mm(i)), tvll1(k,mm(i)),
tvll2(k,mm(i)) );
        BLtot(i,k)=1;
    end
    Btot(i,k)=1;
    for m=1:nmaterial(i)
        Btot(i,k)=Btot(i,k)*Bprim(i,k,m);
        if SRS==1
            BLtot(i,k)=BLtot(i,k)*BLm(i,k,m);
        end
    end
    %teniendo entonces los factores de transmision para los
materiales
    %juntos
    Htot(i)=0;
    for k=1:l
        [IDR(i,k), H(i,k), Rw(i,k),Rh(i,k)] = dosiseq
(Btot(i,k), W1(k), U(i), T(i), d1(i), dsca, Dt0,M,horasemanales);
        if SRS==1
            [IDRL(i,k),HL(i,k),RWL(i,k),RHL(i,k)]=HLMV(BLtot(i,k),WL1(k),T(i),dL(i),Dt0,
M,horasemanales);
            HLTOT(i)=HLTOT(i)+HL(i,k);
            Htot(i)=HL(i,k)+H(i,k)+Htot(i);
        else
            Htot(i)=H(i,k)+Htot(i);
        end
    end
end
end
end
if gt(nmaterial(i),1)
    if gt(energia(1),10)
        if j1(i,2)==3
            zeta=macero;
        else if j1(i,2)==4
            zeta=plommo;
        end
    end
end
end
end
%A partir de aqui, debemos tomar en cuenta si la barrera primaria es el
%techo, ya que si es asi, debemos agregarle una capa de concreto antes
%de colocar el plomo o acero.
if techo(i)==1
    if gt(energia(1),10)
        if find(2<j1(i,:))
            t1(i)=30.5;
        end
    end
end

```

```

        %determino cuantos tvl le "quito" al plomo, en el caso de no
        %haber concreto, solo en el soporte
        ntecho(i)=t1(i)/tvlconcreto;
        %obligatoriamente, cuando se habla de altas energias y
        %materiales con alta Z conjuntamente, se incluyen capas de
        %concreto para blindar los neutrones
        if gt(tdef(i,mconcreto),t1(i))
            t2(i)=tdef(i,mconcreto)-t1(i);
        else
            t2(i)=0;
            tdef(i,mconcreto)=t1(i);
            if lt(ntecho(i),ndef(i,zeta))
                tdef(i,zeta)=(ndef(i,zeta)-
ntecho(i))/tvlmayor(i,1,zeta);
            else
                tdef(i,zeta)=0;
            end
        end
    end
else
    if find(2<j1(i,:))
        if find(j1(i,:)==1)
            if lt(tdef(i,mconcreto),30.5)
                tdef(i,mconcreto)=30.5;
            end
        else
            t1(i)=30.5;
            ntecho(i)=t1(i)/tvlconcreto;
            if lt(ntecho(i),ndef(i,mx(i)))
                tdef(i,mx(i))=(ndef(i,mx(i))-
ntecho(i))/tvlmayor(i,1,mx(i));
            else
                tdef(i,mx(i))=0;
            end
        end
    end
end
else
    if gt(energia(1),10)
        t1(i)=0;
        t2(i)=tdef(i,mconcreto);
    end
end
for k=1:l
    if gt(energia(k),10)
        if gt(nmaterial(i),1)
            %cuando se trata de altas energias y el usuario desea
            %utilizar metal, el programa arroja obligatoriamente el uso
            %de concreto mas acero o plomo
            %Como en este trabajo, la prioridad es optimizaar los
            %materiales, si la barrera a blindar es techo, solo se
            %utiliza una capa minima (0,305m de concreto) para soporte,
            %de lo contrario t1=0
            if j1(i,2)==3
                R(i,k)=1.7e-6;
            else if j1(i,2)==4
                zeta=mplomo;
                if energia(k)==15
                    R(i,k)=3.5e-6;
                elseif ge(energia(k),18)

```

```

        R(i,k)=19e-6;
    end
end
end
%ahora calculemos la produccion de neutrones para
aceleradores de altas
%energias
    Hn(i,k)=dosisabpaciente*R(i,k)*F*(10^( -
t1(i)/tv111(k)))*(10^(-t2(i)/25))/((tdef(i,zeta)/2)+t2(i)+30);
    Hntot(i)=Hntot(i)+Hn(i,k);
end
end
end
if gt(energia(1),10) && gt(nmaterial(i),1)
    Htot(i)=(2.7*Htot(i))+Hntot(i);
end

if energia(1)>10 && nmaterial(i)>1
    while gt(Htot(i),P(i))
        Htot(i)=0;
        Hntot(i)=0;
        %inicio nuevamente el valor del factor de transmision para ahora
        %calcularlo con el nuevo grosor del material
        tdef(i,mconcreto)=tdef(i,mconcreto)+(0.301*
tvlmayordef(i,mconcreto));
        ndef(i,mconcreto)=tdef(i,mconcreto)/tvlmayordef(i,mconcreto);
        for k=1:l
            Bprim(i,k,mconcreto)= 10^(-(1+((tdef(i,mconcreto)-
tv111(k,mconcreto))/tv11(k,mconcreto)))));
            %aqui multiplico los factores de transmision de cada
material,
            %segun su energia
            if SRS==1
                BLm(i,k,mconcreto)=ftransm ( tdef(i,mconcreto),
tv111(k,mconcreto), tv112(k,mconcreto) );
                BLtot(i,k)=1;
            end
            Btot(i,k)=1;
            for m=1:nmaterial(i)
                Btot(i,k)=Btot(i,k)*Bprim(i,k,m);
                if SRS==1
                    BLtot(i,k)=BLtot(i,k)*BLm(i,k,m);
                end
            end
            %teniendo entonces los factores de transmision para los
materiales
            %juntos
            Htot(i)=0;
            [IDR(i,k), H(i,k), Rw(i,k),Rh(i,k)] = dosiseq (Btot(i,k),
W1(k), U(i), T(i), d1(i), dsca, Dt0,M,horasemanales);
            Htot(i)=H(i,k)+Htot(i);
            if gt(energia(k),10) && gt(nmaterial(i),1)
                if gt(tdef(i,mconcreto),t1(i))
                    t2(i)=tdef(i,mconcreto)-t1(i);
                elseif find(j1(i,:)==1) && gt(t1(i),tdef(i,mconcreto))
                    t2(i)=0;
                    tdef(i,mconcreto)=t1(i);
                end
                Hn(i,k)=dosisabpaciente*R(i,k)*F*(10^( -
t1(i)/tv111(k)))*(10^(-t2(i)/25))/((tdef(i,zeta)/2)+t2(i)+30);

```

```

            Hntot(i)=Hntot(i)+Hn(i,k);
        end
    end
    if gt(energia(1),10) && gt(nmaterial(i),1)
        Htot(i)=(2.7*Htot(i))+Hntot(i);
    end
end
%ahora vamos a sumar el espesor total que llevara la barrera

tttotal(i)=0;
for m=1:nmaterial(i)
    if SRS==1
        tdef(i,m)=tdef(i,m)*cos(angulo(i)*pi/180);
    end
    tttotal(i)=tttotal(i)+tdef(i,m);
    %con este espesor total, determino si concuerda con los limites que
    %da el fabricante para lograr operar el equipo sin problemas
end
if techo(i)==1
    if find(2<j1(i,:))
        if find(j1(i,:)==1)
            %si forzosamente agrego el soporte de concreto, debo sumarlo
            %saber el espesor total definitivo
        else
            tttotal(i)=tttotal(i)+t1(i);
        end
    end
end
if SRS==0
    limitedistancia(i)=d1(i)-(tttotal(i)/100)-0.3;

    if dlim(i) > limitedistancia(i)
        %se agranda el valor de d1(i) colocandole otro valor para asi
        tener un valor mas adecuado para
        %el buen funcionamiento del equipo
        d1(i)=dlim(i)+(tttotal(i)/100)+0.3;
        Htot(i)=0;
        for k=1:l
            [IDR1(i,k),H(i,k),Rw(i,k),Rh(i,k)]= dosiseq (Btot(i,k),
W1(k), U(i), T(i), d1(i),dsca, Dt0,M,horasemanales);
            Htot(i)=Htot(i)+H(i,k);
        end
    end
    if dentro(i)==1
        dw(i)=dsca+d1(i)-(tttotal(i)/100)-0.3;
    else
        dw(i)=dsca+d1(i)-0.3;
    end
    anchobarrera(i)=(dw(i)*2*tan(ander*pi/(2*180)))+0.6;
else
    anchobarrera=0;
end
end
end

```

A.3 Código del programa calculo_secundaria.m

```
horasemanales=horas*dias;
if l==1
    Npromedio=(npacientes1(1))/horas;
    % numero de pacientes promedio que se tratan
    M=Nmax/Npromedio;
else
    Npromedio=(npacientes1(1)+npacientes1(2))/horas;
    M=Nmax/Npromedio;
end
%Para definir los maximos y minimos espesores de cada TVL, la posicion
%de cada j1 esta acomodado de mayor volumen al menor
FRAC=dlmread('FRAC.dat');

for i=1:nbarre2
    [dmax,xx(i)]=max(j1(i,:));
    [dmin,xm(i)]=min(find(j1(i,:))>0);

    if espacio(i)==1
        mm(i)=xx(i);
        mx(i)=xm(i);
    else
        mm(i)=xm(i);
        mx(i)=xx(i);
    end

    HLTOT(i)=0;
    BpritL(i,1)=1;
    BpritL(i,2)=1;
    Htot(i)=0;
    Bscatot(i,1)=1;
    Bscatot(i,2)=1;
    BLtot(i,1)=1;
    BLtot(i,2)=1;

    %primero, empiezo con el material

    for m=1:nmaterial(i)
        TVLscaconcreto = dlmread('TVL_sca_concreto.dat');
        TVLLconcreto = dlmread('TVL_L_concreto.dat');
        %lo defino segun j1
        if j1(i,m)==1
            TVLsca = dlmread('TVL_sca_concreto.dat');
            TVLL = dlmread('TVL_L_concreto.dat');
            mconcreto=m;
        elseif j1(i,m)==2
            TVLsca =dlmread('TVL_sca_acero.dat');
            TVLL=dlmread('TVL_L_acero.dat');
            macero=m;
        elseif j1(i,m)==3
            TVLsca = dlmread('TVL_sca_plomo.dat');
            TVLL=dlmread('TVL_L_plomo.dat');
            mplomo=m;
        end

        for k=1:l
            w1(k)=npacientes1(k)*dosisabpaciente*dias;
            if dsca==0.8
                w1(k)=w1(k)*(dsca^2);
```

```

end
if IMRT==1
    if SRS==1
        WL(k)=CI*W1(k);
    else
        WL(k)=((1-pore(k))+(CI*pore(k)))*W1(k);
    end
else
    WL(k)=W1(k);
end
if SRS==0
    if laberinto(i)==0
        [val,col]=min(abs(FRAC(1,:)-angulo(i)));
        [x1,col1]=find(FRAC(:,1)==energia(k));
        [ffila,fcol]=size(FRAC);
        [a_(k,i)]=inter(val,FRAC,col,fcol,x1,angulo(i));
        %a_(k)=FRAC(x1,col);
        [x2,col2]=min(abs(TVLsca(1,:)-angulo(i)));
        [x3,col3]=find(TVLsca(:,1)==energia(k));
        [scafila,scacol]=size(TVLsca);
        [TVL_sca(k,m,i)]=inter(x2,TVLsca,col2,scacol,x3,angulo(i));
        %TVL_sca(k,m)=TVLsca(x3,col2);
    end
end
[x4,col4]=find(TVLL(:,1)==energia(k));
TVL_L1(k,m)=TVLL(x4,2);
TVL_L2(k,m)=TVLL(x4,3);
if SRS==0
    if laberinto(i)==0
        [x2concreto,col2concreto]=min(abs(TVLscaconcreto(1,:)-
angulo(i)));
        [x3concreto,col3concreto]=find(TVLscaconcreto(:,1)==energia(k));
        TVL_scaconcreto(k)=TVLscaconcreto(x3concreto,col2concreto);
    end
end
[x4concreto,col4concreto]=find(TVLLconcreto(:,1)==energia(k));
TVL_L1concreto(k)=TVLLconcreto(x4concreto,2);

if find(1<j1(i,:))
    if techo(i)==1
        %para determinar el espesor del techo, tambien se debe
tomar en cuenta el
        %espesor del concreto
        if SRS==1
            if laberinto(i)==1
                tvlconcreto=TVL_L1concreto(1);
            end
        else
            if TVL_scaconcreto(1)< TVL_L1concreto(1)
                tvlconcreto=TVL_L1concreto(1);
            else
                tvlconcreto=TVL_scaconcreto(1);
            end
        end
    end
end
end
if SRS==0
    if laberinto(i)==0

```

```

Bsc(i,k)=(P(i)*(dsca^2)*(dsec(i)^2)*400)/(a_(k,i)*W1(k)*T(i)*U(i)*F);
    nsca(i,k)=-log10(Bsca(i,k));
    nmatesca(i,k,m)=nsca(i,k)*por(i,m)/100;
    tsca(i,k,m)=TVL_sca(k,m,i)*nmatesca(i,k,m);
end
end

BpriL1(i,k)=(10^3)*(P(i)*(dL(i)^2)/(WL(k)*T(i)));
nL(i,k)=log10(1/BpriL1(i,k));
nmateL(i,k,m)=nL(i,k)*por(i,m)/100;
if gt(nmateL(i,k,m),1)
    %determino el espesor para atenuar la fuga
    tL(i,k,m)=TVL_L1(k,m)+((nmateL(i,k,m)-1)*TVL_L2(k,m));
else
    tL(i,k,m)=TVL_L1(k,m)*nmateL(i,k,m);
end

end

if l==2
    if laberinto(i)==0

[tscat(i,m),tmayorsca(i,m),tvlmayorsca(i,m)]=regla2fuentes(tsca(i,1,m),tsca(
i,2,m),TVL_sca(1,m,i),TVL_sca(2,m,i));

[tLt(i,m),tmayorL(i,m),tvlmayorL(i,m)]=regla2fuentes(tL(i,1,m),tL(i,2,m),TVL
_L1(1,m),TVL_L1(2,m));

[tdef(i,m),tmayordef(i,m),tvlmayordef(i,m)]=regla2fuentes(tscat(i,m),tLt(i,m
),tvlmayorsca(i,m),tvlmayorL(i,m));

        else
            tLt(i,m)=tL(i,1,m);
            tmayorL(i,m)=tL(i,1,m);
            tvlmayorL(1,m)=TVL_L1(1,m);
            tdef(i,m)=tL(i,1,m);
            tmayordef(i,m)=tL(i,1,m);
            tvlmayordef(i,m)=TVL_L1(1,m);
        end

    else
        if laberinto(i)==0

[tdef(i,m),tmayordef(i,m),tvlmayordef(i,m)]=regla2fuentes(tsca(i,1,m),tL(i,1
,m),TVL_sca(1,m,i),TVL_L1(1,m));

            else
                tdef(i,m)=tL(i,1,m);
                tvlmayordef(i,m)=TVL_L1(1,m);
                tmayordef(i,m)=tL(i,1,m);
            end

        end
        ndef(i,m)=tdef(i,m)/tvlmayordef(i,m);
        for k=1:l
            %ahora determino el factor de transmision para cada material
            %calculado
            if SRS==0

```

```

        if laberinto(i)==0
            Bscam(i,k,m)= 10^(-tdef(i,m)/TVL_sca(k,m,i) );
            %aqui multiplico los factores de transmision de cada
material,
            %segun su energia
            Bscatot(i,k)=Bscatot(i,k)*Bscam(i,k,m);
        end
    end
    BLM(i,k,m)=ftransm ( tdef(i,m), TVL_L1(k,m), TVL_L2(k,m) );
    BLtot(i,k)=BLtot(i,k)*BLM(i,k,m);
end
end
%culminando el calculo para varias energias, se determina el espesor
%adecuado con la regla de las dos fuentes
%ahora tenemos los factores de transmision segun la energia de todos los
%materiales juntos, ahora hay que sumar las dosis equivalentes dadas,
%segun estos factores de transmision
for k=1:l
    [IDRL(i,k),HL(i,k),RWL(i,k),RHL(i,k)]=HLMV(BLtot(i,k),WL(k),T(i),dL(i),Dt0,M
,horasemanales);
    if SRS==0
        if laberinto(i)==0
            Hsca(i,k)=Bscatot(i,k)*a_(k,i)*F*Wl(k)*T(i)*U(i)/((dsca^2)*(dsec(i)^2)*400);
            Htot(i)=HL(i,k)+Hsca(i,k)+Htot(i);
        end
    else
        Htot(i)=Htot(i)+HL(i,k);
    end
    HLTOT(i)=HLTOT(i)+HL(i,k);
end
k=1;
while gt(Htot(i),P(i))
    tdef(i,mm(i))=tdef(i,mm(i))+(0.301* tvlmayordef(i,mm(i)));
    ndef(i,mm(i))=tdef(i,mm(i))/tvlmayordef(i,mm(i));

    for k=1:l
        if SRS==0
            if laberinto(i)==0
                Bscam(i,k,mm(i))= 10^(tdef(i,mm(i))/TVL_sca(k,mm(i)) );
            end
        end
        BLM(i,k,mm(i))=ftransm ( tdef(i,mm(i)), TVL_L1(k,mm(i)),
TVL_L2(k,mm(i)) );
        BLtot(i,k)=1;
        Bscatot(i,k)=1;
        for m=1:nmaterial(i)
            BLtot(i,k)=BLtot(i,k)*BLM(i,k,m);
            if SRS==0
                if laberinto(i)==0
                    Bscatot(i,k)=Bscatot(i,k)*Bscam(i,k,m);
                end
            end
        end
    end
end
%teniendo entonces los factores de transmision para los materiales
%juntos
Htot(i)=0;
for k=1:l

```

```

[IDRL(i,k),HL(i,k),RWL(i,k),RHL(i,k)]=HLMV(BLtot(i,k),WL(k),T(i),dL(i),Dt0,M
,horasemanales);
    if SRS==0
        if laberinto(i)==0

[Hsca(i,k)]=Bscatot(i,k)*a_(k,i)*F*W1(k)*T(i)*U(i)/((dsca^2)*(dsec(i)^2)*400
);
            Htot(i)=HL(i,k)+Hsca(i,k)+Htot(i);
        end
    else
        Htot(i)=Htot(i)+HL(i,k);
    end
end
end

if techo(i)==1
    if find(j1(i,:)>1)
        %Si la barrera es el techo y el material es acero o plomo,
obligatoriamente se debe sumar una
        %capa minima de concreto
        if find(j1(i,:)==1)
            if lt(tdef(i,mconcreto),30.5)
                tdef(i,mconcreto)=30.5;
            end
            t1(i)=tdef(i,mconcreto);
        else
            t1(i)=30.5;
            ntecho(i)=t1(i)/tvlconcreto;
            if lt(ntecho(i),ndef(i,mx(i)))
                tdef(i,mx(i))=(ndef(i,mx(i))-
ntecho(i))/tvlmayor(i,1,mx(i));
            else
                tdef(i,mx(i))=0;
            end
        end
    end
end

ttotal2(i)=0;
tdefi(i)=0;
for m=1:nmaterial(i)
    ttotal2(i)=ttotal2(i)+tdef(i,m);
end
if gt(angulo(i),45)
    ttotal22(i)=ttotal2(i)*sin(angulo(i)*pi/180);
else
    ttotal22(i)=ttotal2(i)*cos(angulo(i)*pi/180);
end

if techo(i)==1
    if find(1<j1(i,:))
        if find(j1(i,:)==1)
            else
                ttotal22(i)=ttotal22(i)+t1(i);
            end
        end
    end
end
end
end

```

A.4 Código del programa Laberinto.m

```
%El material del laberinto es j1
if laberinto==1
    if j1==1
        TVLL = dlmread('TVL_L_concreto.dat');
        dens=2.35;
        Materialpi=char('Concreto');
    elseif j1==2
        TVLL = dlmread('TVL_L_plomo.dat');
        dens=11.35;
        Materialpi=char('Plomo');
    elseif j1==3
        TVLL = dlmread('TVL_L_acero.dat');
        dens=7.87;
        Materialpi=char('Acero');
    end

    % El material de la barrera primaria, si la geomeltria==1, de lo
    contrario,
    % es para el material de A_p
    if j2==1
        alfa_0 = dlmread('alfa_tablaB.8a_incidencia_normal.dat');
        Materialbp=char('Concreto');
    elseif j2==2
        alfa_0= dlmread('alfa_tablaB.8e_incidencia_normal.dat');
        Materialbp=char('Acero');
    elseif j2==3
        alfa_0=dlmread('alfa_tablaB.8c_incidencia_normal.dat');
        Materialbp=char('Plomo');
    end
    % El material de las barreras secundarias A1 y A2
    if j3==1
        alfa_45 = dlmread('alfa_tablaB.8b_incidencia_45.dat');
        Materialbs=char('Concreto');
    elseif j3==2
        alfa_45= dlmread('alfa_tablaB.8f_incidencia_45.dat');
        Materialbs=char('Acero');
    elseif j3==3
        alfa_45=dlmread('alfa_tablaB.8d_incidencia_45.dat');
        Materialbs=char('Plomo');
    end
end
FRAC=dlmread('FRAC.dat');
efe=dlmread('EFE.dat');
horasemanales=horas*dias;
Hs=0;
k=1;
HS=0;
HLS=0;
Wa=0;
Walpha=0;
HLT=0;
for k=1:l
    W1(k)=npacientes1(k)*dosisabpaciente*dias;
    if dsca==0.8
        W1(k)=W1(k)*(dsca^2);
    end
    if IMRT==0
        WL(k)=W1(k);
    elseif IMRT==1
```

```

        if SRS==0
            WL(k)=((1-pore(k))*W1(k))+(pore(k)*CI*W1(k));
        elseif SRS==1
            WL(k)=CI*W1(k);
        end
    end

    if laberinto==1
        [val,col]=min(abs(FRAC(1,:)-angulopaciente));
        [x1,col1]=find(FRAC(:,1)==energia(k));
        [ffila,fcol]=size(FRAC);
        [a_(k,1)]=inter(val,FRAC,col,fcol,x1,angulopaciente);
        [x9,col9]=find(TVLL(:,1)==energia(k));
        tvll1(k)=TVLL(x9,2);
        tvll2(k)=TVLL(x9,3);
        %Para conseguir los valores para 0.5
        [x2,col2]=find(alfa_0(1,:)==75);
        [x3,col3]=find(alfa_0(:,1)==0.5);
        [x4,col4]=find(alfa_0(:,1)==energia(k));
        alfa0_75(k)=0.001*alfa_0(x4,col2);
        [x6,col6]=find(alfa_45(:,1)==0.5);
        [x7,col7]=find(alfa_45(:,1)==energia(k));
        if geometria==1
            alfa0_75Z=0.001*alfa_0(x3,col2);
            [x5,col5]=find(alfa_45(1,:)==0);
            [x8,col8]=find(alfa_45(1,:)==0);
        else
            %para el material de A2
            [x10,col10]=find(alfa_0(1,:)==45);
            % para el material de A1
            [x5,col5]=find(alfa_45(1,:)==45);
            alfa45_45A2=0.001*alfa_45(x3,col10);
            alfa45_45(k)=0.001*(alfa_45(x4,col10));
        end
        alfa45_0Z=0.001*alfa_45(x6,col5);
        alfa45_0(k)=0.001*alfa_45(x7,col5);

        if k<=1
            % Para el factor f, el cual es el factor de transmision del haz
            % primario a traves del paciente, se hizo una variacion, y se
            tabularon
            % los valores de la IAEA
            [x9,col9]=find(efe(:,1)==energia(k));
            f(k)=efe(x9,2);
            Wa=(W1(k)*a_(k,1))+Wa;
            %CONTRIBUCION debido a la dispersion del paciente
            P(1)=Pp;

            if geometria==1
                Walpha=(WL(k)*alfa45_0(k))+Walpha;
                %Walpha=560*0.0022;
                %WL(1)=560;
                Hps=Wa*Ul*F*alfa45_0Z*A1/(400*((dsca*dsec*dzz)^2));
                Hs(k)=W1(k)*alfa0_75(k)*Ul*A0*alfa0_75Z*Az/((dh*dr*dz)^2);
                HLS=(10^-3)*Walpha*Ul*A1/((dLS*dzz)^2);
                HS=(f(k)*Hs(k))+HS;
                dL(1)=dhd;
            else
                Hps=Wa*Ul*F*alfa45_45A2*A1*A2*alfa45_45A2/(400*(dsca*d11*d22)^2);
            end
        end
    end

```

```

        Bpr=Pp*((dip+dsca)^2)/(W1(k)*U1);
        Hs(k)=Bpr*W1(k)*alfa0_75(k)*U1*Ap/((dp*dc)^2);
        HS=(f(k)*Hs(k))+HS;
        Walpha=(WL(k)*alfa45_45(k))+Walpha;
        HLS=0.001*Walpha*U1*A2/((di*dzz)^2);
        dhd=dt;
        dL(1)=dt;
    end
end

end
k=1;
HLll=0;
HLT=0;
if laberinto==1
    for k=1:l
        BLl(k)=ftransm(tdefinitivol,tvll1(k),tvll2(k));
        HLT=HLT+((((1E-3)*BLl(k)*WL(k)*U1))/(dhd^2));
    end
end
Htot=(2.64*(HS+HLS+Hps+HLT));
if gt(energia(1),10)
    if eq(laberinto,1)
        %para determinar los neutrones rapidos en ausencia de laberinto, se
calcula
        phin=Qn*beta/(4*pi*(dhd*100)^2);
        %debemos calcula la dosis equivalente en la puerta Hn, primero hay
que
        %encontrar el valor mas adecuado para Hns
        [valor, lugar]=min(abs(deqneutron-(tdefinitivol*2.3)));
        Hns=deqneutron(lugar(2),1);
        Hn_d=0;
        for k=1:l
            if gt(energia(k),10)
                Hn_d=Hn_d+(Hns*phin*WL(k));
            end
        end
        Hdoor=Hn_d;

phia=(beta*Qn/(4*pi*(d_1^2)))+(5.4*beta*Qn/(2*pi*Sr))+(1.26*Qn/(2*pi*Sr));
    if eq(energia(1),15)
        TVD2=3.9;
    elseif ge(energia(1),18)
        TVD2=5.4;
    end
    hphi=(6.9e-16)*phia*(10^(-d2/TVD2));
    %Existen dos metodos para calcular la dosis equivalente neutronica
en la
    %entrada del laberinto, se tomara la del mayor valor
    %Metodo de Kersey (donde TVD=5)
    HnDK=H0*(S0/S1)*((1.41/d_1)^2)*(10^(-d2/5));
    TVD=2.06*sqrt(S1);
    HnDW=(2.4e-15)*phia*sqrt(S0/S1)*((1.64*(10^(-d2/1.9)))+(10^(-
(d2/TVD)))));
    if ge(HnDK,HnDW)
        HnD=HnDK;
    else
        HnD=HnDW;
    end
end

```

```

        k=1;
        Hcg=0;
        Hn=0;
        for k=1:l
            if gt(energia(k),10)
                Hcg=Hcg+(hphi*WL(k));
                Hn=Hn+(WL(k)*HnD);
            end
        end
        Hw=Htot+Hcg+Hn;
    else
        phia=(beta*Qn/(4*pi*(d_1^2)))+(5.4*beta*Qn/(2*pi*Sr))+(1.3*Qn/(2*pi*Sr));
        hphi=(6.9e-16)*phia;
        HnDK=H0*((1.41/d_1)^2);
        HnDW=(2.4e-15)*phia*((2.64));
        if ge(HnDK,HnDW)
            HnD=HnDK;
        else
            HnD=HnDW;
        end
        Hcg=0;
        Hn=0;
        for k=1:l
            if gt(energia(k),10)
                Hcg=Hcg+(hphi*WL(k));
                Hn=Hn+(WL(k)*HnD);
            end
        end
        %Debido a que los TVL de plomo por fuga son similares a los valores
de los %TVL por produccion gamma, se suman estos dos valores para calcular
el %espesor adecuado para la puerta sin laberinto
        Hcg=HLT+Hcg;
    end
    np=log10(Hn*2/Pp);
    %cuando existe neutrones, lo mas recomendable es construir una puerta
con %BPE
    tpuertaBPE=np*TVLBPE0_1;
    npg=log10(Hcg*2/Pp);
    tpuertag=npg*TVLplomo3_6;
    if gt(tpuertag,TVLplomo0_2)
        tpuerta=tpuertag;
    else
        ntot=log(Htot*2/Pp);
        tpuertat=ntot*TVLplomo0_2;
        tpuerta=tpuertat+tpuertag;
    end
else
    if laberinto==1
        np=log10(Htot/Pp);
        tpuerta=np*TVLpuerta;
    else
        %Cuando la energia maxima es menor o igual a 10, el espesor de la
        %puerta se calcula tal cual una barrera secundaria
        nbarre2=1;
        nmaterial(1)=1;
    end
end

```

```
        j1(1,1)=3;  
        por(1,1)=100;  
        espacio(1)=1;  
        calculo_secundaria  
        tpuerta=tttotal(1);  
    end  
end
```

Apéndice B

A continuación, se muestran todas las tablas utilizadas en el programa para poder realizar los cálculos, junto con el nombre de cada una de ellas.

B.1 TVL de barreras primarias

Los TVL [cm] de las barreras primarias, se muestran a continuación, donde la primera columna representan las energías de los equipos, y la segunda y cuarta columna representan los valores de los TVL1 y equilibrio respectivamente

Para el concreto

TVLconcreto.dat

1.25	21	21
4	35	30
6	37	33
10	41	37
15	44	41
18	45	43
20	46	44
25	49	46

Para el plomo

TVLplomo.dat

1.25	4	4
4	5.7	5.7
6	5.7	5.7
10	5.7	5.7
15	5.7	5.7
18	5.7	5.7
20	5.7	5.7
25	5.7	5.7

Para el acero

TVLacero.dat

1.25	7.1	7.1
4	9.9	9.9
6	10	10
10	11	11
15	11	11
18	11	11
20	11	11

25 11 11

Para el BPE

BPE_TVL.dat

4	86.6	74.3
6	91.6	81.7
10	101.5	91.6
15	108.9	101.5
18	111.4	106.4
20	113.8	108.9
25	21.3	113.8

B.2 TVL para la radiación de fuga del cabezal

La primera columna representa la energía del equipo [MV] y la segunda y tercera, los TVL1 y TVL2 [cm] debido a la radiación de fuga del cabezal

Para el concreto

TVL_L_concreto.dat

1.25	21	21
4	33	28
6	34	29
10	35	31
15	36	33
18	36	34
20	36	34
25	37	35

Para el plomo

TVL_L_plomo.dat

4	5.3	5.3
6	5.6	5.6
10	5.6	5.6
15	5.6	5.6
18	5.6	5.6
20	5.6	5.6
25	5.6	5.6

Para el acero

TVL_L_acero.dat

4	9.1	9.1
---	-----	-----

6	9.6	9.6
10	9.6	9.6
15	9.6	9.6
18	9.6	9.6
20	9.6	9.6
25	9.6	9.6

Para el BPE

TVL_L_BPE.dat

4	81.7	69.3
6	84.2	71.8
10	86.6	76.7
15	89.1	81.7
18	89.1	84.2
20	89.1	84.2
25	1.6	86.6

B.3 TVL para la dispersión debido al paciente

Para los TVL debido a la dispersión del paciente, se tiene que la primera fila representan los ángulos [°] y la primera columna, las energías de los equipos [MV], el numero 555 es el centinela, los TVL vienen en [cm].

Para el concreto,

TVL_sca_concreto.dat

555	15	30	45	60	90	135
1.25	22	21	20	19	15	13
4	30	25	22	21	17	14
6	34	26	23	21	17	15
10	39	28	25	22	18	15
15	42	31	26	23	18	15
18	44	32	27	23	19	15
20	46	33	27	24	19	15
24	49	36	29	24	19	16

Para el plomo

TVL_sca_plomo.dat

555	20	30	45	60	90	135
4	4.6	3.5	2.75	2.15	1.1	0.45
6	5	4.1	3.1	2.25	1.25	0.45
10	5.1	4.4	3.35	2.4	1.7	1.1
15	5.4	5	4.1	3.1	2.1	1.3
18	5.5	5.1	4.3	3.2	2.2	1.6
20	5.6	5.2	4.5	3.4	2.2	1.6
25	5.7	5.4	4.8	3.9	2.2	1.6

Para el acero

TVL_sca_acero.dat

555	20	30	45	60	90	135
1.25	0	0	0	0	9	0
4	7.8	7.2	6.8	6.3	5	2.9
6	8.3	7.8	7	6.4	5.3	3.7
10	8.4	7.8	7.1	6.5	5.4	3.9
15	8.9	8.2	7.4	6.7	5.9	4.8
18	9.2	8.4	7.6	6.8	6.1	5.3
20	9.3	8.6	7.8	7	6.1	5.3
25	9.5	8.8	8.1	7.3	6.1	5.3

B.4 Para **los coeficientes de reflexión de la pared**, según el material del mismo, la primera fila representan los ángulos de reflexión y la primera columna representan las energías del equipo [MV], el numero 555 es el centinela²²

Para el concreto, para la incidencia del haz a 0°

alfa_tablaB.8a_incidencia_normal.dat

555	0	30	45	60	75
25	3.2	3.2	2.8	2.3	1.5
20	3.28	3.28	2.88	2.38	1.54
18	3.4	3.4	3	2.5	1.6
15	3.73	3.66	3.3	2.13	1.29
10	4.3	4.1	3.8	3.1	2.1
6	5.3	5.2	4.7	4	2.7
4	6.7	6.4	5.8	4.9	3.1
1.25	7	6.5	6	5.5	3.8
0.5	19	17	15	13	8
0.25	32	28	25	22	13

Para el concreto, con incidencia del haz a 45°

alfa_tablaB.8b_incidencia_45.dat

555	0	30	45	60	75
25	3.7	3.9	3.9	3.7	3.4
20	4	4.16	4.16	3.93	3.63
18	4.5	4.6	4.6	4.3	4
15	4.7	5.01	5.05	4.94	4.75

²² Valores obtenidos a partir del NCRP 151.

10	5.1	5.7	5.8	6	6
6	6.4	7.1	7.3	7.7	8
4	7.6	8.5	9	9.2	9.5
1.25	9	10.2	11	11.5	12
0.5	22	22.5	22	20	18
0.25	36	34.5	31	25	18

Para el plomo, con incidencia 0°

alfa_tablaB.8c_incidencia_normal.dat

555	0	30	45	60	75
25	5.4	4.7	4.4	3.8	2.3
20	5.29	4.63	4.36	3.8	2.34
18	5.1	4.5	4.3	3.8	2.4
15	5	4.5	4.3	3.8	2.4
10	5	4.5	4.3	3.9	2.5
6	5.5	4.9	4.7	4.2	2.8
4	6	5.4	5.1	4.8	3.1
0.5	16.9	16.4	15.8	14.8	13

Para el plomo, con incidencia de 45°

alfa_tablaB.8d_incidencia_45.dat

555	0	30	45	60	75
25	6.6	6.3	6.3	5.69	4.97
20	6.56	6.34	6.26	5.81	5.21
18	6.5	6.4	6.2	6	5.6
15	6.35	6.55	6.54	6.45	6.2
10	6.1	6.8	7.1	7.2	7.2
6	6	7	8.5	9	9.5
4	7.1	8.1	10	10.6	11.5
0.5	25	23.4	22.6	20	19

Para el acero, con incidencia de 0°

alfa_tablaB.8e_incidencia_normal.dat

555	0	30	45	60	75
25	3.65	3.15	2.89	2.55	1.61
20	3.74	3.24	3.01	2.64	1.68
18	3.9	3.4	3.2	2.8	1.8
15	4.13	3.59	3.35	2.95	1.95
10	4.5	3.9	3.6	3.2	2.2
6	5	4.5	4.2	3.8	2.6
4	5.9	5.2	4.7	4.2	3
0.5	17.4	16.4	15.6	14.9	13.7

Para el acero con incidencia de 45°

alfa_tablaB.8f_incidencia_45.dat

555	0	30	45	60	75
25	4.4	4.5	4.44	4.11	3.69
20	4.59	4.69	4.65	4.37	3.99
18	4.9	5	5	4.8	4.5
15	4.59	4.8	4.81	4.53	4.18
10	5.4	5.8	6	5.9	5.8
6	6.5	6.8	7	7.3	7.8
4	6.5	7.6	8.3	8.6	9
0.5	21.1	20.8	20.6	19	18

B.5 Fracciones de dispersión (a) causada por el paciente, en este caso, los valores de la primera fila, representan los ángulos [°], y la primera columna, las energías de los equipos [MV], el numero 555 es el centinela

FRAC.dat

555	10	20	30	45	60	90	135	150
1.25	1.1E-2	8E-2	6E-3	3.7E-3	2.2E-3	9.1E-4	5.4E-4	1.5E-4
4	1.04E-2	6.73E-3	2.77E-3	2.09E-3	1.24E-3	6.39E-4	4.05E-4	4.31E-4
6	1.04E-02	6.73E-03	2.77E-03	1.39E-03	8.24E-04	4.26E-4	3E-4	2.87E-4
10	1.66E-02	5.79E-03	3.18E-03	1.35E-03	7.46E-04	3.81E-4	3.02E-4	2.74E-4
15	1.51E-02	5.54E-03	2.77E-03	1.05E-03	5.45E-04	2.61E-4	1.91E-4	1.78E-4
18	1.42E-02	5.39E-03	2.53E-03	8.64E-04	4.24E-04	1.89E-4	1.24E-4	1.2E-4
20	1.52E-02	5.66E-03	2.59E-03	8.54E-04	4.13E-04	1.85E-4	1.23E-4	1.18E-4
25	1.73E-02	6.19E-03	2.71E-03	8.35E-04	3.91E-04	1.76E-4	1.21E-4	1.14E-4

B.6 El factor de transmisión f

EFE.dat

1.25	0.15
4	0.205
6	0.23
10	0.28
15	0.33
18	0.34
20	0.351
25	0.38

B.7 Dosis equivalente neutrónica. La primera columna representa la dosis equivalente por unidad de fluencia [$\text{Sv}\cdot\text{cm}^2/\text{n}$] en concreto y la segunda columna representa el espesor del hormigón [g/cm^2]

deqneutron.dat

3e-10	0
5e-11	50
5e-12	100
1e-13	200
4e-15	300
2e-16	400
1e-17	500
3e-18	550
7e-19	600
2e-19	650

Apéndice C

En este apéndice se muestran los resultados de los cálculos del blindaje utilizando el código Programa_Raiz.m, con cada acción.

Acción 1

Resultados_Barrera_Prim.dat

Características del equipo

```
.....
Marca: Varian
Modelo: Clinac iX
La energía más alta la cual trabaja el equipo: 18 [MV]
  Pacientes tratados diariamente con esta energía: 50 [paciente/día]
  Carga de trabajo (W) para la energía 18 [MV]: 500 [Gy/semana]
La energía más baja la cual trabaja el equipo: 6 [MV]
  Pacientes tratados diariamente con esta energía: 50 [paciente/día]
  Carga de trabajo (W) para la energía 6[MV]: 500 [Gy/semana]
Días de trabajo semanal: 5 [días]
Horas de trabajo por jornada diaria: 8 [h]
Características del IMRT:
Porcentaje promedio de pacientes tratados con IMRT con:
  E1=18 [MV]: 0 [%]
  E2=6 [MV] 15 [%]
Factor CI: 3
Intensidad neutrónica Q_n: 1.22e+12 [n/Gy]
Dosis equivalente neutrónica H_0: 1.60e-03 [Sv/Gy]
Material del cabezal: Plomo (beta=1.00)
Distancia fuente-isocentro (d_sca): 1.00 [m]
```

Características técnicas de la Barrera Primaria # 1

```
.....
Factor de uso U: 0.25
Factor de Ocupación T: 1.000
  Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
Distancia fuente-punto de medición: 7.01 [m]
Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1
.....
Material(es) y espesor(es) del blindaje
```

```
Material # 1: Concreto
Densidad: 2.35 [g/cm^3]
Valor de los TVL
Para energía 18 [MV]
  TVL1: 45.00 [cm]
  TVLE: 43.00 [cm]
Para energía 6 [MV]
  TVL1: 37.00 [cm]
  TVLE: 33.00 [cm]
Espesor t de la barrera con este material: 229.45[cm]
```

Número de TVL utilizados: 5.34
.....
Espesor TOTAL de la barrera: 229.45 [cm]
.....
Ancho de la barrera primaria: 330.05 [cm]
.....
Características técnicas de la Barrera Primaria # 2
.....
Factor de uso U: 0.25
Factor de Ocupación T: 1.000
Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
Distancia fuente-punto de medición: 7.01 [m]
Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1
.....
Material(es) y espesor(es) del blindaje
.....
Material # 1: Concreto
Densidad: 2.35 [g/cm³]
Valor de los TVL
Para energía 18 [MV]
TVL1: 45.00 [cm]
TVLE: 43.00 [cm]
Para energía 6 [MV]
TVL1: 37.00 [cm]
TVLE: 33.00 [cm]
Espesor t de la barrera con este material: 229.45[cm]
Número de TVL utilizados: 5.34
.....
Espesor TOTAL de la barrera: 229.45 [cm]
.....
Ancho de la barrera primaria: 330.05 [cm]
.....
Características técnicas de la Barrera Primaria # 3
.....
Factor de uso U: 0.25
Factor de Ocupación T: 0.025
Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
Distancia fuente-punto de medición: 5.99 [m]
Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1
.....
Material(es) y espesor(es) del blindaje
.....
Material # 1: Concreto
Densidad: 2.35 [g/cm³]
Valor de los TVL
Para energía 18 [MV]
TVL1: 45.00 [cm]
TVLE: 43.00 [cm]
Para energía 6 [MV]
TVL1: 37.00 [cm]
TVLE: 33.00 [cm]
Espesor t de la barrera con este material: 165.65[cm]
Número de TVL utilizados: 3.85
.....

Este cálculo pertenece al espesor del techo
 Espesor TOTAL de la barrera: 165.65 [cm]

 Ancho de la barrera primaria: 311.0 [cm]

Acción 2

Resultados_Barrera_secun.dat

Características del equipo

.....
 Marca: Varian
 Modelo: Clinac iX
 La energía más alta la cual trabaja el equipo: 18 [MV]
 El número de pacientes tratados diariamente con esta energía 50
 Carga de trabajo (W) para E1: 500 [Gy/semana]
 Carga de trabajo para fugas para E1: 500.00 [Gy/semana]
 La energía más baja la cual trabaja el equipo: 6 [MV]
 El número de pacientes tratados diariamente con esta energía 50
 Carga de trabajo (W) para E2: 500 [Gy/semana]
 Carga de trabajo para fugas para E2: 650.00 [Gy/semana]
 Días de trabajo semanal: 5 [días]
 Horas de trabajo por jornada diaria: 8 [h]
 Características del IMRT:
 Porcentaje promedio de pacientes tratados con IMRT con:
 La energía 1: 0 [%]
 La energía 2: 15 [%]
 Factor CI: 3
 Intensidad neutrónica Q_n: 1.22e+12 [n/Gy]
 Dosis equivalente neutrónica H_0: 1.60e-03 [Sv/Gy]
 Material del cabezal: Plomo (beta=1.00)
 Distancia fuente-isocentro (d_sca): 1.00 [m]

Características técnicas de la Barrera Secundaria # 1

.....
 Factor de uso U: 1.00
 Factor de Ocupación T: 1.000
 Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
 Distancia d_L: 5.14 [m]
 Distancia d_sec: 5.14 [m]
 Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1

 Material(es) y espesor(es) del blindaje

 Material # 1: Concreto
 Densidad: 2.35 [g/cm^3]
 Valor de los TVL
 Para energía 18 [MV]
 TVL1: 36.00 [cm]

TVLE: 34.00 [cm]
 Para un ángulo 90 [°],
 TVLsca: 19.00 [cm]
 alpha: 1.89e-04
 Para energía 6 [MV]
 TVL1: 34.00 [cm]
 TVLE: 29.00 [cm]
 Para un ángulo 90 [°],
 TVLsca: 17.00 [cm]
 alpha: 4.26e-04
 El recorrido la barrera con este material: 114.02 [cm]
 Número de TVL utilizados: 3.17

 Recorrido TOTAL de la barrera: 114.02 [cm]
 El espesor TOTAL de la barrera, con 90.00 [°] de oblicuidad: 114.02 [cm]

 Características técnicas de la Barrera Secundaria # 2

 Factor de uso U: 1.00
 Factor de Ocupación T: 1.000
 Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
 Distancia d_L: 9.38 [m]
 Distancia d_sec: 9.38 [m]
 Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1

 Material(es) y espesor(es) del blindaje

 Material # 1: Concreto
 Densidad: 2.35 [g/cm^3]
 Valor de los TVL
 Para energía 18 [MV]
 TVL1: 36.00 [cm]
 TVLE: 34.00 [cm]
 Para un ángulo 62 [°],
 TVLsca: 22.73 [cm]
 alpha: 4.08e-04
 Para energía 6 [MV]
 TVL1: 34.00 [cm]
 TVLE: 29.00 [cm]
 Para un ángulo 62 [°],
 TVLsca: 20.73 [cm]
 alpha: 7.97e-04
 El recorrido la barrera con este material: 107.09 [cm]
 Número de TVL utilizados: 2.97

 Recorrido TOTAL de la barrera: 107.09 [cm]
 El espesor TOTAL de la barrera, con 62.00 [°] de oblicuidad: 94.56 [cm]

 Características técnicas de la Barrera Secundaria # 3

 Factor de uso U: 1.00
 Factor de Ocupación T: 1.000

Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
 Distancia d_L: 9.38 [m]
 Distancia d_sec: 9.38 [m]
 Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1

 Material(es) y espesor(es) del blindaje

 Material # 1: Concreto
 Densidad: 2.35 [g/cm^3]
 Valor de los TVL
 Para energía 18 [MV]
 TVL1: 36.00 [cm]
 TVLE: 34.00 [cm]
 Para un ángulo 62 [°],
 TVLsca: 22.73 [cm]
 alpha: 4.08e-04
 Para energía 6 [MV]
 TVL1: 34.00 [cm]
 TVLE: 29.00 [cm]
 Para un ángulo 62 [°],
 TVLsca: 20.73 [cm]
 alpha: 7.97e-04
 El recorrido la barrera con este material: 107.09 [cm]
 Número de TVL utilizados: 2.97

 Recorrido TOTAL de la barrera: 107.09 [cm]
 El espesor TOTAL de la barrera, con 62.00 [°] de oblicuidad: 94.56 [cm]

 Características técnicas de la Barrera Secundaria # 4

 Factor de uso U: 1.00
 Factor de Ocupación T: 1.000
 Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
 Distancia d_L: 9.38 [m]
 Distancia d_sec: 9.38 [m]
 Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1

 Material(es) y espesor(es) del blindaje

 Material # 1: Concreto
 Densidad: 2.35 [g/cm^3]
 Valor de los TVL
 Para energía 18 [MV]
 TVL1: 36.00 [cm]
 TVLE: 34.00 [cm]
 Para un ángulo 62 [°],
 TVLsca: 22.73 [cm]
 alpha: 4.08e-04
 Para energía 6 [MV]
 TVL1: 34.00 [cm]
 TVLE: 29.00 [cm]
 Para un ángulo 62 [°],
 TVLsca: 20.73 [cm]

alpha: 7.97e-04
 El recorrido la barrera con este material: 107.09 [cm]
 Número de TVL utilizados: 2.97

 Recorrido TOTAL de la barrera: 107.09 [cm]
 El espesor TOTAL de la barrera, con 62.00 [°] de oblicuidad: 94.56 [cm]

 Características técnicas de la Barrera Secundaria # 5

 Factor de uso U: 1.00
 Factor de Ocupación T: 1.000
 Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
 Distancia d_L: 6.59 [m]
 Distancia d_sec: 6.59 [m]
 Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1

 Material(es) y espesor(es) del blindaje

 Material # 1: Concreto
 Densidad: 2.35 [g/cm^3]
 Valor de los TVL
 Para energía 18 [MV]
 TVL1: 36.00 [cm]
 TVLE: 34.00 [cm]
 Para un ángulo 24 [°],
 TVLsca: 36.80 [cm]
 alpha: 4.25e-03
 Para energía 6 [MV]
 TVL1: 34.00 [cm]
 TVLE: 29.00 [cm]
 Para un ángulo 24 [°],
 TVLsca: 29.20 [cm]
 alpha: 5.15e-03
 El recorrido la barrera con este material: 157.92 [cm]
 Número de TVL utilizados: 4.29

 Recorrido TOTAL de la barrera: 157.92 [cm]
 El espesor TOTAL de la barrera, con 24.00 [°] de oblicuidad: 144.26 [cm]

 Características técnicas de la Barrera Secundaria # 6

 Factor de uso U: 1.00
 Factor de Ocupación T: 0.025
 Límite de dosis P: 2.00e-05 [Sv/semana]
 Distancia d_L: 4.72 [m]
 Distancia d_sec: 4.72 [m]
 Número de materiales diferentes utilizados en esta barrera: 1

 Material(es) y espesor(es) del blindaje

 Material # 1: Concreto
 Densidad: 2.35 [g/cm^3]

Valor de los TVL
 Para energía 18 [MV]
 TVL1: 36.00 [cm]
 TVLE: 34.00 [cm]
 Para un ángulo 30 [°],
 TVLsca: 32.00 [cm]
 alpha: 2.53e-03
 Para energía 6 [MV]
 TVL1: 34.00 [cm]
 TVLE: 29.00 [cm]
 Para un ángulo 30 [°],
 TVLsca: 26.00 [cm]
 alpha: 2.77e-03
 El recorrido la barrera con este material: 98.97 [cm]
 Número de TVL utilizados: 2.75

 Recorrido TOTAL de la barrera: 98.97 [cm]
 El espesor TOTAL de la barrera, con 30.00 [°] de oblicuidad: 85.71 [cm]
 :.....

Accion 3

Resultados_Laberinto.dat

Características del equipo

 Marca: Varian
 Modelo: Clinac iX
 La energía más alta la cual trabaja el equipo: 18 [MV]
 El número de pacientes tratados diariamente con esta energía 50
 La carga de trabajo W(1): 500.00 [Gy/semana]
 La carga de trabajo para fugas W_L(1): 500.00 [Gy/semana]
 La energía más baja la cual trabaja el equipo: 6 [MV]
 El número de pacientes tratados diariamente con esta energía 50
 La carga de trabajo W(2): 500.00 [Gy/semana]
 La carga de trabajo para fugas W_L(2): 650.00 [Gy/semana]
 Días de trabajo semanal: 5 [días]
 Horas de trabajo por jornada diaria: 8 [h]
 Características del IMRT:
 Porcentaje promedio de pacientes tratados con IMRT con:
 La energía 1: 0 [%]
 La energía 2: 15 [%]
 Factor CI: 03
 Intensidad neutrónica Q_n: 1.22e+12 [n/Gy]
 Dosis equivalente neutrónica H_0: 1.60e-03 [Sv/Gy]
 Material del cabezal: Plomo (beta=1.00)

 Parámetros necesarios para el cálculo del blindaje
 de Puerta con Laberinto o Acceso Directo

 Puerta con Laberinto
 Límite de dosis P: 1.00e-04 [Sv/semana]
 El laberinto se encuentra perpendicular al eje del gantry

El material de la barrera primaria A: Concreto
 Área A_0 proyectada de la fuente a la pared A: 3.10 [m²]
 Coeficiente de reflexión en A_0 para una energía de 18 [MV]: 1.60e-03
 Para una energía de 6 [MV]: 2.70e-03
 El material de la barrera secundaria proyectada en A1: Concreto
 Área A_1: 12.92 [m²]
 Coeficiente de reflexión en A_1 para una energía de 0.5 [MeV]: 2.20e-02
 Para una energía de 18 [MV]: 4.50e-03
 Para una energía de 6 [MV]: 6.40e-03
 Superficie A_z: 12.31 [m²]
 Coeficiente de reflexión en A_z para 0.5 [MeV]: 8.00e-03
 Distancia dr del punto central de A_0 al punto central del pasillo del laberinto: 6.19 [m]
 Distancia dz del punto central del laberinto a la puerta: 7.47 [m]
 Distancia dpp isocentro-superficie A_0: 3.50 [m]
 Distancia dsec del isocentro al punto central de A_1: 7.49 [m]
 Fracción de radiación dispersada por el paciente en el ángulo 54 [°],
 Con energía 18 [MV]: 6.00e-04
 Con energía 6 [MV]: 1.05e-03
 Material de la pared interna del laberinto: Concreto
 TVL debido a la fuga del cabezal para un equipo de Energía 18 [MV]: 36.00 [m]
 Energía 6 [MV]: 34.00 [m]
 Distancia dzz del A_1 a la puerta: 9.83 [m]
 Distancia d1 desde el isocentro al punto central del laberinto: 6.85 [m]
 Distancia d2 desde el punto central del laberinto a la puerta: 8.79 [m]
 Área Sr total de la sala: 255.60 [m²]
 Área S0 transversal de la entrada del laberinto: 9.12 [m²]
 Área S1 transversal del pasillo del laberinto: 10.23 [m²]
 Materiales utilizados en la puerta: Plomo y BPE
 TVL del plomo utilizado 6.10 [cm]
 TVL del BPE utilizado 4.50 [cm]
 Distancia dL más cercana del cabezal al punto medio de la puerta: 7.92 [m]
 Ángulo de oblicuidad entre la dirección de dL y la puerta: 52 [°]
 Distancia dsca de la fuente al paciente: 1.00 [m]

 Resultados obtenidos una vez calculado en el programa:

 Camino recorrido en la pared interna del laberinto 146.18 [cm]
 Espesor de la pared interna del laberinto: 90.00 [cm]
 Espesor de la primera lámina de plomo de la puerta: 0.43 [cm]
 Espesor de la lámina de BPE del medio: 4.60 [cm]
 Espesor de la segunda lámina de plomo de la puerta: 0.43 [cm]