



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MÉXICO**

**CENTRO MÉDICO NACIONAL
SIGLO XXI**



FACULTAD DE MEDICINA

**Cálculo de blindaje mediante Simulación Monte Carlo
para limitar la exposición a la radiación en áreas controladas
y no controladas con el funcionamiento simultáneo de tres
búncers lindantes con Aceleradores Lineales de 6MV**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN FÍSICA MÉDICA**

P R E S E N T A

Ing. Anna Karen Vargas Ramírez

**Comité de Tutores: Dr. en C. Eugenio Torres García
Dr. en C. S. Jorge Ramírez Franco
M. en I. N. Jorge Omar Hernández Oviedo**



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO 2025

Contenido

Carta de aprobación de la tesis	2
Créditos a la institución sede	3
Agradecimientos.....	4
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Abreviaturas	11
Índice de figuras.....	12
Índice de tablas.....	14
1. Introducción	16
2. Estado del arte	17
2.1. Evolución y Aplicaciones de la Simulación Monte Carlo en el Diseño de Blindajes.....	17
2.2. Pregunta de investigación.....	18
2.3. Hipótesis.....	18
2.4. Objetivo General.....	18
2.5. Objetivos Específicos	18
3. Marco Teórico	19
3.1. Interacción de la radiación con la materia	19
3.2. Interacción de los fotones con la materia.....	19
3.3. Radiación de frenado (Bremsstrahlung)	22
3.4. Capa deirreductora	23
3.5. Teleterapia	24
3.6. Acelerador lineal.....	24

3.7. Organizaciones que Establecen las Normas de Protección Radiológica	25
3.8. ALARA.....	26
3.9. Blindaje.....	27
3.10. Materiales de blindaje	28
3.11. Parámetros de cálculo de blindajes	29
3.12. Memoria analítica (cálculo manual de blindajes)	33
3.13. Levantamiento de niveles de radiación.....	40
3.14. Simulaciones de Monte Carlo.....	41
3.15. TOol for PArticle Simulation TOPAS: Software de simulaciones MC	
41	
4. Metodología.....	47
4.1. Infraestructura y apoyo técnico disponible.....	47
4.2. Procedimientos	48
4.2.1. Consideraciones para el cálculo de blindaje	48
4.2.2. Ubicación y colindancias de los búnkers	50
4.2.3. Método de cálculo de blindaje	52
4.2.4. Verificación y optimización del blindaje con simulación	
Monte Carlo.....	68
5. Resultados y discusión.....	76
6. Conclusiones	89
7. Trabajo futuro	89
8. Referencias bibliográficas.....	91
Anexos:	95

Anexo 1. Comprobante de recepción de manuscrito enviado a la Revista Mexicana de Física	95
Anexo 2. Copia del comprobante de participación a congreso.	96
Anexo 3. Fragmentos de código e inputs utilizados en la simulación Monte Carlo del búnker 1.	97
Anexo 4. Geometría generada del búnker 1 creado por el input del Anexo 3.	106

Resumen

El aumento en la incidencia de cáncer y el avance tecnológico en los equipos de teleterapia, han hecho necesaria la verificación del blindaje estructural en salas de radioterapia. Este trabajo detalla una metodología híbrida que integra cálculos analíticos, basados en las recomendaciones del Informe N.º 151 del Consejo Nacional de Protección Radiológica y Medidas de Estados Unidos (NCRP por sus siglas en inglés), con simulaciones Monte Carlo (SMC) utilizando el software Open TOPAS (TOOl for PArticle Simulation) versión 4, basado en el conjunto de herramientas de GEANT4. Este enfoque dual permite determinar, validar y optimizar los espesores del diseño de blindaje de tres búnkers adyacentes donde operarán simultáneamente aceleradores lineales (linacs) de 6 MV, asegurando el cumplimiento de los límites de tasa de dosis equivalente ambiental (TDEA) establecidos por las normas internacionales. Los resultados indican que las barreras secundarias existentes en la estructura del hospital cumplen con los límites internacionales de exposición a la radiación. Sin embargo, las barreras primarias requieren modificaciones sustanciales para garantizar la protección radiológica en áreas controladas y no controladas.

Palabras clave: Protección radiológica; Blindaje contra radiación ionizante; Simulación Monte Carlo; Teleterapia; Tasa de dosis equivalente ambiental.

Abstract

The increasing in cancer incidence and technological advancement in teletherapy technology, have necessitated structural shielding verification in linear accelerator bunkers. This work details a hybrid methodology that integrates analytical calculations, based on the recommendations of Report No. 151 from the United States National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), with Monte Carlo simulations using Open TOPAS version 4, built on the GEANT4 toolkit. This dual approach enables the determination, validation, and optimization of shielding thicknesses for the three adjacent bunkers where 6 MV linacs will operate simultaneously, ensuring compliance with the ambient dose equivalent rate limits established by international standards. The results indicate that the existing secondary barriers in the hospital structure comply with international radiation limits. However, the primary barriers require substantial modifications to ensure radiological protection in both controlled and uncontrolled areas.

Keywords: Radiation protection; Ionising radiation shielding; Monte Carlo simulation; Teletherapy; Ambient dose equivalent rate.

Abreviaturas

POE	Personal Ocupacionalmente Expuesto
NOM	Norma Oficial Mexicana
RGSR	Reglamento General de Seguridad Radiológica
CNSNS	Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias <i>National Council on Radiation Protection and</i>
NCRP	<i>Measurements.</i> Consejo Nacional de Protección y Medición de la Radiación.
ICRP	<i>International Commission of Radiological Protection.</i> Comisión Internacional de Protección Radiológica.
OIEA	Organización Internacional de Energía Atómica. <i>International Commission on Radiation Units and</i>
ICRU	<i>Measurements.</i> Comisión Internacional de Unidades Radiológicas
ALARA	<i>As Low As Reasonably Achievable,</i> Tan Bajo Como Sea Razonablemente Alcanzable
TDEA	<i>Tasa de Dosis Equivalente Ambiental</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology.</i> Instituto Nacional de Medición de Estados Unidos.
LINAC	<i>Linear Accelerator.</i> Acelerador Lineal.
SMC	Simulación Monte Carlo.
TOPAS	<i>Tool for Particle Simulation.</i> Herramienta para Simulación de Partículas.
TVL	<i>Tenth Value Layer.</i> Capa Decimorreductora
HVL	<i>Half Value Layer.</i> Capa Hemirreductora
IMRT	<i>Intensity Modulated Radiation Therapy.</i> Radioterapia de Intensidad Modulada

Índice de figuras

Figura 1: Principales interacciones de fotones con el medio absorbente (17)...	20
Figura 2: Dispersión Compton (19).....	21
Figura 3: Efecto fotoeléctrico (18).....	21
Figura 4: Producción de pares (18).....	22
Figura 5: Radiación de frenado (18).....	23
Figura 6: Esquema de los componentes de un LINAC (20).....	25
Figura 7. Esquema de barreras primarias y secundarias (18).....	27
Figuras 8 y 9: Búnker con laberinto (izquierda) y con entrada directa (derecha) (18).	28
Figura 10. Componentes y subcomponentes geométricos(8).....	43
Figura 11. Gráfico de las distribuciones de energía de rayos X que se pueden leer con TOPAS (8).	45
Figura 12. Plano original arquitectónico de búnkers lindantes de Teleterapia del Centro Médico Nacional Siglo XXI, ciudad de México, México.....	50
Figura 13. Identificación de las distintas paredes en la estructura, puntos de interés y colindancias de los 3 bunkers lindantes.....	51
Figura 14. Esquema general del programa de SMC.....	69
Figura 15. Esquema simplificado de la geometría de los componentes y subcomponentes simulando los búnkers.....	71
Figura 16. Posiciones de los gantry con el haz primario del linac en color verde. Vista en el plano Y-Z, donde X es la profundidad.....	73
Figura 17. Geometría tridimensional de los 3 búnkers lindantes simulada para barreras primarias.....	80
Figura 18. TDEA obtenida de la SMC de los espesores actuales de barreras primarias y secundarias sin remodelar. Cada zona incluye 6 barras y cada color representa la posición de los haces mostrada en la Figura 16.....	81

Figura 19. TDEA de la SMC de los espesores calculados en la memoria analítica de las barreras secundarias.....	82
Figura 20. TDEA resultante de la SMC usando los espesores calculados en la memoria analítica (manuales) en las barreras primarias.....	83
Figura 21. TDEA de la SMC de los espesores modificados de la pared II del búnker 3.....	85
Figura 22. Niveles de radiación en escala de colores de los tres búnkers lindantes en la posición c.....	86
Figura 23. Niveles de radiación de los tres búnkers lindantes simulados en la posición e.....	86

Índice de tablas

Tabla 1. Proporciona los factores de ocupación sugeridos para la planificación del blindaje cuando no se dispone de otros datos de ocupación, basados en valores de la NCRP 151 (3).....	33
Tabla 2. TVL de barrera primaria para hormigón/concreto ordinario (2.35 g cm^{-3}) (3).....	34
Tabla 3. TVLs para radiación de fugas en concreto (cm)(3).....	36
Tabla 4. Fracciones dispersas (α) a 1 m de un maniquí y tamaño de campo de 400 cm^2 tomadas del NCRP 151 (3,10).....	37
Tabla 5. TVL en concreto (cm) para radiación dispersada por el paciente en varios ángulos de dispersión, basados en NCRP 151 (3).....	38
Tabla 6. TVL´s adicionales necesarios para la contribución de fuga en las barreras secundarias donde r es el porcentaje de tratamientos clínicos que son IMRT y C es la relación promedio de MU a cGy para la técnica de IMRT empleada(23).....	39
Tabla 7. Convenciones de prefijo para algunos parámetros del software Open TOPAS (8)	42
Tabla 8. Especificaciones proporcionadas por la ficha técnica del fabricante. 48	
Tabla 9. Límites de TDEA establecidas por la IAEA para el POE y público.	49
Tabla 10. Colindancias de las Salas de Teleterapia.....	51
Tabla 11. Parámetros principales Búnker 1, Pared I, Barrera primaria	52
Tabla 12. Parámetros principales Búnker 1, Pared I, Barrera secundaria	54
Tabla 13. Parámetros principales Búnker 1, Pared II, Barrera primaria	56
Tabla 14. Parámetros principales Búnker 1, Pared II, Barrera secundaria.....	57
Tabla 15. Parámetros principales Búnker 1, Pared III, Barrera secundaria.....	59
Tabla 16. Parámetros principales Búnker 1, PARED IV, Barrera secundaria.....	61
Tabla 17. Parámetros principales Búnker 1, Techo, Barrera primaria.....	62
Tabla 18. Parámetros principales Búnker 1, Techo, Barrera secundaria.....	64

Tabla 19. Parámetros principales Búnker 1, Puerta, Barrera secundaria.....	66
Tabla 20. Espesores de blindaje calculados de la Sala de teleterapia 1.....	77
Tabla 21. Espesores de blindaje calculados de la Sala de teleterapia 2.....	78
Tabla 22. Espesores de blindaje calculados de la Sala de teleterapia 3.....	79
Tabla 23. Espesores propuestos para la optimización del blindaje de los 3 bunkers lindantes.	84
Tabla 24. Resultados del cálculo del Error Estadístico en las SMC en las posiciones de gantry a,b y c.....	87
Tabla 25. Resultados del cálculo del Error Estadístico en las SMC en las posiciones de gantry d, e y f.....	88

1. Introducción

En las últimas dos décadas, estudios epidemiológicos han evidenciado un aumento sostenido en la incidencia de cáncer (1) lo que ha generado una creciente demanda de tratamientos de radioterapia. Esta situación ha impulsado la modernización de los linacs con cambios importantes en sus espectros de emisión de rayos X, lo que a su vez plantea la necesidad de adaptar las instalaciones existentes que anteriormente albergaban equipos viejos (2). En este contexto, resulta fundamental evaluar el cumplimiento del blindaje con los niveles aceptables de exposición en áreas adyacentes, clasificadas como zonas controladas (destinadas al personal ocupacionalmente expuesto bajo control radiológico) y zonas no controladas (accesibles al público sin control radiológico)(3). Los límites de la tasa de dosis equivalente ambiental (TDEA) establecidos para estas zonas son de 20 mSv/año y 1 mSv/año, respectivamente. La conformidad con estos estándares de protección radiológica (4)(5)(6) se vuelve especialmente complejo en instalaciones con búnkers adyacentes, donde factores como el funcionamiento simultáneo de los linacs, la superposición de haces, la orientación angular de los gantry y la disposición geométrica de las barreras incrementan los desafíos técnicos para el diseño del blindaje (7).

En el Centro Médico Siglo XXI - IMSS ciudad de México, se contempla la sustitución de tres linacs por equipos de 6 MV de última generación. Esta actualización exige la revisión y optimización del blindaje estructural de tres búnkers lindantes que operarán de forma simultánea. Por ello, la presente tesis propone una metodología híbrida que combina cálculos analíticos, basados en el informe NCRP No. 151 (3), y SMC (8) utilizando el software Open TOPAS, para determinar los espesores óptimos de las barreras primarias y secundarias, de tal modo que los niveles de la TDEA en áreas controladas y no controladas cumplan con las normativas nacionales e internacionales vigentes(7).

2. Estado del arte

2.1. Evolución y Aplicaciones de la Simulación Monte Carlo en el Diseño de Blindajes

El diseño de blindaje se realiza mediante cálculos analíticos que se basan en modelos matemáticos establecidos en guías y recomendaciones internacionales, como la publicación ICRP No. 60 (9) además de los informes NCRP No. 151 y 49 (10), que proporcionan fórmulas y metodologías para estimar los espesores de blindaje requeridos en función de parámetros como la carga de trabajo, el factor de uso, el factor de ocupación y la distancia (11). Por otro lado, la SMC a través de la generación de partículas virtuales y el seguimiento estadístico de sus trayectorias, permite estimar distribuciones de dosis equivalente, considerando múltiples variables físicas y geométricas (12). Diversos estudios (13)(14) han evidenciado su eficacia en la evaluación y optimización de diseños de blindaje logrando no solo reducir costos, sino también garantizar el cumplimiento de las Normas de Seguridad Radiológica. Las primeras aplicaciones del método MC requerían simplificaciones significativas debido a limitaciones computacionales. Sin embargo, los avances en poder de cómputo y la disponibilidad de software avanzado han permitido realizar simulaciones mucho más detalladas y precisas. En este contexto, herramientas más recientes como TOPAS han ofrecido ventajas distintivas (15)(16) con configuraciones más accesibles y amigables para los usuarios, manteniendo a la vez la precisión y flexibilidad del código subyacente. Esta herramienta permite modelar cabezales de tratamiento con rayos X, geometría del paciente a partir de imágenes de TC, medir dosis equivalente ambiental, fluencia, etc., guardar y reproducir un espacio de fase, proporcionar gráficos avanzados, determinar espesor de barreras en búnkers, entre otras funcionalidades clave para el diseño (8).

2.2. Pregunta de investigación

¿Es necesario modificar el blindaje actual para cumplir con los límites de exposición establecidos por las normas en áreas controladas y no controladas, en un entorno que cuenta con tres búnkers adyacentes que albergan aceleradores lineales a 6MV operando simultáneamente?

2.3. Hipótesis

Modificar el blindaje actual para garantizar que los niveles de exposición en las áreas controladas y no controladas cumplan con los límites establecidos por las normas, dado que la operación simultánea de tres aceleradores lineales (LINAC) a 6 MV genera dosis de radiación que superan dichos límites.

2.4. Objetivo General

Evaluar y determinar los espesores actuales y propuestos en el cálculo manual mediante SMC de las barreras primarias y secundarias de tres bunkers aledaños con LINACS de 6MV funcionando simultáneamente para no exceder los niveles de radiación establecidos por norma en áreas controladas y no controladas.

2.5. Objetivos Específicos

1. Calcular manualmente el espesor de las barreras primarias y secundarias para tres búnkers aledaños basado en las recomendaciones internacionales del NCRP 151 de haces de 6MV para teleterapia.
2. Diseñar los tres búnkers aledaños mediante la herramienta de SMC Open TOPAS para evaluar los niveles de exposición establecidos por norma en áreas controladas y no controladas.

3. Analizar los cálculos obtenidos mediante los métodos manuales y los simulados, con el fin de garantizar que se cumplan los límites de exposición a radiación establecidos por las normativas nacionales e internacionales.

3. Marco Teórico

3.1. Interacción de la radiación con la materia

Para comprender la teoría detrás del blindaje, es esencial conocer primero los mecanismos físicos mediante los cuales los diferentes tipos de radiación interactúan con la materia. Esta materia está compuesta por núcleos atómicos y electrones extra nucleares con los que la radiación puede interactuar, ionizándolos y excitándolos. La probabilidad de que ocurra un tipo específico de interacción y, por lo tanto, el poder de penetración de los distintos tipos de radiación, dependen del tipo y la energía de la radiación, así como de la naturaleza del medio absorbente. Para el estudio del blindaje para aceleradores lineales de 6MV, es crucial examinar la interacción de los fotones con la materia.

3.2. Interacción de los fotones con la materia

Los tres tipos más importantes de interacción de la radiación indirectamente ionizante con la materia son: efecto Compton, efecto fotoeléctrico y producción por pares. Para estos tres tipos de interacción, es fundamental considerar la energía cuántica del fotón ($E_\gamma = h\nu$) y el número atómico (Z) del medio absorbente, ya que de esto dependerá el tipo de interacción que ocurra. Como se puede ver en la Figura 1, el efecto fotoeléctrico es el dominante a bajas energías, el efecto Compton a energías medias y la producción por pares a energías altas (17).

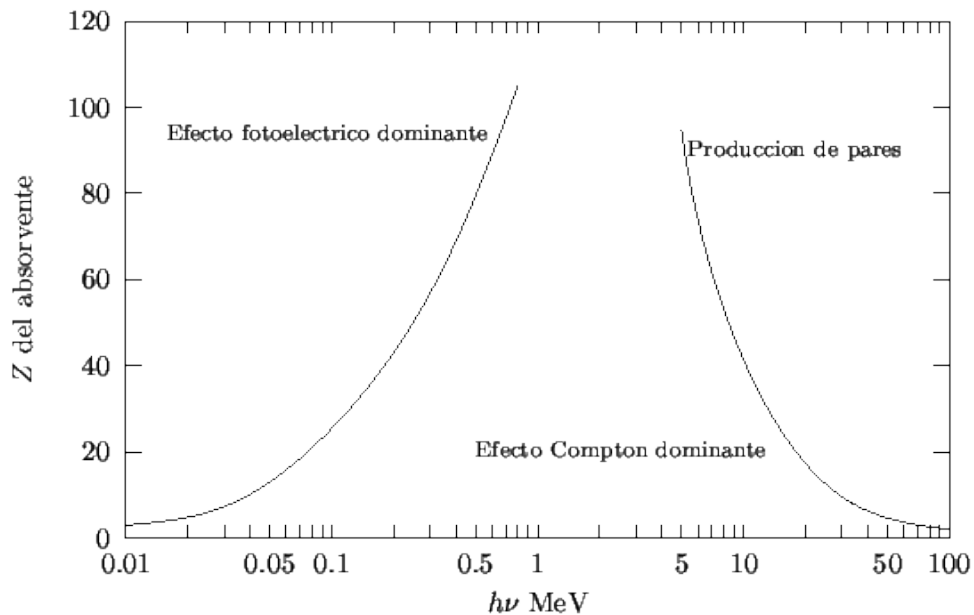


Figura 1: Principales interacciones de fotones con el medio absorbente (17).

Efecto Compton

La Figura 2 muestra una colisión elástica entre un fotón y un electrón "libre", ocurre cuando el electrón está débilmente ligado al átomo, lo que significa que su energía de enlace es mucho menor que la energía del fotón incidente ($h\nu_0$). Durante la colisión, la energía del fotón incidente no puede transferirse por completo al electrón debido a la conservación del momento ($p=mv$) y la energía ($E=mc^2$). Esto resulta en que el fotón dispersado ($h\nu'$) tenga una energía menor que el fotón incidente. La energía transferida al electrón libre será la diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía del fotón dispersado ($h\nu_0 - h\nu'$) (18).

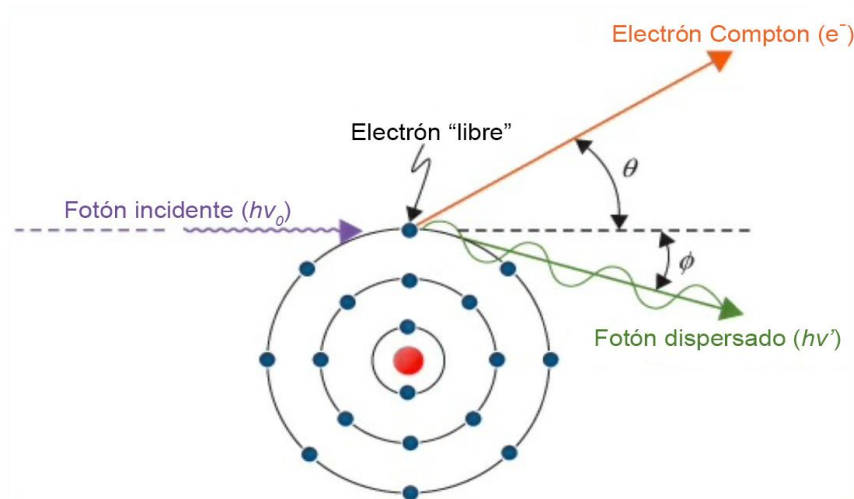


Figura 2: Dispersión Compton (19).

Efecto Fotoeléctrico

Se trata de una interacción entre un fotón ($h\nu$) y un electrón fuertemente ligado al átomo. En esta interacción, como se muestra en la Figura 3, a diferencia del efecto Compton, toda la energía del fotón se transfiere al electrón y, por lo tanto, el fotón desaparece. Como resultado el electrón, ahora llamado fotoelectrón, es expulsado del átomo ya que su energía cinética ($E_{pe} = h\nu - \Phi$) será mayor a la energía de enlace (Φ) (18).

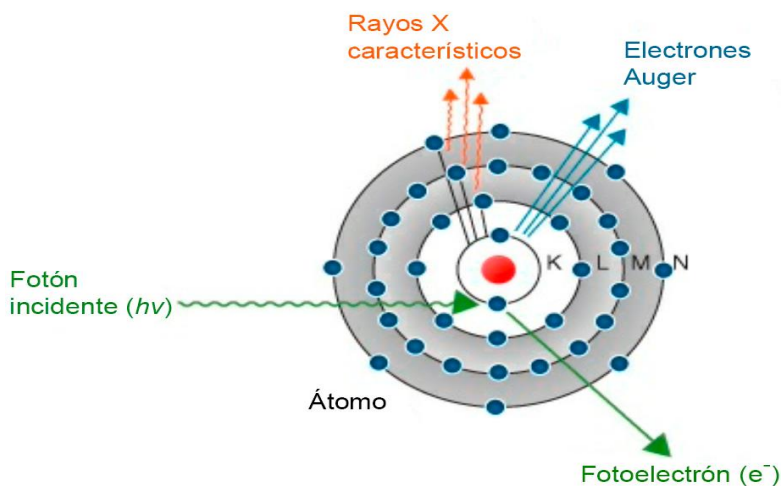


Figura 3: Efecto fotoeléctrico (18).

Producción de Pares

Si un fotón con una energía superior a 1.02 MeV interactúa con el núcleo, es probable que desaparezca debido a la interacción Coulombiana, lo que da lugar a la creación de un positrón y un electrón como se ilustra en la Figura 4. Una vez que el positrón y el electrón son emitidos, van disminuyendo su energía cinética a través de procesos de excitación, ionización o Bremsstrahlung. Cuando el electrón se recombina con el entorno, el positrón se aniquila con un electrón en el medio, liberando dos fotones, cada uno con una energía de 0.511 MeV (17).

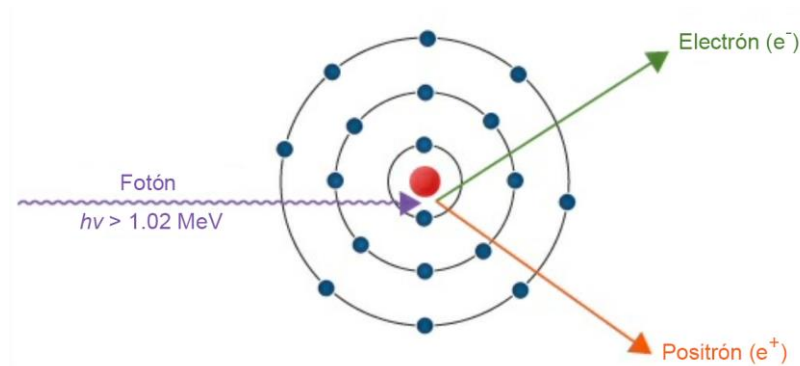


Figura 4: Producción de pares (18).

3.3. Radiación de frenado (Bremsstrahlung)

Cuando un electrón, junto con su campo electromagnético, se acerca al núcleo, sufre una desviación y desaceleración abrupta. En la Figura 5 se ilustra el resultado de este proceso, el electrón pierde parte o toda su energía. De acuerdo con los principios de conservación de energía y momento, la energía que el electrón pierde se transmite en forma de radiación electromagnética, manifestándose como un fotón cuya energía ($h\nu$) puede llegar a igualar la energía inicial del electrón (19).

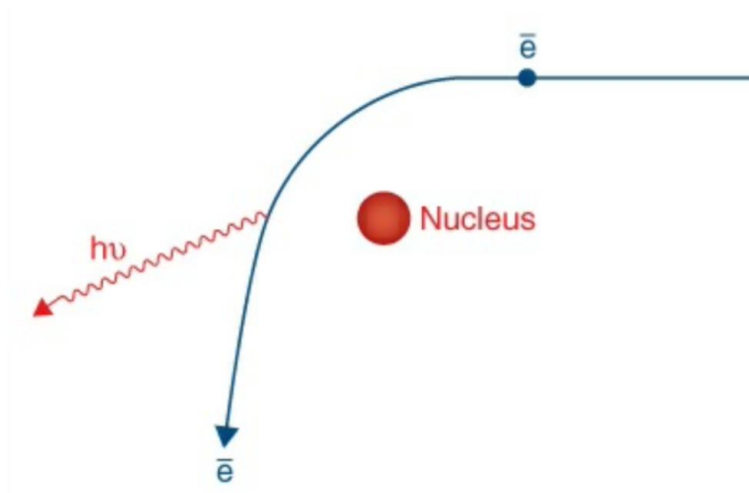


Figura 5: Radiación de frenado (18).

3.4. Capa decirreductora

La capa decirreductora se refiere al grosor de un material que, al colocarse en el camino de un haz útil de fotones, atenúa la intensidad de la radiación en un 10% de su valor inicial. Este valor de espesor es distintivo para cada material y para cada valor de tensión aplicado al tubo de rayos X (19). Para haces monoenergéticos el espesor decimorredutor (TVL) se define mediante la Ecuación 1.

$$TVL = \frac{\ln(10)}{\mu} \quad (1)$$

Donde; el coeficiente de atenuación lineal μ , es la constante de proporcionalidad que depende de la energía de los fotones y del tipo de material.

3.5. Teleterapia

Comúnmente empleada en el tratamiento del cáncer, la teleterapia es una modalidad de radioterapia que utiliza una fuente de radiación externa. Generalmente, se administra a través de un acelerador lineal que puede emitir fotones (4-25 MV) o electrones de alta energía (6, 9, 12, 16 y 22 MeV) (20).

3.6. Acelerador lineal

En teleterapia, los aceleradores lineales se emplean para generar rayos X acelerando electrones a altas velocidades utilizando energía de microondas. Como se observa en la Figura 6, los rayos X se producen calentando un filamento metálico con un número atómico alto, desprendiendo electrones a través del paso de una corriente eléctrica. Estos electrones se introducen en una guía de ondas (sistema de enfoque del haz), un tubo con varias cámaras en el que también se inyectan ondas de radiofrecuencia. En esta etapa, se utilizan campos eléctricos y magnéticos para aumentar la energía cinética de los electrones, acelerando así su movimiento, pasando a través de un sistema de deflexión que dirige y enfoca el haz de electrones hacia un objetivo metálico con un número atómico alto para producir rayos X de alta energía (blanco), principalmente a través del proceso Bremsstrahlung. Los fotones generados se filtran para obtener un espectro de energía uniforme mediante la eliminación de los fotones de baja energía no deseados. Esto se logra utilizando el colimador primario y el filtro aplanador. Finalmente, para dar forma al haz de radiación, se utilizan el colimador secundario y el colimador multihojas, definiendo el tamaño y dirección del haz para el tratamiento requerido (20).

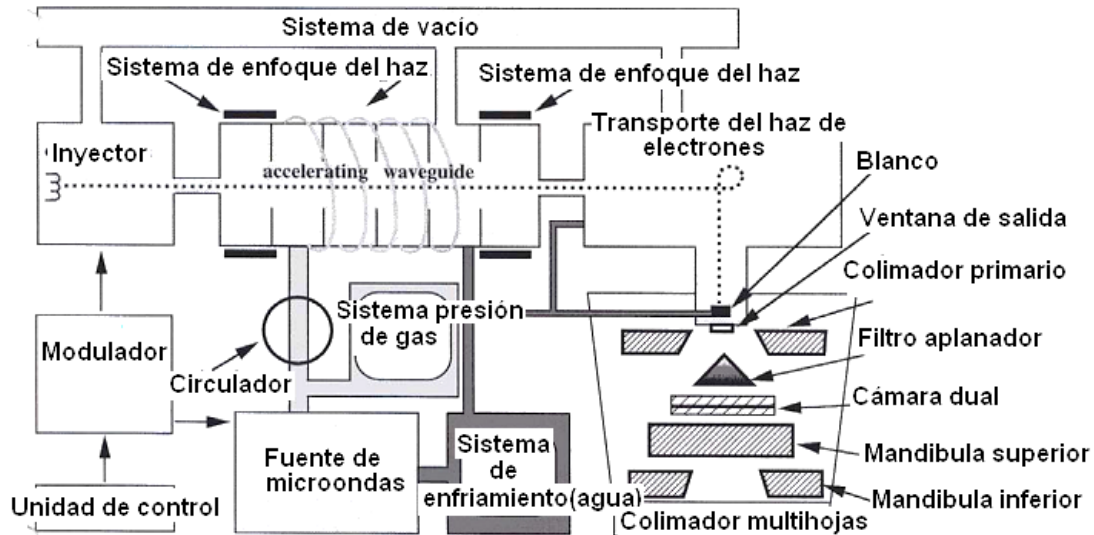


Figura 6: Esquema de los componentes de un LINAC (20).

3.7. Organizaciones que Establecen las Normas de Protección Radiológica

Desde que se empezó a emplear la radiación en el campo de la medicina, se han propuesto normativas de seguridad radiológica que son reguladas por distintas organizaciones (7). En México entre las más relevantes en la actualidad principalmente se encuentran las siguientes (4)(5)(6):

- Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (C.N.S.N.S).
- Ley General de Salud.
- Reglamento General de Seguridad Radiológica (RGSR).
- Normas Oficiales Mexicanas (NOMs).

Dichas Organizaciones determinan que la remodelación de salas de teleterapia deben basarse en una memoria analítica autorizada por la C.N.S.N.S. La memoria analítica es un documento que contiene los cálculos de blindaje necesarios para las áreas donde son utilizadas radiaciones ionizantes, de acuerdo con la normatividad vigente de protección radiológica, y que garantiza

la protección del personal ocupacionalmente expuesto y público que se encuentra dentro y fuera de dichas áreas (6).

Actualmente existen métodos de cálculo de blindajes con recomendaciones y a modo de guía, como es el NCRP en su reporte n° 151 "*Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities*" publicado en diciembre de 2005, que tiene como finalidad el cálculo de blindajes para limitar la exposición a la radiación de trabajadores y miembros del público a un nivel aceptable (3). El NCRP 151 está basado en los principios establecidos por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), específicamente en su publicación ICRP 60. Por lo que la nomenclatura utilizada en este trabajo es basada en la normativa ICRP-60 (21).

3.8. ALARA

El principio ALARA (por sus siglas en inglés, As Low As Reasonably Achievable) constituye uno de los pilares fundamentales en la protección radiológica. Este principio establece que toda exposición a la radiación ionizante debe mantenerse tan baja como sea razonablemente posible, considerando factores económicos, sociales y tecnológicos. En el contexto de instalaciones de radioterapia, la aplicación del principio ALARA implica no solo cumplir con los límites de dosis establecidos por las normativas nacionales e internacionales, sino también optimizar el diseño de blindajes, procedimientos operativos y controles administrativos para minimizar la exposición del personal ocupacional, pacientes y público en general. La implementación efectiva de este principio requiere una evaluación continua de los niveles de radiación, el uso de tecnologías avanzadas de simulación y monitoreo, y una cultura de seguridad radiológica que promueva la mejora constante en los sistemas de protección (19).

3.9. Blindaje

Los búnkers para protección radiológica son estructuras especialmente diseñadas para proteger al personal fuera de la sala de teleterapia de la exposición a las radiaciones ionizantes. Estos búnkers están diseñados con blindaje de diferentes tipos de materiales (según sea el tipo de radiación) para absorber o atenuar la radiación que se genera durante los tratamientos que involucran radiación ionizante. Este blindaje como se observa en la Figura 7, se compone de estructuras que reciben la radiación emitida por la fuente directamente llamada barrera primaria y de estructuras que reciben la radiación indirectamente, es decir, mediante dispersión o fuga del cabezal llamada barrera secundaria. Las barreras primarias serán mucho más gruesas que las barreras secundarias (3).

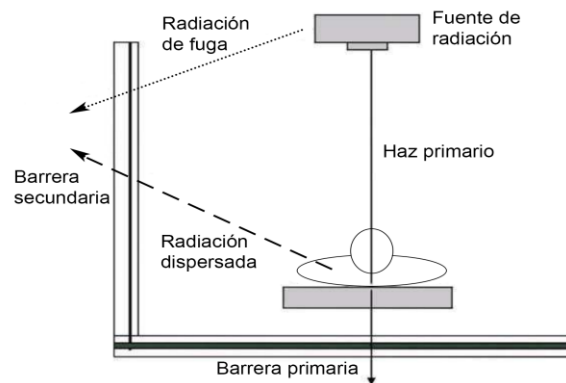
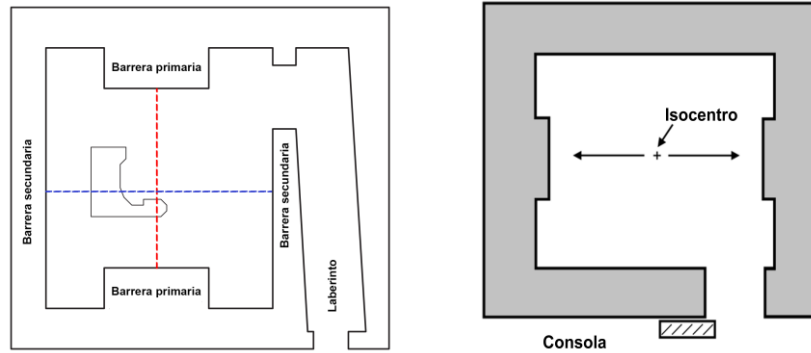


Figura 7. Esquema de barreras primarias y secundarias (18).

Algunos búnkers cuentan con un diseño de laberinto como en la Figura 8, el cual consiste en un pasillo con forma de zigzag ubicado en la entrada del búnker. Este diseño tiene como objetivo reducir la cantidad de radiación en la entrada del laberinto, permitiendo así un menor espesor de blindaje en la puerta y, por ende, una estructura más liviana y delgada en comparación con

un búnker de entrada directa como en la Figura 9. La radiación dispersada en el laberinto es absorbida antes de alcanzar áreas externas al búnker, ofreciendo una capa adicional de protección.



Figuras 8 y 9: Búnker con laberinto (izquierda) y con entrada directa (derecha) (18).

3.10. Materiales de blindaje

Los materiales de blindaje de rayos X necesitan densidad y un número atómico alto para favorecer las interacciones de los fotones con los blindajes y conseguir una buena atenuación. Los materiales que generalmente se utilizan para este fin son: concreto ordinario, concreto pesado, plomo, acero, polietileno o parafina, madera y tierra (11).

3.11. Parámetros de cálculo de blindajes

Las cantidades de dosis relacionadas con el cuerpo humano que la ICRP ha desarrollado para la protección radiológica con el fin de permitir la cuantificación del perjuicio para las personas por la exposición a la radiación ionizante de la irradiación externa de cuerpo entero y parcial son las siguientes(22):

Dosis equivalente (H): se define como el producto del factor de calidad de un tipo particular de radiación ionizante y la dosis absorbida de ese tipo de radiación en un punto del tejido. Las unidades de dosis equivalente son J/kg con el nombre especial sievert (Sv).

La dosis equivalente en un tejido T se calcula utilizando la Ecuación 2

$$HT = \sum_R wR \times DT, R \quad (2)$$

Donde; DT, R es la dosis absorbida promediada sobre el tejido u órgano T, debido a la radiación R. El valor correspondiente de wR para fotones es igual a 1 (3).

Dosis efectiva (E): definida como la suma de las dosis equivalentes ponderadas a órganos o tejidos específicos. La suma se realiza sobre órganos y tejidos considerados sensibles a la inducción de efectos estocásticos. La unidad de dosis efectiva es sievert (Sv).

Estas cantidades no son mensurables y, por lo tanto, no pueden utilizarse directamente como cantidades en la monitorización de la radiación. Por lo tanto, para la vigilancia de las exposiciones a la radiación externa, se introdujeron en la práctica de protección radiológica en muchos países las cantidades de dosis operativas, basadas en la dosis equivalente y definidas por

la ICRU para las mediciones en campos de radiación externos, son la dosis equivalente ambiental y la dosis equivalente personal (22). La primera cantidad se utiliza para la supervisión de zonas, mientras que la última cantidad es para la supervisión individual. Los coeficientes de conversión de dosis efectiva de fotones se calculan con los coeficientes de conversión de dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ y la dosis equivalente personal $H_p(10)$.

Dosis equivalente ambiental ($H^*(10)$): es la dosis equivalente en un punto de un campo de radiación que sería producido por el campo expandido y alineado correspondiente en la esfera de la ICRU a una profundidad de 10 mm en el radio opuesto a la dirección del campo alineado. La unidad de dosis ambiental equivalente es el sievert (Sv)(22).

Dosis equivalente personal ($H_p(d)$): Equivalente de dosis en tejidos blandos a una profundidad adecuada, d , por debajo de un punto especificado en el cuerpo humano. El tejido blando es tejido ICRU de 4 elementos. La unidad de dosis personal equivalente es sievert (Sv). El punto especificado generalmente viene dado por la posición donde se usa el dosímetro individual. Para la evaluación de la dosis efectiva, se recomienda una profundidad de 10 mm(22).

Objetivos de diseño del blindaje o límites de dosis: son los valores recomendados de dosis efectiva o de la dosis equivalente en órganos o tejidos a una persona, utilizados en los cálculos de diseño y evaluación de las barreras construidas para la protección de los trabajadores o miembros del público. Son valores prácticos, para una sola fuente de radioterapia o conjunto de fuentes, que se evalúan en un punto de referencia más allá de una barrera protectora (0.3 metros) para garantizar los valores anuales recomendados en el Informe NCRP 151 (11).

Son los niveles de dosis equivalentes ambiental ($H^*(10)$) o personal ($H_p(10)$) usados para la protección de los trabajadores y miembros del público. Cada zona adyacente a una instalación de radioterapia tiene un límite de dosis

asignado que no debe de ser sobrepasado(22). Las zonas adyacentes son clasificadas por la NCRP en zonas controladas y no controladas (21).

Zonas no controladas: ocupadas por pacientes, trabajadores sobre los que no existe control radiológico y por visitantes. El límite de dosis efectiva es de 1 mSv/año.

Zonas controladas: pueden acceder los trabajadores para los que existe control radiológico. El límite de dosis efectiva es de 20 mSv/año.

Estos límites son establecidos por organizaciones internacionales como el Organismo Internacional de Energía Atómica OIEA o por los propios países a través de sus consejos y comisiones. En México, los límites de dosis equivalente para el personal POE son de 50 mSv al año, y para el público en general, de 5 mSv al año, según lo estipulado por la C.N.S.N.S. (6).

Carga de trabajo

La carga de trabajo (W) se define como la tasa de dosis integrada en el tiempo a la profundidad de absorción de dosis máxima de la fuente de radiación (esta distancia es de 1 metro). El período de tiempo más utilizado para estas especificaciones suele ser de una semana, por lo que las unidades para la carga de trabajo son Gy/semana.

La estimación de la carga de trabajo se deriva del número medio de pacientes tratados en una semana, multiplicado por la dosis media absorbida administrada por paciente. Esta estimación solo es aplicable a los procedimientos convencionales, ya que el uso de técnicas como la TBI (Irradiación Corporal Total) o la IMRT (Radioterapia de Intensidad Modulada) puede alterar significativamente el valor de la carga de trabajo. Es importante tener en cuenta que la carga de trabajo para las operaciones con haces de

electrones generalmente se puede ignorar debido a su bajo poder de penetración, a excepción de los aceleradores que operan exclusivamente con haces de electrones (11).

Factor de uso

El factor de uso (U) es la fracción de tiempo en la que una carga de trabajo del haz principal se dirige hacia una barrera determinada. El valor de U en una instalación tradicional con un haz que gira alrededor de un isocentro normalmente tendrá una distribución simétrica en los ángulos de tratamiento del gantry y estos estarán predominantemente en los cuatro ángulos primarios (0, 90, 180 y 270 grados).

Debido a que, U depende ampliamente de la instalación de la radiación, se menciona en el NCRP 151 que como regla general y para recintos donde no tengamos suficiente información, los factores de uso que se pueden utilizar son los siguientes (11):

- Para las **barreras secundarias**, donde se recibe radiación dispersa por el paciente y por el mismo búnker, además de la radiación de fuga del cabezal del acelerador, su factor de uso se considera igual a **1**.
- Para las **barreras primarias**, las cuales son irradiadas directamente por el haz primario de radiación, su factor de uso se considera igual a **0.25**

Factor de ocupación

El factor de ocupación (T) indica la fracción de tiempo en la que el público general o el personal POE se encuentra en áreas que necesitan protección contra la radiación, en relación con el tiempo total de uso del equipo. Asumiendo un uso uniforme de una unidad de radioterapia durante la semana laboral, el factor de ocupación se calcula como la fracción de horas laborales semanales que una persona promedio estaría en esa área, considerando un

promedio anual (11). Algunos factores recomendados por la NCRP 151 son los de la Tabla 1.

Tabla 1. Proporciona los factores de ocupación sugeridos para la planificación del blindaje cuando no se dispone de otros datos de ocupación, basados en valores de la NCRP 151 (3).

Ubicación	Factor de ocupación (T)
Áreas ocupadas a tiempo completo por una persona, por ejemplo, oficinas administrativas, áreas de planificación de tratamiento, salas de control de tratamiento, estaciones de enfermería, áreas de recepcionista, salas de espera, espacio ocupado por edificio cercano.	1
Salas de tratamiento y salas de examinación de pacientes adyacentes al búnker.	1/2
Pasillos, salones para empleados, baños para el personal.	1/5
Puertas de la sala de tratamiento.	1/8
Baños públicos, salas de venta desatendidas, almacenes, áreas al aire libre con asientos, salas de espera desatendidas, áreas de espera de pacientes, áticos, armarios de conserjería.	1/20

3.12. Memoria analítica (cálculo manual de blindajes)

Barrera primaria

La transmisión de la barrera primaria (B_x) requerida para reducir el campo de radiación directo a niveles aceptables (P) fuera de la barrera está dada por la Ecuación 3.

$$B_x = \frac{P(d_{pri})^2}{WUT} \quad (3)$$

Donde; P es el límite de dosis por semana fuera de la barrera ($Sv \cdot Semana^{-1}$); d_{pri} es la distancia desde el blanco de rayos X hasta el punto de interés al exterior de la barrera, en 0.3 metros más allá de la barrera; W es la carga de trabajo ($Gy \cdot Semana^{-1}$) a 1 metro del blanco de rayos X (isocentro); U es el factor de uso; T es el factor de ocupación (3).

Espesor de la barrera primaria

El espesor de la barrera se puede calcular mediante el uso del espesor decimorreductor (TVL), para lo anterior, se debe determinar primero el número de capas decirreductoras (n) requeridas para el blindaje, este número se obtiene mediante la Ecuación 4.

$$n = \log\left(\frac{1}{Bx}\right) \quad (4)$$

Y el espesor de la barrera primaria (t_x) viene dado por la Ecuación 5.

$$t_x = TVL_1 + (n - 1) TVL_e \quad (5)$$

Los valores de TVL_1 y TVL_e se pueden consultar en el reporte No. 151 del NCRP para distintos materiales de la barrera y energías de haz. En la Tabla 2, podemos obtener los valores de la primera capa decirreductora (TVL_1) y la capa decirreductora de equilibrio (TVL_e) para concreto (3).

Tabla 2. TVL de barrera primaria para hormigón/concreto ordinario ($2.35 g cm^3$) (3).

Energía (MV)	Material	TVL_1(cm)	TVL_e(cm)
6	Concreto	37	33
6	Acero	10	10
6	Plomo	5.7	5.7

Ancho de la barrera primaria o cinturón

En términos generales, el ancho de la barrera primaria (w) se determina al calcular la diagonal del tamaño máximo del campo de radiación a 1 metro del blanco de rayos X (isocentro) y añadiendo al menos 0.3 metros a cada lado para prevenir la radiación de fuga a través de la barrera secundaria que colinda con la barrera.

Para la mayoría de los aceleradores actuales, el tamaño máximo de campo a 1 metro del blanco es de $40 \times 40 \text{ cm}^2$, si rotamos el colimador a 45° respecto de la posición 0° , el tamaño máximo de la diagonal del campo de radiación es de 0.566 metros (3). Si el haz es proyectado en la barrera primaria a X metros de distancia, entonces para este tipo de LINAC el ancho de la barrera primaria se obtiene por la Ecuación 6.

$$w = 0.566 X + 0.6 \text{ m} \quad (6)$$

Barrera secundaria

Para realizar el cálculo del espesor para las barreras secundarias se debe considerar: la radiación de fuga producida en el cabezal del acelerador lineal y la radiación dispersada por el paciente. Los requisitos de esta barrera secundaria se calculan por separado y se aplica la regla de las dos fuentes para obtener el espesor de la barrera secundaria (3).

Radiación de fuga

La transmisión de la barrera secundaria (BL) requerida para reducir el campo de radiación de fuga a niveles aceptables (P) fuera de la barrera está dada por la Ecuación 7.

$$BL = \frac{1000P(dsec)^2}{WT} \quad (7)$$

Donde; P, T, W ya fueron definidas anteriormente y dsec es la distancia desde el isocentro al punto de interés al exterior de la barrera secundaria (0.3 metros más allá de la barrera). Al determinar la protección contra la radiación de fuga para las barreras secundarias, el factor de uso U siempre es igual a 1, es por esto por lo que no aparece en la Ecuación 7. El factor 1000 surge del supuesto de que la protección en el cabezal del acelerador lineal reduce la radiación de fuga a 1/1000 del haz de radiación primaria (0.1 %) emitida a un metro sobre el eje central del haz primario (isocentro) (3).

En la Tabla 3 se muestra el TVL de fuga que se utilizará para el cálculo del espesor del material de concreto.

Tabla 3. TVLs para radiación de fugas en concreto (cm)(3)

Energía (MV)	TVL_i	TVL_e
6	34	29

Radiación dispersada por el paciente

La transmisión para la radiación dispersada por el paciente (Bps) está dada por la Ecuación 8.

$$Bps = \frac{Pd_sca^2 dsec^2 400}{\alpha WTF} \quad (8)$$

Donde; dsca es la distancia de la fuente de radiación al paciente; dsec es la distancia del isocentro o paciente al punto de interés; F es el área del campo incidente sobre el paciente; α es la fracción de dispersión o fracción de dosis absorbida del haz primario de rayos X que se dispersa del paciente en un ángulo particular, esta depende de la energía del haz de rayos X y del ángulo de dispersión como se observa en la Tabla 4 (3). El factor 400 asume que las fracciones de dispersión están normalizadas a aquellas medidas para un tamaño de campo de 20 × 20 cm².

Tabla 4. Fracciones dispersas (α) a 1 m de un maniquí y tamaño de campo de 400 cm² tomadas del NCRP 151 (3,10).

Ángulo (grados)	Fracción dispersa (α)
	6MV
10	1.04 x 10 ⁻²
20	6.73 x 10 ⁻³
30	2.77 x 10 ⁻³
45	1.39 x 10 ⁻³
60	8.24 x 10 ⁻⁴
90	4.26 x 10 ⁻⁴
135	3.00 x 10 ⁻⁴

Espesor de la barrera secundaria

Luego de calcular el factor de transmisión de fuga del cabezal (L) y la radiación dispersada por el paciente (ps), el número de capas decirreductoras (n) se determina similarmente a como se haría en la barrera primaria, mediante la Ecuación 9 (3).

$$n = \log \left(\frac{1}{L,ps} \right) \quad (9)$$

Para obtener el espesor de la barrera secundaria, se deben utilizar las ecuaciones 10, 11, 12 y 13 conforme a la regla de las dos fuentes, la cual se refiere a que cuando un lugar debe protegerse de dos fuentes diferentes de radiación (dispersa y fuga), cada una de las cuales pasa a través de la misma barrera, el espesor resultante de la barrera debe ser igual al mayor de los dos espesores individuales $t(L,ps)$ si difieren entre sí en más de un TVL o bien debe ser igual al espesor mayor más un HVL añadido, determinado por la mayor penetración de las dos fuentes de radiación.

$$t(L, ps) = TVL1(L, ps) + (n - 1)TVL(L, ps) \quad (10)$$

- (Espesor $t(ps)$ - Espesor $t(L)$) $\geq 1TVL$, entonces se utiliza el espesor mayor (11)
- (Espesor $t(ps)$ - Espesor $t(L)$) $< 1TVL$, entonces se utiliza el espesor mayor más 1HVL (12)
- $1HVL = 0.301TVL$ (13)

Los valores de los TVL para la dispersión por el paciente se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. TVL en concreto (cm) para radiación dispersada por el paciente en varios ángulos de dispersión, basados en NCRP 151 (3).

Ángulo de dispersión (grados)	TVL (cm)
	6MV
15	34
30	26
45	23
60	21

Considerando la posibilidad de la Técnica IMRT a los espesores calculados en las barreras secundarias, se debe de agregar un factor utilizando la Tabla 6.

Tabla 6. TVL´s adicionales necesarios para la contribución de fuga en las barreras secundarias donde r es el porcentaje de tratamientos clínicos que son IMRT y C es la relación promedio de MU a cGy para la técnica de IMRT empleada(23).

r	C	W_L	Additional TVL's
0 %		1.0 W_{dir}	0 TVL
50 %	4	2.5 W_{dir}	0.40 TVL
50 %	10	5.5 W_{dir}	0.74 TVL
100 %	4	4 W_{dir}	0.60 TVL
100 %	10	10 W_{dir}	1.0 TVL

Consideraciones para el techo

La sección del techo que puede ser directamente expuesta al haz primario de radiación debe ser tratada como una barrera primaria y las fórmulas utilizadas para determinar su espesor son las mismas vistas anteriormente, pero ahora considerando el objetivo a 50cm de la barrera (techo). El límite de dosis de diseño para el techo dependerá de la ubicación del búnker (11).

Blindaje de puerta de entrada directa

En este diseño la puerta debe de tener el mismo valor de blindaje que la barrera secundaria adyacente a esta. Habitualmente se elige un blindaje laminado de plomo y acero (para la carcasa de la puerta). Una limitación práctica para una puerta de 120 cm de ancho está en el peso, que está en un rango de 8, 000 a 9, 000 kg. Más allá de ese peso es necesario utilizar dos puertas más estrechas o una puerta corrediza, también se recomienda en el informe NCRP 151, que estas puertas deben estar controladas mediante sistemas eléctricos o hidráulicos (11).

3.13. Levantamiento de niveles de radiación

En la instalación o renovación de una sala de teleterapia, y conforme al artículo 94 del capítulo IV del RGSR, es obligatorio verificar que los niveles de radiación en las áreas colindantes a la instalación cumplan con los límites establecidos en el Informe de Seguridad Radiológica aprobado por la CNSNS. Esta verificación debe realizarse antes de la puesta en marcha del equipo de teleterapia (LINAC) por primera vez (6).

Para llevar a cabo esta comprobación, se deben medir los niveles de radiación mediante la Ecuación 14 para la obtención del equivalente de dosis semanal (Hs) en milisieverts (mSv). El cálculo de Hs se realiza utilizando la siguiente expresión:

$$H_s = L * T * t * F \quad (14)$$

L: Lectura máxima en mSv/hr en cada ángulo del gantry.

T: Factor de ocupación.

t: Tiempo total de irradiación por semana en horas.

F: Factor de calibración del equipo de medición.

Es importante destacar que los valores de Hs obtenidos deben ser multiplicados con la Ecuación 15 para ser comparados con los límites establecidos para garantizar que no se excedan los niveles de exposición permitidos para el POE y público en general.

$$H_a = 50 * H_s \quad (15)$$

3.14. Simulaciones de Monte Carlo

El método Monte Carlo es una técnica numérica utilizada para resolver problemas mediante la modelación de interacciones entre objetos, basándose en las relaciones definidas entre ellos. En este sentido, el método Monte Carlo aproxima un sistema macroscópico simulando sus interacciones microscópicas mediante funciones de densidad de probabilidad. Debido a la naturaleza aleatoria de los procesos, es necesario utilizar un generador de números aleatorios. En la medida en que muchas interacciones microscópicas se pueden modelar matemáticamente, la solución repetitiva se puede ejecutar en una computadora (24). Dicho lo anterior, la metodología de Monte Carlo se plantea como una opción complementaria para enfrentar el problema de diseño de blindajes, debido a la flexibilidad de este sistema.

3.15. TOOl for PArticle Simulation TOPAS: Software de simulaciones MC

Este trabajo adopta el paquete de software TOPAS desarrollado por el Massachusetts General College. TOPAS es un kit de herramientas basado en GEANT4, que puede simular con precisión los procesos físicos de la interacción de la radiación con la materia, así como el transporte de partículas en el maniquí de voxelización y ha demostrado ser útil en muchas áreas como en el diseño de cabezales de tratamiento, cálculo de dosis, diseño de blindaje, estudios de imágenes, entre otros. El sistema de parámetros TOPAS proporciona un control flexible sobre todas las áreas clave de simulación, como la configuración de la geometría, la configuración de la fuente de partículas, etc. Los resultados de su uso en el área de Física Médica muestran una concordancia con los datos medidos y demuestran las capacidades de TOPAS para simular la entrega del haz en 3D y 4D (8).

Control general del programa y definición de parámetros

Todo el control del programa de simulación se realiza a través del sistema de parámetros TOPAS y todas las posiciones se establecen en relación con los componentes geométricos. Por lo que se requiere de parámetros bien definidos como se muestra en la Tabla 7, que nos indiquen cuántos valores se esperan y luego los valores en sí, por lo que un parámetro dentro del programa puede ser tipo de cadena, vector con o sin unidad, entero o booleano (8) .

Tabla 7. Convenciones de prefijo para algunos parámetros del software Open TOPAS (8).

Prefijo	Parámetros
Ma/	materiales
Ge/	componentes geométricos
So/	fuentes de partículas
Ph/	física
Vr/	reducción de la varianza
Gr/	gráficos
Sc/	voxelizar
Tf/	funciones de tiempo
Ts/	control general de TOPAS

Definición de geometría y materiales

Para el modelado de la geometría de los búnkers y la asignación de materiales de blindaje, la geometría se puede definir en el programa por medio de componentes donde cada uno tiene tres parámetros de traslación y tres de rotación, que indican la posición del componente en el sistema de coordenadas de su componente principal. La geometría como se muestra en la Figura 10, debe constar de un componente geométrico con un conjunto de subcomponentes geométricos como hijos. Los subcomponentes deben estar ubicados de tal manera que los límites coincidan.

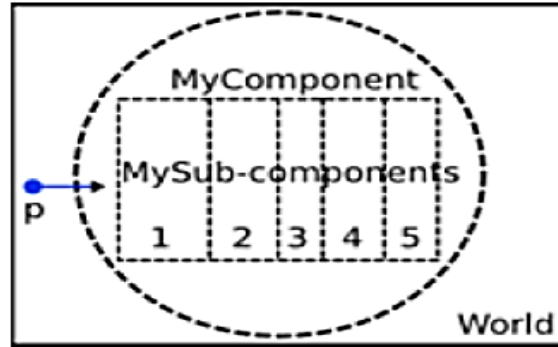


Figura 10. Componentes y subcomponentes geométricos(8).

Para asignar un material, existen nombres de los materiales del NIST los cuales ya están bien especificados (25). El programa cuenta con componentes genéricos como es el caso del maniquí, los cuales pueden ser implementados sin necesidad de realizar la geometría desde cero.

Control general de la línea del tiempo y el error estadístico en SMC

En la herramienta de simulación de TOPAS, se puede elegir cómo se gestiona el tiempo dentro de una simulación, entre un modo secuencial (donde los eventos ocurren en orden cronológico fijo) o un modo de tiempo aleatorio, que permite una representación más realista del comportamiento temporal de la radiación. Este trabajo se realizó de modo aleatorio ya que, al muestrear aleatoriamente el tiempo de cada evento, se logra una simulación más representativa de la realidad clínica, especialmente útil cuando se desea observar la distribución temporal de la dosis o la dispersión de la radiación. Además, permite cubrir todo el intervalo de tiempo sin necesidad de simular cada instante de forma secuencial, lo que mejora la eficiencia (8).

En las SMC, el error estadístico representa la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos, derivada de la naturaleza aleatoria del método. Este error

surge porque las simulaciones se basan en el muestreo de un número finito de historias o partículas, lo que introduce fluctuaciones en los resultados.

La incertidumbre estadística (EE) se calcula comúnmente mediante la Ecuación 16:

$$EE = \frac{SD}{F} \quad (16)$$

Donde, SD es la desviación estándar de la variable de interés (por ejemplo, dosis equivalente), y F es el número promedio de partículas (fotones primarios y/o secundarios) que alcanzan el detector en un intervalo de tiempo o espacio determinado. Este valor proporciona una estimación del nivel de confianza de los resultados obtenidos y es fundamental para evaluar la convergencia de la simulación(26).

Sin embargo, al emplear SMC mediante la herramienta de simulación TOPAS, se debe considerar el número total de historias, por lo que la EE se determina utilizando la Ecuación 17.

$$EE = \frac{(SD/\sqrt{N})}{F} \quad (17)$$

En esta ecuación, SD corresponde a la desviación estándar obtenida directamente de la SMC (en este caso, de la dosis equivalente ambiental), N es el número total de historias simuladas, y F mantiene su definición anterior (8)(27).

Fuente emisora de radiación

El OIEA cuenta con un repositorio de archivos de espacio de fases generados mediante la simulación del cabezal de tratamiento de aceleradores lineales utilizando varios sistemas de Monte Carlo representados en la Figura 11. Estos archivos pueden ser utilizados como fuente emisora de radiación, con el beneficio de que se cuenta con la geometría y con los detalles de origen para la simulación de un acelerador de marca y modelo determinado con especificaciones proporcionadas por el fabricante, ejecutando simulaciones con muchos historiales para generar suficientes partículas para utilizar en cálculos precisos y validando los resultados en relación con las mediciones (28).

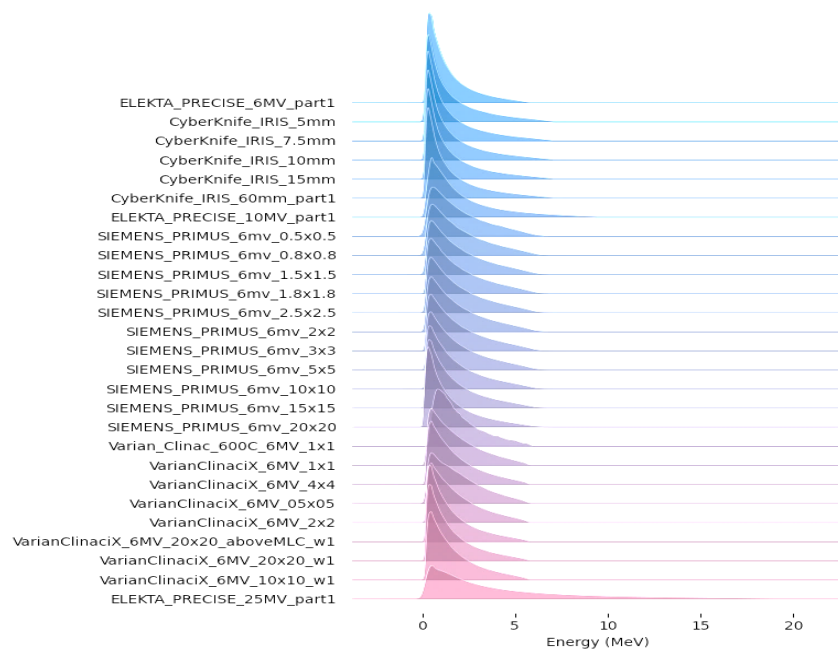


Figura 11. Gráfico de las distribuciones de energía de rayos X que se pueden leer con TOPAS (8).

Física y colocación de detectores

Un método utilizado por TOPAS es el de voxelizar el medio de simulación, asignándole una región de interés para ser medido por medio de detectores. Hay dos clases básicas de detectores: de volumen (energía o dosis) y de superficie (recuento de pistas o espacio de fase) que generan cantidades generales que se acumulan en muchas partículas (recuentos y promedios), pero otros pueden generar información específica por partícula (8,15).

Para obtener la dosis equivalente ambiental (DEA) con un detector de volumen, el software utiliza un estimador de longitud de trayectoria, una técnica de reducción de la varianza que consiste en recuperar la dosis absorbida en las regiones voxelizadas ubicadas a lo largo de la trayectoria de la partícula hasta el punto de interacción. Para ello, como se puede ver en la Ecuación 16, el DEA ($H^*(\epsilon)$) en función de la energía de la partícula para varios tipos de radiación, se obtiene al sumar la fluencia ($\Phi(\epsilon)$) de la partícula incidente de energía ϵ , definida como la longitud de trayectoria de la partícula dividida por el volumen del sistema de puntuación, con coeficientes de conversión de fluencia a dosis equivalente ambiental ($f_{H^*}(\epsilon)$) en términos de DEA por unidad de fluencia ($Sv \cdot cm^2$):

$$H^* = \int f_{H^*}(\epsilon) \cdot \Phi(\epsilon) \cdot d(\epsilon) \quad (18)$$

La ICRP y el Informe ICRU 57 recomiendan coeficientes de conversión para su uso en protección radiológica para electrones y fotones de energías de hasta 10 MeV (22,29).

Obtención de datos y gráficos

TOPAS ofrece una opción para leer los valores obtenidos de los detectores con un archivo generado especificado por nombre y tipo como por ejemplo una salida binaria. Se pueden utilizar herramientas de gráfico como hojas de Excel para poder leer dichos archivos y graficar los valores de interés(8).

4. Metodología

A continuación, se expone el procedimiento dual desarrollado para el presente proyecto, el cual se integra de: a) el cálculo manual del blindaje utilizando la metodología establecida en el informe NCRP No. 151, y b) la simulación Monte Carlo (SMC) mediante el software Open TOPAS. Esta metodología permite determinar, verificar y optimizar el diseño del blindaje para cumplir con los niveles de radiación establecidos por la normativa internacional vigente.

4.1. Infraestructura y apoyo técnico disponible

- **Planos arquitectónicos:** Se emplearon los planos arquitectónicos a escala 1:100 de las instalaciones de los búnkers correspondientes a las salas de teleterapia del Centro Médico Nacional Siglo XXI, Ciudad de México, para definir las dimensiones estructurales y colindancias relevantes para el diseño del blindaje.
- **Software OpenTOPAS:** Se realizó la instalación y configuración del software OpenTOPAS (versión 4) para la simulación detallada del transporte de partículas y del entorno clínico para optimizar y verificar el blindaje propuesto en términos de cumplimiento con los niveles de radiación permitidos por la normativa nacional e internacional.

4.2. Procedimientos

4.2.1. Consideraciones para el cálculo de blindaje

El cálculo analítico permite determinar los espesores de blindaje requeridos en barreras primarias y secundarias a partir de los límites establecidos de la TDEA en los puntos o volúmenes de interés dentro de las zonas controladas y no controladas. El diseño se desarrolla en base a las características del linac, parámetros principales de blindaje, ubicación y colindancias de los búnkers.

4.2.1.1. Características del acelerador lineal

Las características generales del equipo las obtenemos de la Tabla 8.

Tabla 8. Especificaciones proporcionadas por la ficha técnica del fabricante.

ACELERADOR LINEAL	
Marca	ELEKTA
Modelo	Infinity
Distancia nominal de tratamiento	1 metro
Campo máximo de radiación en el isocentro	40 × 40 cm, con diámetro de 56 cm.
Radiación por fuga	< 0.1% de la dosis absorbida al isocentro
Contaminación de neutrones	Debido a la energía, no se considerará producción de neutrones.
Rotación del gantry	± 360°
Energías de rayos X	6MV
Energías de electrones	No se habilita

4.2.1.2. Parámetros principales de blindaje

Límite de tasa de dosis equivalente ambiental (P)

Para el cálculo de barreras se aplicaron las recomendaciones del NCRP 151, se utilizaron los límites de dosis internacionales establecidos por la IAEA (ver Tabla 9), donde al POE se le establece un límite de TDEA de 20 mSv por año (0.4 mSv/semana) y para el público en general se le establece un límite de TDEA de 1 mSv por año (0.02 mSv/semana). Debido a que las salas de tratamientos son

colindantes tal como se muestra en los planos de ubicación (ver Figura 12), por lo tanto, como caso especial la TDEA máxima permisible para POE y público se dividirá en tres partes o dos según sea el caso del punto a calcular.

Tabla 9. Límites de TDEA establecidas por la IAEA para el POE y público.

Personal	Límite de TDEA (P) (mSv/año)	Límite de TDEA (P) (mSv/semana)	Límite de TDEA (P) Dividida en dos partes por contribución de salas de tratamiento contiguas (mSv/semana)	Límite de TDEA (P) Dividida en tres partes por contribución de salas de tratamiento contiguas (mSv/semana)
POE	20	0.4	0.2	0.13
Público	1	0.02	0.01	0.0066

Carga de trabajo semanal (W)

Para técnicas convencionales donde se consideró que el equipo tendrá un uso de 8 horas diarias durante 5 días laborales a la semana, tratando hasta 45 pacientes tratados al día, contemplando que se puede sólo tomar en cuenta a todos los pacientes tratados con rayos X. Estimando una dosis promedio por paciente de 2 Gy, por lo que la carga de trabajo se determinó utilizando la Ecuación 19.

$$W = \frac{\text{dosis}}{\text{paciente}} \times \frac{\text{pacientes}}{\text{día}} \times \frac{\text{días}}{\text{semana}} = \frac{2\text{Gy}}{\text{paciente}} \times \frac{45\text{pacientes}}{\text{día}} \times \frac{5\text{días}}{\text{semana}} = \frac{450\text{Gy}}{\text{semana}} \quad (19)$$

Se añaden 500 Gy/año (10 Gy/semana) que corresponden a procesos de control de calidad y dosimetría. Dándonos un total para la carga de trabajo convencional de:

$$W = 460 \text{ Gy/sem}$$

Por lo tanto, con fines de seguridad consideramos la Ecuación 20.

$$W = \frac{46000\text{cGy}}{\text{semana}} = \frac{50000\text{cGy}}{\text{semana}} \quad (20)$$

4.2.2. Ubicación y colindancias de los búnkers

La Figura 12 muestra el plano con las salas de tratamiento donde se encuentran los linacs ubicados en un sótano, bajo nivel de suelo.

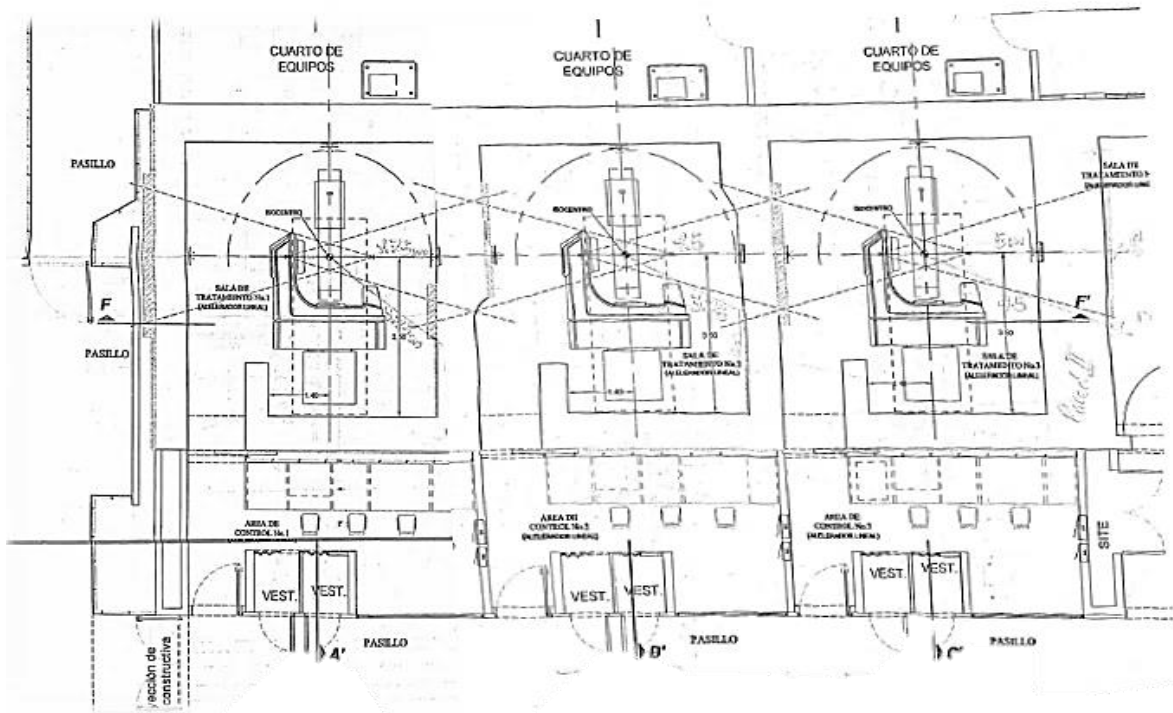


Figura 12. Plano original arquitectónico de búnkers lindantes de Teleterapia del Centro Médico Nacional Siglo XXI, ciudad de México, México.

A continuación, en la Figura 13 se presenta la numeración de las paredes de las salas de teleterapia utilizada para el cálculo manual de los espesores del blindaje, así como la ubicación de los puntos de interés nombrados con P.A., P.B., ... P.R. También se muestran las zonas adyacentes a los búnkers de la Tabla 10, clasificando como zonas no controladas los cuartos de equipo y el pasillo, mientras que el resto corresponde a zonas controladas.

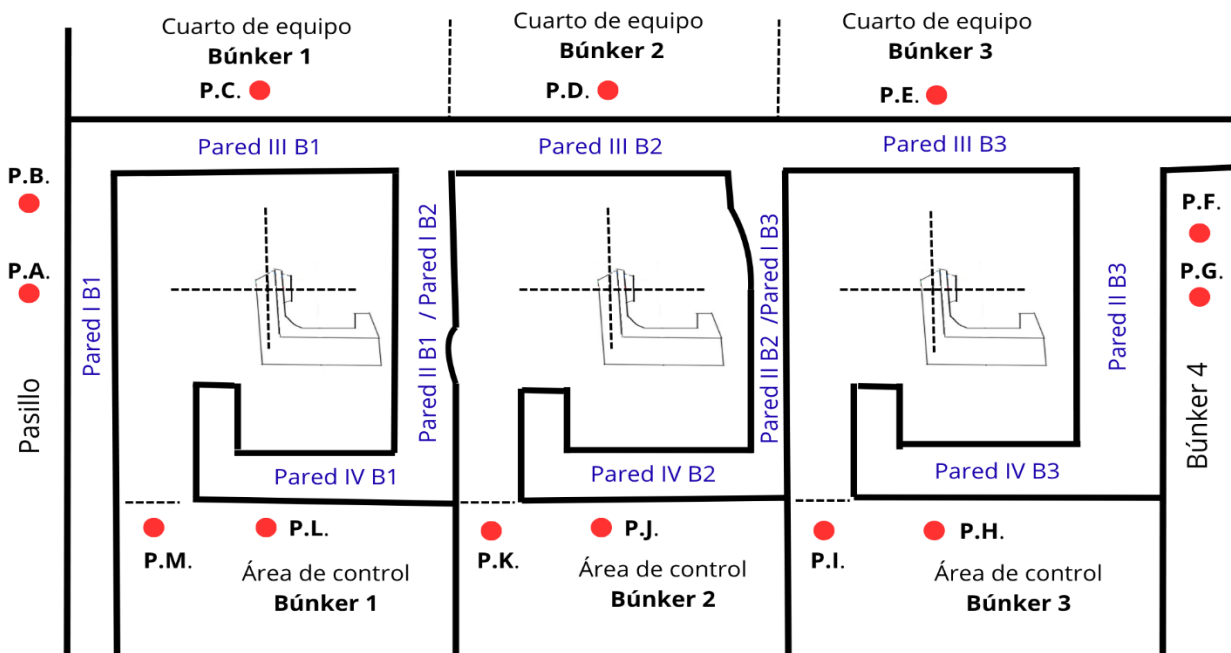


Figura 13. Identificación de las distintas paredes en la estructura, puntos de interés y colindancias de los 3 búnkers lindantes.

Tabla 10. Colindancias de las Salas de Teleterapia

Pared	Sala 1 Teleterapia	Zona	Sala 2 Teleterapia	Zona	Sala 3 Teleterapia	Zona
I	Pasillo	No controlada	Sala 1 Teleterapia	Controlada	Sala 2 de Teleterapia	Controlada
II	Sala 2 Teleterapia	Controlada	Sala 3 Teleterapia	Controlada	Sala 4 de Teleterapia	Controlada
III	Cuarto de Equipos	No controlada	Cuarto de Equipos	No controlada	Cuarto de Equipos	No controlada
IV	Área de Control	Controlada	Área de Control	Controlada	Área de Control	Controlada
V	Puerta de acceso Sala 1	Controlada	Puerta de acceso Sala 2	Controlada	Puerta de acceso Sala 3	Controlada
Techo	Sala de Rayos X	Controlada	Sala de Rayos X	Controlada	Sala de Rayos X	Controlada
Piso	Suelo firme	N/A	Suelo firme	N/A	Suelo firme	N/A

4.2.3. Método de cálculo de blindaje

4.2.3.1. Barreras primarias y secundarias del búnker 1.

- **PARED I, PUNTO A, Barrera primaria**, colinda con pasillo (Zona no controlada) utilizando los valores de la Tabla 11, de la Ecuación 3 se calculó el factor de transmisión B_x :

Tabla 11. Parámetros principales Búnker 1, Pared I, Barrera primaria

P	0.01 mSv/sem
U	0.25
T	0.2
d_{pri}	6.25 m
W	50000 cGy/sem

Factor de transmisión B_x para la barrera primaria.

$$B_x = \frac{(0.01\text{mSv/sem})(6.25\text{m})^2}{(50000\text{cGy/sem})(0.25)(0.2)} = 1.56 \times 10^{-4}$$

Para calcular el espesor necesario, primero se calculó “n” que es el número de capas de TVL´s requeridas con la Ecuación 4:

$$n = \log\left(\frac{1}{1.56 \times 10^{-4}}\right) = 4$$

Con los valores de TVL establecidos de la Tabla 2 para una energía de 6 MV y estableciendo como material de blindaje para la construcción del búnker, al concreto pesado con densidad de $\rho = 2.35 \text{ g/cm}^3$, el espesor de la barrera primaria t_x se obtiene con la Ecuación 5:

$$t_x = 37 + (4 - 1)33 = 136 \text{ cm}$$

Esta pared I tiene un espesor de 75 cm, corregido por el factor de densidad queda con espesor de 71cm, por lo que le faltarían 65 cm de concreto.

Lo que correspondería a:

Si el espesor es $tx = nTVL$, entonces $n = \frac{tx}{TVL} = \frac{65}{33} = 2$, usando el TVL de concreto.

Dado que se llevará a cabo una remodelación del búnker, se optó por calcular los espesores requeridos utilizando acero como material de blindaje. Esta elección responde a la necesidad de reducir al mínimo el espesor de las barreras, debido a las limitaciones de espacio físico en la infraestructura existente.

El TVL del acero es 10 (ver Tabla 2), por lo tanto, el **espesor de acero** propuesto para la **barrera primaria** es:

$$tx = 2(10) = 20 \text{ cm de acero}$$

- **Ancho de la barrera primaria w**

La forma de la barrera primaria por lo regular es un trapecio, pero este sería pequeño, entonces se consideró un rectángulo que sobresale de la barrera secundaria. Para obtener el ancho del cinturón de la barrera primaria se utilizó la Ecuación 6, para una distancia X2 dada:

La distancia de X2=6.1 metros del cabezal del acelerador a la segunda capa de la pared.

$$w = 0.566 (6.1\text{m}) + 0.6 \text{ m} = 4.1 \text{ m}$$

- **PARED I, PUNTO B, Barrera secundaria**, colinda con pasillo (Zona no controlada).

Se calcularon los factores de transmisión de las barreras secundarias con los valores de la Tabla 12 en dos partes: 1) de fuga y 2) dispersada por el paciente.

Tabla 12. Parámetros principales Búnker 1, Pared I, Barrera secundaria

P	0.01 mSv/sem
U	1
T	0.2
d_{sec}	5.15 m
d	4 m
d_{sca}	1m
W	50000cGy/sem
α (30°)	2.77X10 ⁻³

Factor de transmisión para la radiación de fuga (BL) con la Ecuación 7.

$$BL = \frac{1000(0.01 \text{ mSv/sem})(4\text{m})^2}{(50000 \text{ cGy/sem})(0.2)} = 0.016$$

Se calculó “n” que es el número de TVL´s requeridas con la Ecuación 9:

$$n = \log\left(\frac{1}{0.016}\right) = 2$$

El espesor de la barrera secundaria t_{xfuga} se obtuvo con la Ecuación 10 y los TVL de la Tabla 3:

$$t_{xfuga} = 34 + (2-1) (29 \text{ cm}) = 63 \text{ cm}$$

Factor de transmisión para la radiación dispersa (Bps) con la Ecuación 8.

$$Bps = \frac{(0.01 \text{ mSv/sem})(1\text{m})^2(5.15\text{m})^2 400}{(0.00277)(50000 \text{ cGy/sem})(0.2)(1600)} = 2.39 \times 10^{-3}$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{2.39 \times 10^{-3}}\right) = 3$$

El espesor de la barrera secundaria $t_{xdispersa}$ se obtuvo con la Ecuación 10:

$$t_{x\text{dispersa}} = (3) (26\text{cm}) = 78 \text{ cm}$$

Aplicando las ecuaciones 11 y 12 se obtuvo:

$$t_{x\text{dispersa}} - t_{x\text{fuga}} = 78 - 63 = 15 \text{ cm} < 1\text{TVL}$$

Por la regla de las dos fuentes, al espesor mayor se le suma una HVL donde el espesor (s) necesario está dado por:

$$s = 78 + \text{HVL} = 78 + (0.301 \times 34) = 88.2$$

Considerando que se utilizará la Técnica de Radioterapia con Intensidad Modulada (IMRT por sus siglas en inglés) para el 50% de los pacientes ($r=50\%$) y un aumento en las Unidades Monitor de 10 veces ($C=10$), tomando en cuenta la Tabla 6, se adicionó una capa TVL con un **factor de 0.74** en los cálculos.

$$T_x = s + 0.74\text{TVL} = 88.2 + (0.74) (34) = 113.4 \text{ cm}$$

Esta pared tiene 71 cm de espesor ya corregido por densidad, por lo que le faltarían 42 cm de concreto.

Lo que correspondería a:

$$n = \frac{42}{33} = 1.3, \text{ usando el TVL de concreto}$$

El TVL del acero es 10, por lo tanto, el **espesor de acero** propuesto para la **barrera secundaria** es:

$$T_x = 1.3(10) = 13 \text{ cm de acero}$$

- **PARED II, PUNTO C, Barrera primaria**, colinda con sala 2 de teleterapia (Zona controlada) utilizando los valores de la Tabla 13, de la Ecuación 3 se calculó el factor de transmisión B_x :

Tabla 13. Parámetros principales Búnker 1, Pared II, Barrera primaria

P	0.13 mSv/sem
U	0.25
T	$\frac{1}{2} = 0.5$
d_{pri}	5.7 m
W	50000cGy/sem

$$Bx = \frac{(0.13 \text{ mSv/sem})(5.7\text{m})^2}{(50000 \text{ cGy/sem})(0.25)(0.5)} = 6.76 \times 10^{-4}$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{6.76 \times 10^{-4}}\right) = 3.2$$

El espesor de la barrera primaria tx se obtuvo con la Ecuación 5:

$$tx = 37 + (3.2 - 1)33 = 109.6 \text{ cm}$$

Esta pared II tiene un espesor de 71 cm por lo que le faltarían 38.6 cm de concreto lo que correspondería a:

$$n = \frac{38.6}{33} = 1.17$$

El TVL del acero es 10, por lo tanto, el **espesor de acero** propuesto para la **barrera primaria** es:

$$tx = 1.17(10) = 12 \text{ cm de acero}$$

Ancho de la barrera primaria W

Para obtener el ancho del cinturón de la barrera primaria se utilizó la Ecuación 6:

La distancia de X2=5.5 metros del cabezal del acelerador a la segunda capa de la pared.

$$w = 0.566 (5.5\text{m}) + 0.6 \text{ m} = 3.7 \text{ m}$$

- **PARED II, PUNTO D, Barrera secundaria**, colinda con sala 2 de teleterapia (Zona controlada).

De los datos de la Tabla 14 se calculó:

Tabla 14. Parámetros principales Búnker 1, Pared II, Barrera secundaria

P	0.13 mSv/sem
U	1
T	$\frac{1}{2} = 0.5$
d_{sec}	4.55 m
d	3.5
d_{sca}	1m
W	50000cGy/sem
α (30°)	2.77×10^{-3}

Factor de transmisión para la radiación de fuga (BL) con la Ecuación 7.

$$BL = \frac{1000(0.13 \text{ mSv/sem})(3.5\text{m})^2}{(50000 \text{ cGy/sem})(0.5)} = 0.06$$

Se calculó "n":

$$n = \log\left(\frac{1}{0.06}\right) = 1.22$$

El espesor de la barrera secundaria t_{xfuga} se obtuvo con la Ecuación 10:

$$t_{xfuga} = (1.22) (26\text{cm}) = 32 \text{ cm}$$

Factor de transmisión para la radiación dispersa (B_{ps}) con la Ecuación 8.

$$B_{ps} = \frac{(0.13 \text{ mSv/sem})(1\text{m})^2(4.55\text{m})^2 400}{(0.00277)(50000 \text{ cGy/sem})(0.5)(1600)} = 9.7 \times 10^{-3}$$

Se calculó “n” que es el número de TVL´s requeridas con la Ecuación 9:

$$n = \log\left(\frac{1}{9.7 \times 10^{-3}}\right) = 2$$

Por lo que el espesor de la barrera secundaria $t_{xdispersa}$ se obtuvo con la Ecuación 10:

$$t_{xdispersa} = (2) (26\text{cm}) = 52 \text{ cm}$$

Aplicando las ecuaciones 11 y 12 se obtuvo:

$$t_{xdispersa} - t_{xfuga} = 52 - 32 = 20 \text{ cm} < 1\text{TVL}$$

Por la regla de las dos fuentes, al espesor mayor se le sumó una HVL donde el espesor necesario s esta dado por:

$$s = 52 + \text{HVL} = 52 + (0.301 \times 34) = 62.2$$

Considerando IMRT:

$$t_x = s + 0.74\text{TVL} = 62.2 + (0.74) (34) = 87.4 \text{ cm}$$

Esta pared tiene 71 cm de espesor por lo que faltaría 16.4 cm de espesor a la barrera de concreto.

$$n = \frac{16.4}{33} = 0.5$$

El TVL del acero es 10, por lo tanto, el **espesor de acero** propuesto para la **barrera secundaria** es:

$$t_x = 0.5(10) = 5 \text{ cm de acero}$$

- **PARED III, PUNTO E, Barrera secundaria**, colinda con cuarto de equipos (Zona controlada).

Se calcularon los factores de transmisión de las barreras secundarias en dos partes con los valores de la Tabla 15.

Tabla 15. Parámetros principales Búnker 1, Pared III, Barrera secundaria

P	0.13 mSv/sem
U	1
T	0.05
d_{sec}	5.35 m
d	5.35 m
d_{sca}	1m
W	50000cGy/sem
α (90°)	4.26X10 ⁻⁴

Factor de transmisión para la radiación de fuga (BL) con la Ecuación 7.

$$BL = \frac{1000(0.13 \text{ mSv/sem})(5.35\text{m})^2}{(50000 \text{ cGy/sem})(0.05)} = 1.49$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{1.49}\right) = 0.2$$

El espesor de la barrera secundaria t_{xfuga} se obtuvo con la Ecuación 10:

$$t_{xfuga} = 34 + (0.2 - 1) (29\text{cm}) = 11 \text{ cm}$$

Factor de transmisión para la radiación dispersa (Bps) con la Ecuación 8.

$$Bps = \frac{(0.13 \text{ mSv/sem})(1\text{m})^2(5.35\text{m})^2 400}{(4.26 \times 10^{-4})(50000 \text{ cGy/sem})(0.05)(1600)} = 0.87$$

Se calculó "n":

$$n = \log\left(\frac{1}{0.87}\right) = 0.06$$

El espesor de la barrera secundaria $t_{x\text{dispersa}}$ se obtuvo con la Ecuación 10:

$$t_{x\text{dispersa}} = (0.06) (17\text{cm}) = 1.03 \text{ cm}$$

Aplicando las ecuaciones 11 y 12 se obtuvo:

$$t_{x\text{dispersa}} - t_{x\text{fuga}} = 11 - 1.03 = 10 \text{ cm} < 1\text{TVL}$$

Por la regla de las dos fuentes, al espesor mayor se le sumó una HVL donde el espesor necesario es esta dado por:

$$s = 11 + \text{HVL} = 11 + (0.301 \times 34) = 21.2$$

Considerando IMRT:

$$t_x = 21.2 + (0.74) (34) = 46.4 \text{ cm}$$

Esta pared tiene 76 cm por lo que requiere blindaje adicional de 29.6 cm de concreto.

$$n = \frac{29.6}{33} = 0.9$$

El TVL del acero es 10, por lo tanto, el **espesor de acero** propuesto para la **barrera secundaria** es:

$$t_x = 0.9(10) = 9 \text{ cm de acero}$$

- **PARED IV, PUNTO F, Barrera secundaria**, colinda con el área de control (Zona controlada).

Con los valores de la Tabla 16, se calcularon los factores de transmisión de las barreras secundarias.

Tabla 16. Parámetros principales Búnker 1, PARED IV, Barrera secundaria

P	0.13 mSv/sem
U	1
T	1
d_{sec}	6.65 m
d	6.65 m
d_{sca}	1m
W	50000cGy/sem
α (90°)	4.26X10 ⁻⁴

Factor de transmisión para la radiación de fuga (BL) con la Ecuación 7.

$$BL = \frac{1000(0.13 \text{ mSv/sem})(6.65\text{m})^2}{(50000 \text{ cGy/sem})(1)} = 0.11$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{0.11}\right) = 0.96$$

El espesor de la barrera secundaria tx_{fuga} se obtuvo con la Ecuación 10:

$$tx_{fuga} = 34 + (0.96-1) (29\text{cm}) = 32.8 \text{ cm}$$

Factor de transmisión para la radiación dispersa (Bps) con la Ecuación 8.

$$Bps = \frac{(0.13 \text{ mSv/sem})(1\text{m})^2(6.65\text{m})^2 400}{(4.26 \times 10^{-4})(50000 \text{ cGy/sem})(1)(1600)} = 0.07$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{0.07}\right) = 1.15$$

El espesor de la barrera secundaria $t_{x\text{dispersa}}$ se obtuvo con la Ecuación 10:

$$t_{x\text{dispersa}} = (1.15) (17\text{cm}) = 19.63 \text{ cm}$$

Aplicando las ecuaciones 11 y 12 se obtuvo:

$$t_{x\text{dispersa}} - t_{x\text{fuga}} = 32.8 - 19.63 = 13.17 \text{ cm} < 1\text{TVL}$$

Por la regla de las dos fuentes, al espesor mayor se le sumó una HVL donde el espesor necesario s esta dado por:

$$s = 13.17 + \text{HVL} = 32.8 + (0.301 \times 34) = 43$$

Considerando IMRT:

$$t_x = 43 + (0.74) (34) = 68.2 \text{ cm}$$

Esta pared tiene 71 cm por lo que **no requiere blindaje adicional.**

- **TECHO, punto G- Barrera primaria.** -colinda con departamento de rayos x. (Zona no controlada)

Tabla 17. Parámetros principales Búnker 1, Techo, Barrera primaria

P	0.01 mSv/sem
U	0.25
T	1
dpri	6 m
W	50000cGy/sem

Con los datos de la Tabla 17 se calculó con la Ecuación 3 la transmisión Bx:

$$Bx = \frac{(0.01 \text{ mSv/sem})(6\text{m})^2}{(50000 \text{ cGy/sem})(0.25)(1)} = 2.88 \times 10^{-5}$$

Se calculó “n” que es el número de TVL´s requeridas con la Ecuación 4:

$$n = \log\left(\frac{1}{2.88 \times 10^{-5}}\right) = 5$$

El espesor de la barrera primaria tx se obtuvo con la Ecuación 5:

$$tx = 37 + (5 - 1)33 = 169 \text{ cm}$$

Este techo tiene un espesor de 55 cm por lo que le faltarían 114 cm de concreto lo que correspondería a:

$$n = \frac{114}{33} = 3.45$$

Debido a que el blindaje requerido corresponde a la zona del techo del búnker y considerando las restricciones de espacio impuestas por el proyecto de remodelación, se decidió emplear plomo como material de blindaje en lugar de concreto o acero para reducir los espesores significativamente.

El TVL del plomo es 5.7, por lo tanto, el **espesor de plomo** propuesto para la **barrera primaria** es:

$$tx = 3.45 (5.7) = 20 \text{ cm de plomo}$$

- **Ancho de la barrera primaria W**

La distancia de X2=4.7 metros del cabezal del acelerador a la segunda capa de la pared.

$$w = 0.566 (4.7\text{m}) + 0.6 \text{ m} = 3.3 \text{ m}$$

- **TECHO, PUNTO H, Barrera secundaria**, colinda con área de rayos x (Zona no controlada).

Se calcularon los factores de transmisión de las barreras secundarias en dos partes con los valores de la Tabla 18.

Tabla 18. Parámetros principales Búnker 1, Techo, Barrera secundaria

P	0.01 mSv/sem
U	1
T	1
d_{sec}	5.5 m
d	4.5 m
d_{sca}	1m
W	50000cGy/sem
α (30°)	2.77X10 ⁻³

Factor de transmisión para la radiación de fuga (BL) con la Ecuación 7.

$$BL = \frac{1000(0.01mSv/sem)(4.5m)^2}{(50000cGy/sem)(1)} = 4.05 \times 10^{-3}$$

Se calculó “n”:

$$n = \log \left(\frac{1}{4.05 \times 10^{-3}} \right) = 2.4$$

El espesor de la barrera secundaria t_{xfuga} se obtuvo con la Ecuación 10:

$$t_{xfuga} = 34 + (2.4) (29cm) = 103.6 \text{ cm}$$

Factor de transmisión para la radiación dispersa (Bps) con la Ecuación 8.

$$Bps = \frac{(0.01mSv/sem)(1m)^2(5.5m)^2 400}{(2.77 \times 10^{-3})(50000cGy/sem)(1)(1600)} = 5.46 \times 10^{-4}$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{5.46 \times 10^{-4}}\right) = 3.3$$

El espesor de la barrera secundaria $t_{x\text{dispersa}}$ se obtiene con la Ecuación 10:

$$t_{x\text{dispersa}} = (3.3) (26\text{cm}) = 84.83 \text{ cm}$$

Aplicando las ecuaciones 11 y 12 se obtuvo:

$$t_{x\text{fuga}} - t_{x\text{dispersa}} = 103.6 - 84.83 = 18.77 \text{ cm} < 1\text{TVL}$$

Por la regla de las dos fuentes, al espesor mayor se le sumó una HVL donde el espesor necesario es esta dado por:

$$s = 103.6 + \text{HVL} = 103.6 + (0.301 \times 34) = 113.8 \text{ cm}$$

Considerando IMRT:

$$t_x = 113.8 + (0.74) (34) = 138.9 \text{ cm}$$

Este techo tiene un espesor de 55 cm por lo que le faltaría 84 cm de espesor de concreto en la barrera.

$$n = \frac{84}{33} = 2.5$$

El TVL del plomo es 5.7, por lo tanto, el **espesor de plomo** propuesto para la **barrera secundaria** es:

$$t_x = 2.5 (5.7) = 14 \text{ cm de plomo}$$

- **PUERTA DE ENTRADA DIRECTA, PUNTO I, Barrera secundaria.** - colinda con el área de control sala 1 (Zona controlada).

En este diseño de blindaje, la puerta se considera de entrada directa por lo que el espesor de blindaje se calculó como barrera secundaria. Con los valores de la Tabla 19, se obtuvieron los factores de transmisión.

Tabla 19. Parámetros principales Búnker 1, Puerta, Barrera secundaria

P	0.2 mSv/sem
U	1
T	1
d_{sec}	7.5 m
d	7 m
d_{sca}	1m
W	50000cGy/sem
α (60°)	8.24 × 10 ⁻⁴

Factor de transmisión para la radiación de fuga (BL) con la Ecuación 7.

$$BL = \frac{1000(0.2mSv/sem)(7m)^2}{(50000cGy/sem)(1)} = 0.196$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{0.196}\right) = 0.71$$

El espesor de la barrera secundaria tx_{fuga} se obtuvo con la Ecuación 10:

$$tx_{fuga} = 34 + (0.71)(29cm) = 54.6 \text{ cm}$$

Factor de transmisión para la radiación dispersa (Bps) con la Ecuación 8.

$$Bps = \frac{(0.2 \text{ mSv/sem})(1m)^2(7.5m)^2 400}{(8.24 \times 10^{-4})(50000 \text{ cGy/sem})(1)(1600)} = 0.07$$

Se calculó “n”:

$$n = \log\left(\frac{1}{0.07}\right) = 1.2$$

El espesor de la barrera secundaria $t_{x\text{dispersa}}$ se obtiene con la Ecuación 10:

$$t_{x\text{dispersa}} = (1.2) (26\text{cm}) = 30 \text{ cm}$$

Aplicando las ecuaciones 11 y 12 se obtuvo:

$$t_{x\text{fuga}} - t_{x\text{dispersa}} = 54.6 - 30 = 25 \text{ cm} < 1\text{TVL}$$

Por la regla de las dos fuentes, al espesor mayor se le sumó una HVL donde el espesor necesario se da por:

$$s = 54.6 + \text{HVL} = 54.6 + (0.301 \times 34) = 65 \text{ cm de concreto}$$

Considerando IMRT:

$$t_x = 65 + (0.74) (34) = 90 \text{ cm}$$

Para el espesor de la puerta se utiliza plomo por lo que se calcula el espesor en material de plomo:

$$n = \frac{90}{33} = 3$$

El TVL del plomo es 5.7, por lo tanto, el **espesor de plomo** propuesto para la **barrera secundaria** es:

$$t_x = 3 (5.7) = 17 \text{ cm de plomo}$$

- **PISO.** - colinda con la tierra por lo que no se requiere hacer cálculo de blindaje.

Barreras primarias y secundarias del búnker 2 y 3.

La metodología previamente descrita fue aplicada de manera análoga para el cálculo del blindaje en los búnkers 2 y 3. Se siguieron los mismos criterios técnicos y procedimientos establecidos, asegurando la consistencia en el análisis y la comparabilidad de los resultados obtenidos para cada una de las instalaciones evaluadas.

4.2.4. Verificación y optimización del blindaje con simulación Monte Carlo

El cumplimiento de los límites de la TDEA en las zonas de interés se realizó considerando tres escenarios: los espesores de la estructura actual, los espesores de pared obtenidos en la sección anterior y los espesores simulados ajustados. Para ello, se emplearon SMC utilizando el software Open TOPAS, versión 4, basado en los modelos físicos del paquete GEANT4.

Las simulaciones fueron ejecutadas en un sistema operativo Ubuntu 22.04 LTS, instalado en una computadora de escritorio equipada con un procesador CPU de 4 núcleos a una velocidad máxima de 2.6 GHz y 8 GB de memoria RAM. Bajo estas condiciones, se logró simular 2×10^8 historias, con un tiempo de ejecución aproximado de 12 horas por simulación.

4.2.4.1. Control general del programa y definición de parámetros

El control del programa de simulación se llevó a cabo mediante los convencionalismos establecidos en el sistema de parámetros de TOPAS, los cuales están claramente definidos y estructurados en la Tabla 7. A partir de esta configuración, se diseñó la estructura general de control del programa de simulación, la cual se representa en la Figura 14.

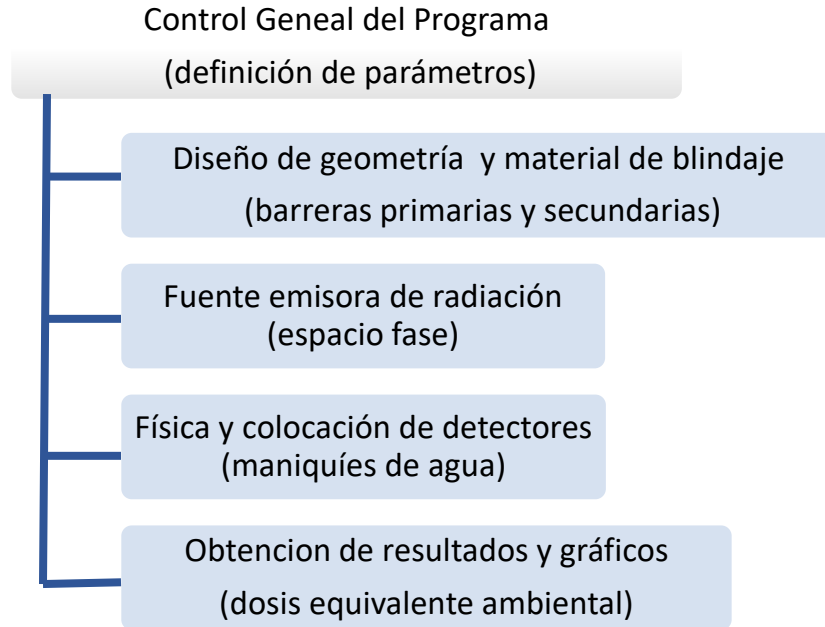


Figura 14. Esquema general del programa de SMC.

4.2.4.2. Definición de la Geometría y Materiales

La geometría tridimensional de los búnkers lindantes se simuló a partir de la Figura 13. Se realizó mediante un volumen cúbico de aire ($\rho = 0.00120479 \text{ g/cm}^3$) con dimensiones de $14 \times 7 \times 30$ metros, el cual representa el mundo lógico en el que se desarrolla la simulación, es decir, el entorno donde ocurre la interacción de la radiación con la materia. Dentro de este mundo se construyeron los componentes y subcomponentes geométricos correspondientes a las barreras primarias y secundarias, posicionados mediante los parámetros de traslación y rotación dentro del sistema de coordenadas del volumen principal. Esta disposición se realizó cuidadosamente para evitar el traslape entre límites de cada subcomponente, como se ilustra en la Figura 10.

Las barreras fueron modeladas en función de los espesores de blindaje requeridos, definidos como entradas (*inputs*) en el sistema. Los materiales asignados a cada barrera fueron seleccionados de la librería de materiales de Geant4 proporcionada por la OIEA, utilizando las denominaciones oficiales del NIST. Los materiales empleados fueron: concreto ($\rho = 2.3 \text{ g/cm}^3$), acero ($\rho = 8.0 \text{ g/cm}^3$) y plomo ($\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$), seleccionados en función de los requerimientos específicos de atenuación y las restricciones de espacio de cada zona del búnker(25).

Adicionalmente, se incorporaron maniqués cilíndricos de agua ($\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) en el modelo de simulación, con un radio de 20 cm y una longitud de 100 cm. Estos maniqués fueron utilizados para representar al paciente y permitir la evaluación de la dispersión secundaria de la radiación generada por la interacción del haz con el cuerpo humano. El maniquí fue posicionado en el isocentro de la sala de teleterapia, respetando una distancia fuente-superficie (DFS) de 80 cm y una distancia fuente-isocentro (DFI) de 100 cm.

Un modelo simplificado para la SMC de los tres búnkers se muestra en la Figura 15, donde los cubos rojos representan los detectores, con dimensiones de $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$, ubicados a 30 cm de las paredes, y a 50 cm del suelo y del techo, correspondientes a los puntos P.A., ..., P.R. indicados en la Figura 13. Los rectángulos grises representan las barreras primarias y secundarias, mientras que las líneas moradas indican las cuatro posiciones angulares utilizadas para simular la rotación del gantry del linac.

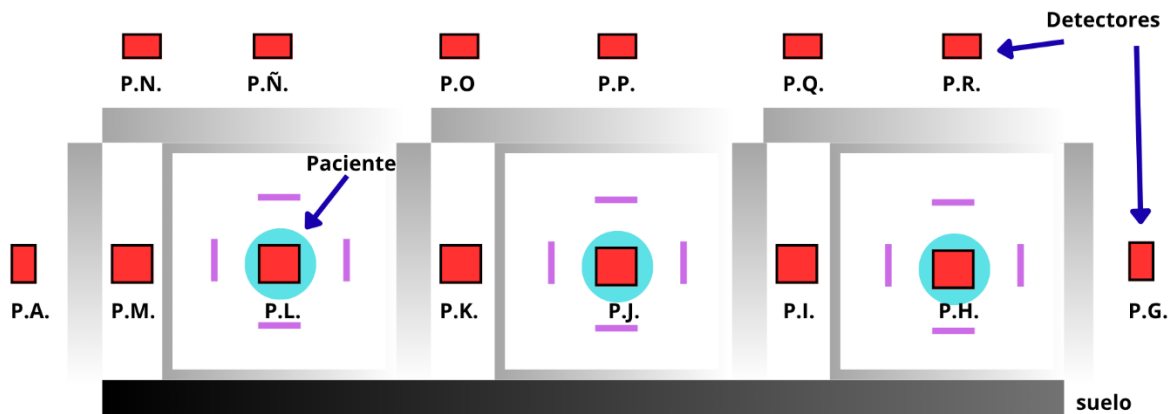


Figura 15. Esquema simplificado de la geometría de los componentes y subcomponentes simulando los búnkers.

4.2.4.3. Control general de la línea del tiempo

En el presente trabajo se empleó el modo de tiempo aleatorio para la ejecución de las SMC, el cual genera un historial por ejecución con tiempos muestreados aleatoriamente. Esta modalidad introduce una distribución temporal más amplia de los eventos simulados, lo que puede incrementar la dispersión de los resultados y, por ende, el error estadístico asociado.

Para mitigar este efecto y asegurar que los resultados obtenidos sean estadísticamente representativos, se ejecutaron simulaciones con un total de 2×10^8 historias. Este número fue seleccionado como un compromiso entre la precisión estadística y el tiempo computacional disponible, permitiendo reducir el error estadístico calculado con la Ecuación 17, sin comprometer la viabilidad del estudio.

4.2.4.4. Fuente emisora de radiación

Para la simulación de la fuente emisora de rayos X para cada linac, se obtuvieron los archivos de espacio fase descargados del repositorio de la IAEA (28).

En particular, se emplearon los siguientes archivos:

1. **ELEKTA_PRECISE_6mv_part1.header:** contiene información sobre el número total de historias y partículas generadas en el archivo de espacio fase.
2. **ELEKTA_PRECISE_6mv_part1.phsp:** incluye los detalles individuales de cada partícula simulada, tales como tipo, energía, posición, dirección y peso.

Los archivos utilizados corresponden a una simulación previa del cabezal de tratamiento de un acelerador lineal ELEKTA Precise de 6 MV, cuyas características son similares al modelo Infinity, con un total de 126,491,813 partículas simuladas.

En cada simulación se consideró el funcionamiento simultáneo de los tres linacs, y las direcciones de los haces fueron modificadas en seis configuraciones distintas, como se ilustra en la Figura 16. Para cada configuración angular, se realizaron tres corridas independientes, cada una con 2×10^8 historias simuladas, con el objetivo de obtener resultados estadísticamente robustos y evaluar el comportamiento del haz en condiciones clínicas representativas.

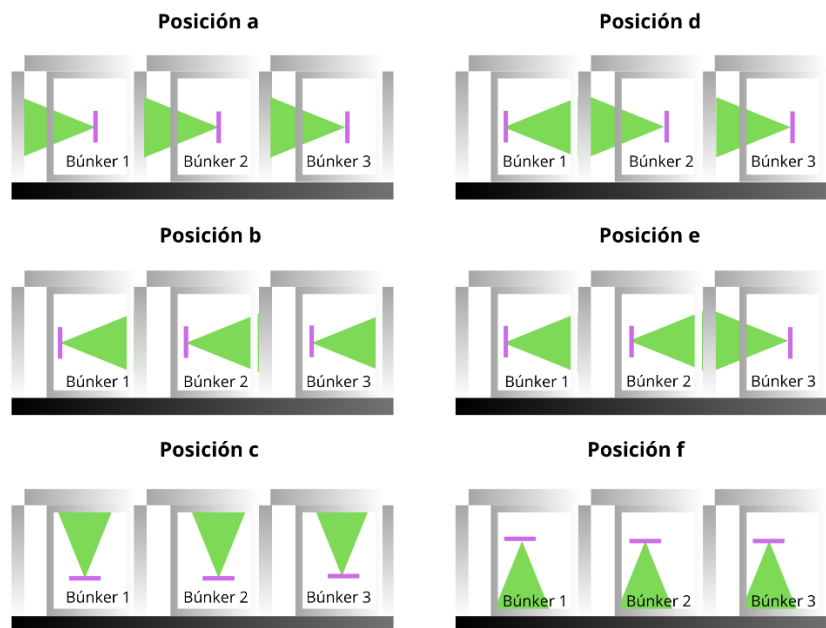


Figura 16. Posiciones de los gantry con el haz primario del linac en color verde. Vista en el plano Y-Z, donde X es la profundidad.

4.2.4.5. Física y colocación de detectores

Como se muestra en la Figura 15, se utilizó un componente genérico de maniquí en forma de cubo y de cilindro con material de agua como detector de volumen, representados en la simulación como un cubo rojo y cilindro azul. Estos detectores fueron implementados mediante el método de voxelización de la herramienta TOPAS, utilizando la función bin para definir un voxel de dimensiones $30 \times 30 \times 1 \text{ cm}^3$.

Los detectores fueron estratégicamente colocados en los puntos de interés P.A., ..., P.R. para la medición de dosis equivalente ambiental, específicamente a 30 cm de distancia de las barreras primarias y secundarias del blindaje, y a 50 cm del techo (2). En total, se configuraron 19 detectores, con el objetivo de registrar tanto la radiación primaria como la radiación dispersa proveniente de la fuente emisora de fotones con energía de 6 MV.

Para la conversión de los resultados de fluencia en dosis equivalente ambiental, se emplearon las funciones `FluenceToDoseConversionEnergies` y `FluenceToDoseConversionValues` disponibles en TOPAS (ver Ecuación 18). Los factores de conversión correspondientes a fotones de 6 MeV fueron descargados del repositorio oficial recomendado por la página de TOPAS (29), asegurando así la validez y precisión de los cálculos dosimétricos realizados.

4.3. Obtención de datos, gráficos y procesamiento de resultados

Los valores obtenidos mediante la SMC fueron extraídos de los archivos generados por el software Open TOPAS, en formato de hoja de cálculo, cada archivo fue identificado según el nombre asignado a cada detector. Dado que la SMC proporcionó los valores de dosis equivalente ambiental (DEA) por fotón, expresados en unidades de [mSv/fotón], fue necesario realizar una conversión para su análisis y comparación con los límites de TDEA establecidos por la normativa internacional. A partir de estos datos obtenidos en los detectores (D_{det}) como en el maniquí que representa al paciente (D_{pac}), ubicados en las posiciones mostradas en la Figura 15, se calculó la fracción de DEA en el detector por cada unidad entregada al maniquí, mediante la siguiente razón:

$$\frac{D_{det}}{D_{pac}} \quad (21)$$

Considerando la Ecuación 14 para el cálculo de la dosis equivalente semanal (Hs) y la dosis equivalente anual (Ha) de la Ecuación 15, bajo el supuesto de que un año laboral comprende 50 semanas, y que la carga de trabajo (W) es de 500 Gy/semana (utilizando el factor de ponderación para radiación gamma, donde 1 Gy = 1 Sv), y que T representa el factor de ocupación de cada área, ya sea controlada o no controlada, la Tasa de Dosis Equivalente Ambiental (TDEA) anual en el detector se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$TDEA_{anual} = \frac{D_{det}}{D_{pac}} * W * 50 * T = \left[\frac{Sv}{year} \right] \quad (22)$$

Después se comparó esta $TDEA_{anual}$ con el límite TDEA en caso de que no se cumpliera en alguno de los detectores, en la simulación se incrementó el espesor mediante la adición de capas decirreductoras a la barrera correspondiente hasta que se llegó al límite establecido de TDEA, cerrando así el ciclo de diseño, verificación y optimización del blindaje y asegurando la protección radiológica correcta.

Para ajustar el blindaje simulado en aquellas barreras donde los cálculos manuales de los espesores no cumplían con los límites establecidos, se determinó un factor de reducción utilizando la Ecuación 23, con el fin de alcanzar los niveles de protección requeridos. Posteriormente, el blindaje fue modificado incrementando los espesores en términos de capas hemirreductoras, conforme a lo establecido en la Ecuación 24.

$$Factor\ de\ reducción = \frac{Dosis_{inicial}}{Dosis_{final}} = \frac{31}{20} = 1.5 \quad (23)$$

$$2^n = 1.5 = 1HVL \quad (24)$$

La incertidumbre estadística asociada a los resultados se determinó con las Ecuaciones 16 y 17. Los valores promedio y las desviaciones estándar de las dosis equivalentes ambiental fueron obtenidos directamente del sistema de SMC, a partir de los archivos generados por TOPAS en formato de hoja de cálculo.

Para la visualización de los resultados, se utilizó la interfaz gráfica del sistema de simulación (OpenGL y Qt), la cual permitió generar representaciones en escala de colores de las geometrías tridimensionales simuladas, facilitando la interpretación de los niveles de radiación en las distintas barreras. Adicionalmente, se elaboraron gráficos de barras mediante hojas de cálculo para complementar el análisis cuantitativo de la TDEA.

Finalmente, se realizó una comparación entre los resultados en las distintas configuraciones simuladas, con el objetivo de evaluar la efectividad del blindaje propuesto y su conformidad con los criterios de seguridad radiológica establecidos por la normativa nacional e internacional vigente.

5. Resultados y discusión

Los resultados del cálculo manual, presentados en las Tablas 20, 21 y 22 correspondientes a cada búnker, se organizaron en tres columnas. La primera muestra los espesores actuales del blindaje en concreto dentro del hospital; la segunda indica los espesores adicionales requeridos en concreto, según lo determinado por el cálculo analítico; y la tercera presenta los espesores equivalentes calculados analíticamente en acero o plomo, según sean requeridos para cumplir con los límites de TDEA establecidos por la IAEA.

Debido a que se modificará la estructura de los bunkers existentes en el hospital, se tienen restricciones de espacio, por lo que se sugiere adicionar acero o plomo para que no se incremente significativamente el espesor de la pared, pero se asegure la protección radiológica requerida.

Tabla 20. Espesores de blindaje calculados de la Sala de teleterapia 1

Barreras	Sala de Teleterapia 1		
	Espesor Actual	Espesor adicional calculado	Equivalente en acero y plomo
	Pared I		
<i>Barrera primaria</i>	71 cm de concreto	65 cm de concreto	20 cm de acero (ancho 4.1 m)
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	42 cm de concreto	13 cm de acero
	Pared II		
<i>Barrera primaria</i>	71 cm de concreto	38.6 cm de concreto	12 cm de acero (ancho 3.7 m)
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	16.4 cm de concreto	5 cm de acero
	Pared III		
<i>Barrera secundaria</i>	76 cm de concreto	29.6 cm de concreto	9 cm de acero
	Pared IV		
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	No se requiere	No se requiere
	Pared V (Techo)		
<i>Barrera primaria</i>	55 cm de concreto	114 cm de concreto	20 cm de plomo (ancho 3.3 m)
<i>Barrera secundaria</i>	55 cm de concreto	84 cm de concreto	14 cm de plomo
	Pared VI		
<i>Puerta</i>	N/A	90 cm de concreto	17 cm de plomo
	Pared VII		
<i>Piso</i>	No se requiere		

Tabla 21. Espesores de blindaje calculados de la Sala de teleterapia 2.

Barreras	Sala de Teleterapia 2		
	Espesor Actual	Espesor adicional calculado	Equivalente en acero y plomo
	Pared I		
<i>Barrera primaria</i>	71 cm de concreto	15.8 cm de concreto	5 cm de acero (ancho 4.4 m)
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	3.4 cm de concreto	1 cm de acero
	Pared II		
<i>Barrera primaria</i>	71 cm de concreto	32 cm de concreto	10 cm de acero (ancho 3.7 m)
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	16.4 cm de concreto	5 cm de acero
	Pared III		
<i>Barrera secundaria</i>	76 cm de concreto	No se requiere	No se requiere
	Pared IV		
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	14.16 cm de concreto	5 cm de acero
	Pared V (Techo)		
<i>Barrera primaria</i>	55 cm de concreto	114 cm de concreto	20 cm de plomo (ancho 3.3 m)
<i>Barrera secundaria</i>	55 cm de concreto	53.64 cm de concreto	10 cm de plomo
	Pared VI		
<i>Puerta</i>	N/A	90 cm de concreto	17 cm de plomo
	Pared VII		
<i>Piso</i>		No se requiere	

Tabla 22. Espesores de blindaje calculados de la Sala de teleterapia 3.

Barreras	Sala de Teleterapia 3		
	Espesor Actual	Espesor adicional calculado	Equivalente en acero y plomo
	Pared I		
<i>Barrera primaria</i>	71 cm de concreto	32 cm de concreto	10 cm de acero (ancho 4.3 m)
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	16.4 cm de concreto	5 cm de acero
	Pared II		
<i>Barrera primaria</i>	138 cm de concreto	No se requiere	No se requiere
<i>Barrera secundaria</i>	139 cm de concreto	No se requiere	No se requiere
	Pared III		
<i>Barrera secundaria</i>	76 cm de concreto	No se requiere	No se requiere
	Pared IV		
<i>Barrera secundaria</i>	71 cm de concreto	No se requiere	No se requiere
	Pared V (Techo)		
<i>Barrera primaria</i>	55 cm de concreto	114 cm de concreto	20 cm de plomo (ancho 3.3 m)
<i>Barrera secundaria</i>	55 cm de concreto	84 cm de concreto	14 cm de plomo
	Pared VI		
<i>Puerta</i>	N/A	90 cm de concreto	17 cm de plomo
	Pared VII		
<i>Piso</i>	No se requiere		

La SMC permitió modelar la geometría tridimensional de los búnkers lindantes conforme a la Figura 15. En primer lugar, se representó el espesor actual del blindaje; posteriormente, el espesor obtenido a partir de los cálculos manuales (ver Tablas 20, 21 y 22); y finalmente, el blindaje propuesto.

Como se observa en la Figura 17, cada bunker se modeló con techo, paredes, puerta y pisos. Además, se observan algunos de los detectores que se colocaron en los puntos de interés P.A. hasta P.R.

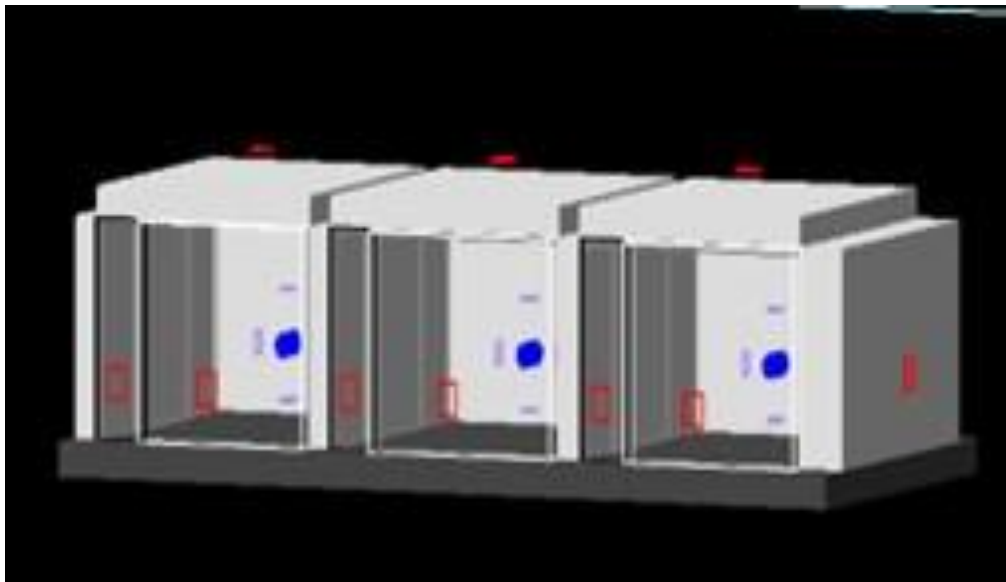


Figura 17. Geometría tridimensional de los 3 búnkers lindantes simulada para barreras primarias.

Los resultados de la simulación de los espesores actualmente instalados en el CMN SXXI, presentados en la Figura 18, muestran que los puntos de interés en las barreras primarias ubicados en los niveles superiores, pasillo y en la sala de teleterapia 4, no cumplen con los límites de TDEA establecidos por las normas internacionales de 20 mSv/año para POE y 1 mSv/año para público.

En este contexto, se hace evidente que el blindaje actual de los bunkers es insuficiente frente a las exigencias operativas modernas, como el uso de

técnicas IMRT, por ello, se debe modificar el blindaje, con especial atención a las barreras primarias.

Tasa de Dosis Equivalente Ambiental de barreras primarias y secundarias

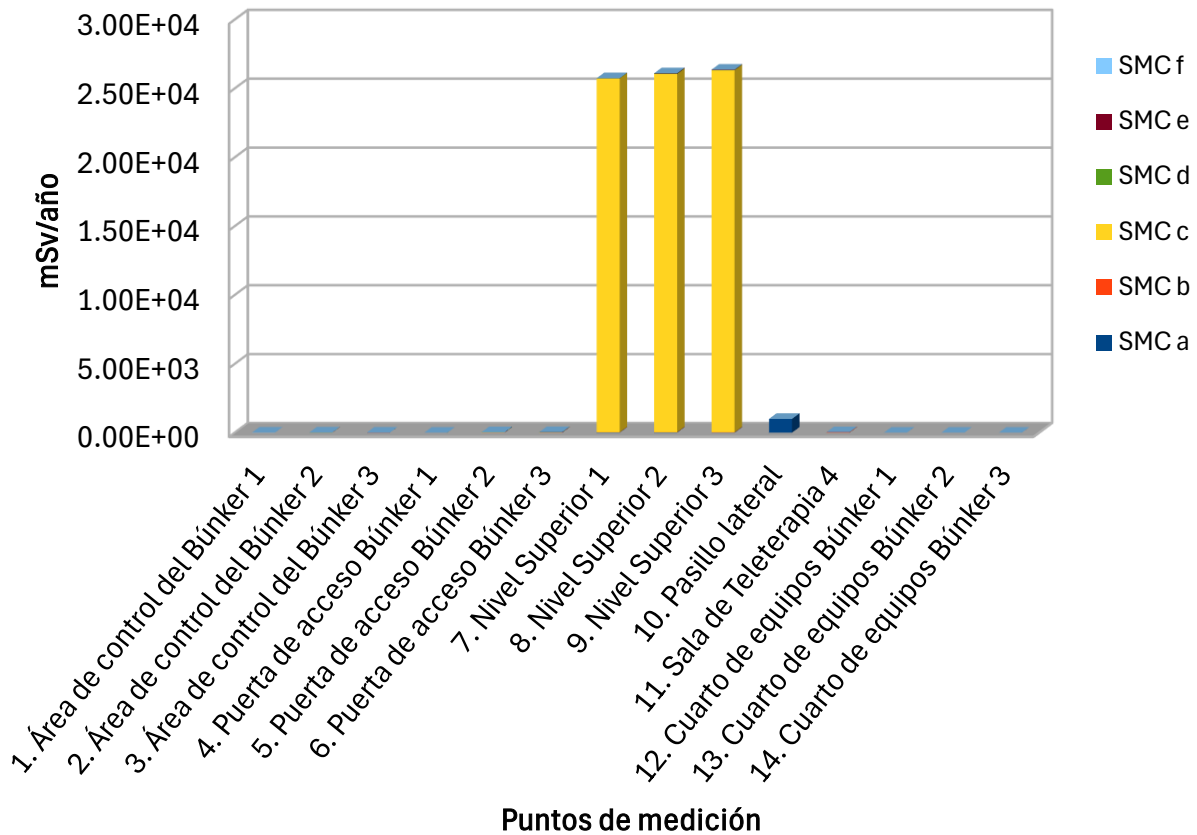


Figura 18. TDEA obtenida de la SMC de los espesores actuales de barreras primarias y secundarias sin remodelar. Cada zona incluye 6 barras y cada color representa la posición de los haces mostrada en la Figura 16.

Simulando los espesores calculados manualmente, presentados en las Tablas 20, 21 y 22, los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 19 y 20, donde se observa que las barreras secundarias cumplen con los límites de TDEA

normativos establecidos. Incluso se evidencia que dichos espesores están sobre-estimados, ya que los espesores actuales cumplen con la protección radiológica establecida. Mientras que una de las barreras primarias específicamente la pared II del bunker 3 (ver Figura 13), la cual colinda con la Sala de Teleterapia 4, requiere un incremento en su espesor para cumplir con la normativa nacional e internacional.

Tasa de Dosis Equivalente Ambiental de las barreras secundarias

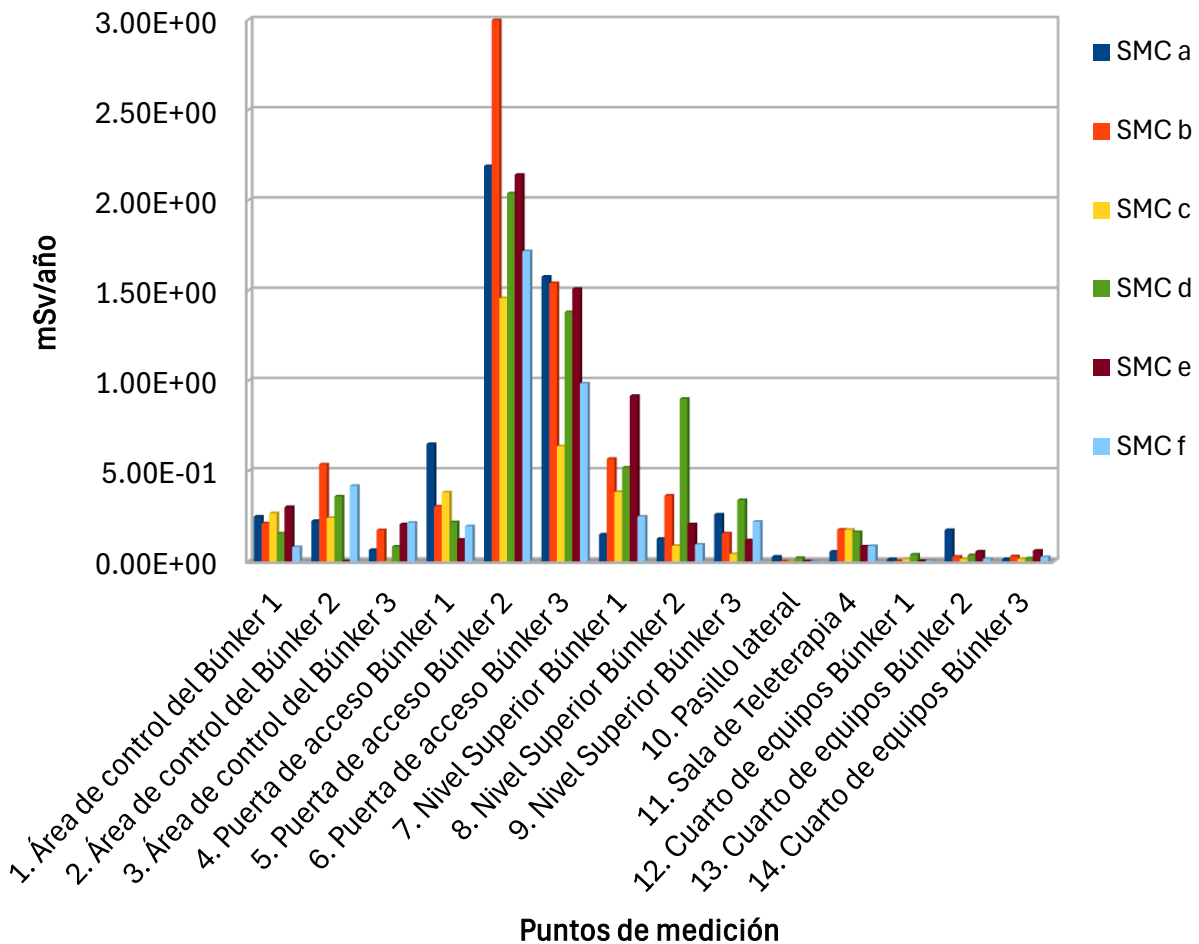


Figura 19. TDEA de la SMC de los espesores calculados en la memoria analítica de las barreras secundarias

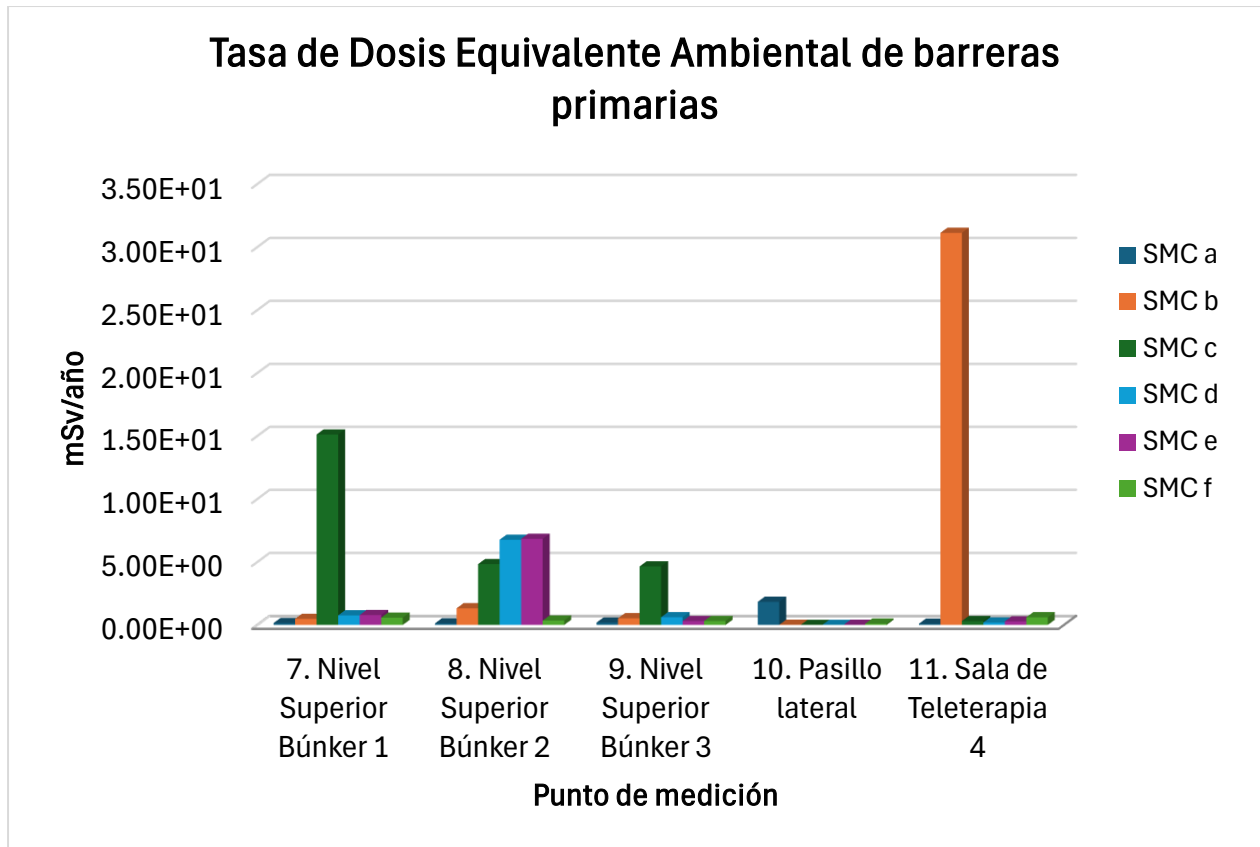


Figura 20. TDEA resultante de la SMC usando los espesores calculados en la memoria analítica (manuales) en las barreras primarias.

La optimización del blindaje de los tres búnkers adyacentes se propone a partir de una integración de tres enfoques como se observa en la Tabla 23: los resultados simulados de los espesores actuales, los resultados simulados de los cálculos manuales según metodologías estándar, y los ajustes realizados para optimizar la protección en base a los resultados anteriores simulados.

Este diseño considera el escenario más exigente: la operación simultánea de los tres equipos de teleterapia, con rotaciones del gantry orientadas hacia paredes comunes.

Tabla 23. Espesores propuestos para la optimización del blindaje de los 3 bunkers lindantes.

Espesores propuestos para las Salas de Teleterapia búnker 1, búnker 2 y búnker 3

PARED I
Se modifican conforme a los cálculos manuales
PARED II
Se aumenta el espesor del búnker 3
PARED III
Se mantienen los espesores actuales
PARED IV
Se mantienen los espesores actuales
PARED V (TECHO)
Se modifican conforme a los cálculos manuales
PARED VI (PUERTAS)
Se modifican conforme a los cálculos manuales

Como se aprecia en la Figura 21 conforme a la Tabla 23, al mantener los espesores actuales en las barreras secundarias, modificar las barreras primarias conforme a los cálculos manuales y al incrementar en la SMC una capa hemirreductora (HVL) al espesor calculado manualmente de la barrera primaria de la pared II del búnker 3, finalmente se obtiene una TDEA que se ajusta a los niveles permitidos en las normas internacionales.

Tasa de Dosis Equivalente Ambiental de barreras primarias

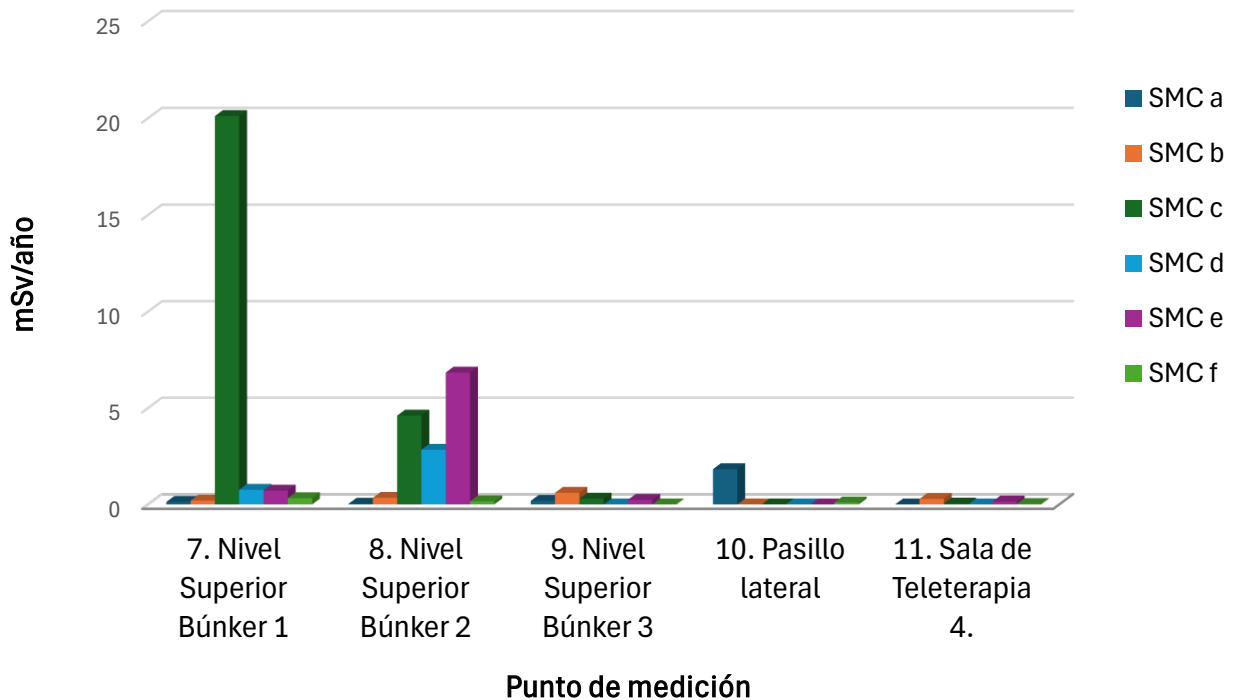


Figura 21. TDEA de la SMC de los espesores modificados de la pared II del búnker 3.

Con lo anterior, ahora se tienen los espesores adecuados en cada una de las barreras primarias y secundarias que garantizan una protección radiológica que cumple con las normas internacionales.

Además de las gráficas que muestran los resultados de las TDEA obtenidas en los puntos de interés, se generaron los diagramas con escala de colores, las cuales se ilustran en las Figuras 22 y 23 para visualizar de manera cualitativa los niveles de radiación en las barreras primarias y secundarias. Estos diagramas facilitan la evaluación visual del comportamiento de la radiación en la geometría modelada de las barreras de los búnkers adyacentes con el funcionamiento simultáneo de las tres fuentes de radiación. Los esquemas de los niveles de radiación evidencian que las paredes que actúan como barreras

primarias presentan niveles de radiación significativamente más altos, representados en color rojo, en contraste con las barreras secundarias, que muestran niveles más bajos, indicados en azul.

Asimismo, se observa que la operación simultánea de las tres fuentes de radiación incrementa notablemente la exposición en todas las barreras, especialmente en las paredes compartidas entre búnkers, donde la superposición de haces, influenciada por la posición angular del gantry, puede generar zonas críticas de irradiación.

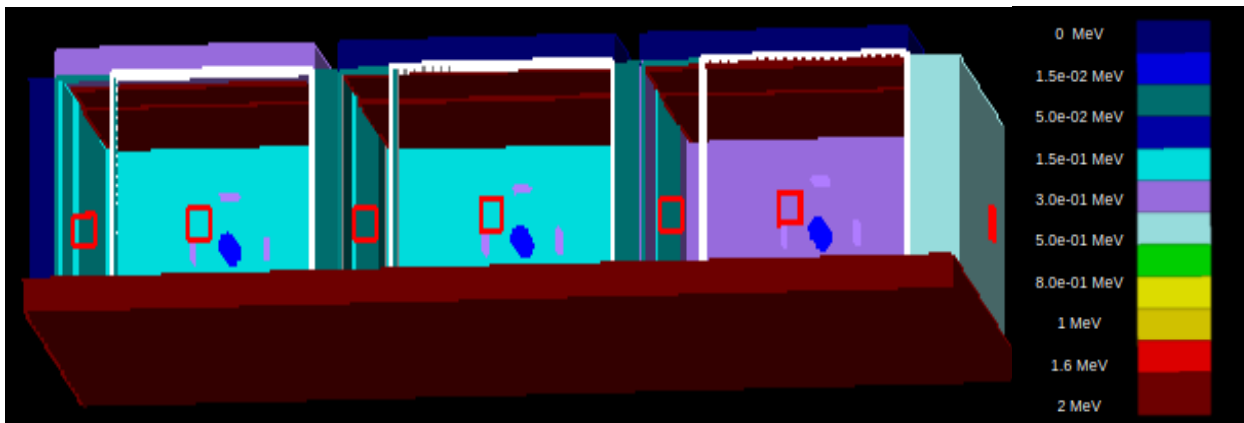


Figura 22. Niveles de radiación en escala de colores de los tres búnkers lindantes en la posición c.

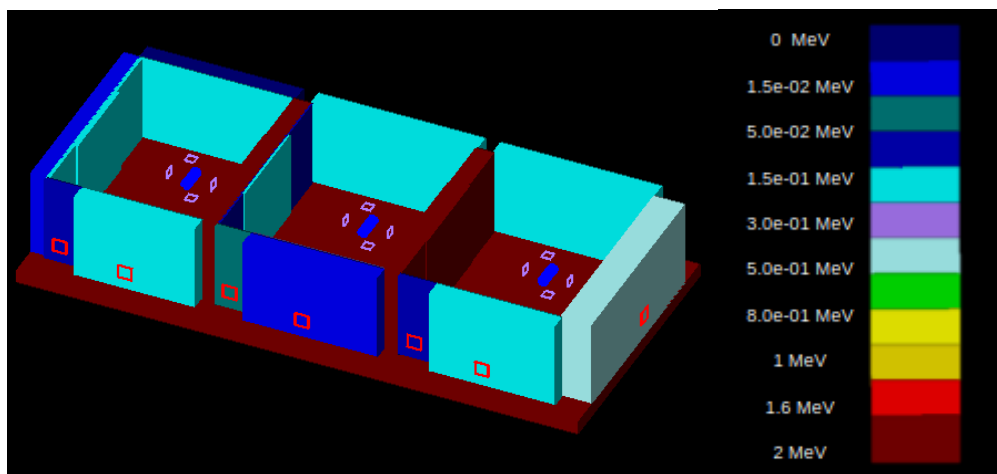


Figura 23. Niveles de radiación de los tres búnkers lindantes simulados en la posición e.

En cuanto al análisis estadístico de las SMC, el error estadístico (EE) reportado en las Tablas 24 y 25 indican una incertidumbre promedio del 53% con 2×10^8 historias. Por lo que se incrementó el número de historias a 3×10^8 con un tiempo de cómputo mayor a una semana para una corrida, pero la incertidumbre no disminuyó significativamente. Debido al número de simulaciones requeridas en este trabajo se optó por realizar 2×10^8 historias.

Estos resultados también pueden atribuirse a la ubicación de los detectores en zonas con baja probabilidad de interacción, como detrás de barreras o lejos del haz primario. Lo anterior implica que los detectores reciben muy pocas partículas, lo que no es suficiente para una buena estadística local.

Tabla 24. Resultados del cálculo del Error Estadístico en las SMC en las posiciones de gantry a,b y c.

PUNTOS DE MEDICIÓN	POSICIÓN A DEL GANTRY			POSICIÓN B DEL GANTRY			POSICIÓN C DEL GANTRY		
	DE	F	EE	DE	F	EE	DE	F	EE
1. ÁREA DE CONTROL DEL BÚNKER 1	3.76E-25	5.66E-25	0.6651	2.23E-25	3.93E-25	0.5688	2.14E-25	2.71E-25	0.7914
2. ÁREA DE CONTROL DEL BÚNKER 2	3.21E-25	4.23E-25	0.7586	2.11E-25	3.66E-25	0.5777	5.33E-25	5.84E-25	0.9132
3. ÁREA DE CONTROL DEL BÚNKER 3	1.62E-25	2.3E-25	0.7113	1.14E-25	1.94E-25	0.5882	4.31E-25	5.50E-25	0.7843
4. PUERTA DE ACCESO BÚNKER 1	1.33E-24	5.28E-24	0.2522	5.94E-25	1.85E-24	0.3206	1.07E-24	3.10E-24	0.3454
5. PUERTA DE ACCESO BÚNKER 2	2.19E-24	1.78E-23	0.1230	3.55E-24	2.30E-23	0.1543	1.81E-24	1.28E-23	0.1418
6. PUERTA DE ACCESO BÚNKER 3	1.95E-24	1.31E-23	0.1493	1.60E-24	8.16E-24	0.1958	1.47E-24	6.44E-24	0.2280
7. NIVEL SUPERIOR BÚNKER 1	1.12E-25	1.46E-25	0.7683	3.22E-25	4.85E-25	0.6637	2.87E-24	1.54E-23	0.1872
8. NIVEL SUPERIOR BÚNKER 2	1.30E-25	1.30E-25	1.0000	6.01E-25	1.34E-24	0.4482	1.65E-24	4.90E-24	0.3367
9. NIVEL SUPERIOR BÚNKER 3	1.88E-25	1.9E-25	1.0000	3.59E-25	5.40E-25	0.6652	1.70E-24	4.72E-24	0.3596
10. PASILLO LATERAL	2.34E-24	9.3E-24	0.2512	6.82E-26	6.82E-26	1.0000	0.0E+00	0.0E+00	0.0000
11. SALA DE TELETERAPIA 4.	1.36E-25	1.9E-25	0.7103	6.26E-24	6.32E-23	0.0991	3.34E-25	6.11E-25	0.5476
12. CUARTO DE EQUIPOS BÚNKER 1	1.68E-24	1.7E-24	0.9740	4.95E-25	6.66E-25	0.7425	2.79E-25	3.21E-25	0.8682
13. CUARTO DE EQUIPOS BÚNKER 2	3.37E-24	3.52E-24	0.9563	2.92E-25	5.30E-25	0.5511	1.51E-25	2.89E-25	0.5226
14. CUARTO DE EQUIPOS BÚNKER 3	2.61E-25	5.8E-25	0.4471	2.76E-25	5.78E-25	0.4774	2.89E-25	6.15E-25	0.4700

Tabla 25. Resultados del cálculo del Error Estadístico en las SMC en las posiciones de gantry d, e y f.

PUNTOS DE MEDICIÓN	POSICIÓN A DEL GANTRY			POSICIÓN B DEL GANTRY			POSICIÓN C DEL GANTRY		
	DE	F	EE	DE	F	EE	DE	F	EE
1. ÁREA DE CONTROL DEL BÚNKER 1	3.76E-25	5.66E-25	0.6651	2.23E-25	3.93E-25	0.5688	2.14E-25	2.71E-25	0.7914
2. ÁREA DE CONTROL DEL BÚNKER 2	3.21E-25	4.23E-25	0.7586	2.11E-25	3.66E-25	0.5777	5.33E-25	5.84E-25	0.9132
3. ÁREA DE CONTROL DEL BÚNKER 3	1.62E-25	2.3E-25	0.7113	1.14E-25	1.94E-25	0.5882	4.31E-25	5.50E-25	0.7843
4. PUERTA DE ACCESO BÚNKER 1	1.33E-24	5.28E-24	0.2522	5.94E-25	1.85E-24	0.3206	1.07E-24	3.10E-24	0.3454
5. PUERTA DE ACCESO BÚNKER 2	2.19E-24	1.78E-23	0.1230	3.55E-24	2.30E-23	0.1543	1.81E-24	1.28E-23	0.1418
6. PUERTA DE ACCESO BÚNKER 3	1.95E-24	1.31E-23	0.1493	1.60E-24	8.16E-24	0.1958	1.47E-24	6.44E-24	0.2280
7. NIVEL SUPERIOR BÚNKER 1	1.12E-25	1.46E-25	0.7683	3.22E-25	4.85E-25	0.6637	2.87E-24	1.54E-23	0.1872
8. NIVEL SUPERIOR BÚNKER 2	1.30E-25	1.30E-25	1.0000	6.01E-25	1.34E-24	0.4482	1.65E-24	4.90E-24	0.3367
9. NIVEL SUPERIOR BÚNKER 3	1.88E-25	1.9E-25	1.0000	3.59E-25	5.40E-25	0.6652	1.70E-24	4.72E-24	0.3596
10. PASILLO LATERAL	2.34E-24	9.3E-24	0.2512	6.82E-26	6.82E-26	1.0000	0.0E+00	0.0E+00	0.0000
11. SALA DE TELETERAPIA 4.	1.36E-25	1.9E-25	0.7103	6.26E-24	6.32E-23	0.0991	3.34E-25	6.11E-25	0.5476
12. CUARTO DE EQUIPOS BÚNKER 1	1.68E-24	1.7E-24	0.9740	4.95E-25	6.66E-25	0.7425	2.79E-25	3.21E-25	0.8682
13. CUARTO DE EQUIPOS BÚNKER 2	3.37E-24	3.52E-24	0.9563	2.92E-25	5.30E-25	0.5511	1.51E-25	2.89E-25	0.5226
14. CUARTO DE EQUIPOS BÚNKER 3	2.61E-25	5.8E-25	0.4471	2.76E-25	5.78E-25	0.4774	2.89E-25	6.15E-25	0.4700

Es importante mencionar que en situaciones donde no es posible incrementar el espesor del blindaje por limitaciones estructurales o presupuestarias, se deben aplicar estrategias complementarias que garanticen la protección radiológica. Bajo el principio ALARA, se recomienda aumentar la distancia entre las fuentes de radiación y las áreas ocupadas, aprovechando la ley del inverso del cuadrado. Reubicar zonas de trabajo o espera puede ser una solución efectiva y económica. También se sugiere el uso de barreras móviles o blindajes locales, como paneles de plomo o acero, en puntos críticos donde se haya identificado una posible sobreexposición. Estas medidas permiten mantener la seguridad sin necesidad de realizar una remodelación estructural completa.

6. Conclusiones

Los resultados indican que los espesores de las barreras secundarias en la estructura existente del hospital, correspondientes a los tres búnkers lindantes de Teleterapia que operarán simultáneamente con equipos de 6 MV, no requieren modificaciones para garantizar una protección radiológica adecuada en las áreas controladas y no controladas.

Por otro lado, los espesores de las barreras primarias deben ser incrementados según lo establecido en la memoria analítica, con excepción de la pared II del búnker 3. En este caso, al espesor de blindaje calculado manualmente se le debe añadir al menos un valor adicional de HVL (Half-Value Layer) de concreto, o su equivalente en otro material, con el fin de cumplir con los niveles de protección radiológica establecidos por las normas nacionales e internacionales.

7. Trabajo futuro

Para fortalecer y ampliar el alcance de este estudio, se propone como línea futura de investigación el incremento en el número de historias simuladas en los modelos Monte Carlo, lo cual permitiría obtener resultados con mayor precisión estadística y reducir la incertidumbre en los niveles de dosis equivalente ambiental estimados. Asimismo, se sugiere implementar simulaciones utilizando haces de diferentes energías, lo que permitiría evaluar la efectividad del blindaje frente a una gama más amplia de condiciones clínicas y tecnológicas.

Adicionalmente, se plantea la realización de un levantamiento de niveles de radiación utilizando los equipos instalados en las salas de tratamiento, con el

fin de comparar y verificar experimentalmente los resultados obtenidos mediante simulaciones y cálculos manuales. Esta validación empírica fortalecería la confiabilidad del estudio y permitiría identificar posibles discrepancias entre los modelos teóricos y las condiciones reales de operación.

Estas mejoras no solo enriquecerían el análisis técnico, sino que también posicionarían a las simulaciones Monte Carlo como una herramienta robusta y confiable para la verificación de blindajes en instalaciones de radioterapia. En este sentido, se plantea que, en el futuro, este enfoque pueda integrarse como parte del proceso estándar de diseño, validación y auditoría de sistemas de protección radiológica, complementando los métodos analíticos tradicionales y asegurando el cumplimiento normativo con mayor rigor.

8. Referencias bibliográficas

1. Reynoso Noverón N, Torres Domínguez JA. Epidemiology of cancer in México: global burden and projections 2000-2020. *Latinoam Med Conductual* [Internet]. 2017 [citado el 7 de julio de 2024] Disponible en: www.r-proyect.org
2. Paredes Gutiérrez L, Genis Sánchez R, Salazar Berzunza MA. Determinación de niveles de radiación por neutrones en un acelerador para Radioterapia. En Congreso Nacional de Física Médica; 2018; México.
3. Deye James A, Rodgers James E, Wu Raymond K. NCRP Report No. 151. Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X and Gamma Ray Radiotherapy Facilities [Internet]. Bethesda (MD): National Council on Radiation Protection and Measurements; 2005 [citado el 8 de jul de 2024]. Disponible en: https://www.severin.su/wp-content/uploads/2020/01/ncrp_151_structural_shielding.pdf
4. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SSA3-2017, Para la organización y funcionamiento de los servicios de radioterapia. Diario Oficial de la Federación; 2017.
5. Norma Oficial Mexicana NOM-229-SSA1-2002. Salud ambiental. Diario Oficial de la Federación; 2002.
6. Secretaría de Salud. Reglamento general de seguridad radiológica. Diario Oficial De La Federación; 1988.
7. Arias CF. La regulación de la protección radiológica y la función de las autoridades de salud. *Rev Panam Salud Pública*. 2006;20(3):188-97.

8. Perl J, Shin J, Schümann J, Faddegon B, Paganetti H. TOPAS: An innovative proton Monte Carlo platform for research and clinical applications. *Med Phys.* 2012;39(11):6818–37.
9. Sociedad Española de Protección Radiológica., editor. Publicación 103 ICRP. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. Madrid: Senda Editorial S.A.; 2007. Vol. 60
10. Comité Nacional de Mediciones y Protección Radiológica (EE. UU.). Informe NCRP. Bethesda (MD); 1990.
11. Zubeldía Francisco, Álvarez Guillermo. Evaluación del Reporte NCRP 151- Cálculos de blindajes para salas de tratamiento de alta energía. [Argentina]: Instituto Balseiro; 2016.
12. Juste Vidal Belén Jeanne. Aplicación del método Monte Carlo a la planificación en radioterapia y a la reconstrucción de espectros de fotones de aceleradores lineales de partículas (LinAc) [Internet]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia; 2011. [citado el 9 de sep de 2025] Disponible en: www.editorial.upv.es
13. Pichardo Cadena Judith. Diseño por Monte Carlo de una sala alternativa para Radioterapia. Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México ; 2016.
14. Lindahl J. Designing radiation protection for a linear accelerator using Monte Carlo-simulations. [Sweden]: Umeå University ; 2019.
15. Faddegon B, Ramos Mendez J, Schuemann J, McNamara A, Shin J, Perl J, et al. TOPAS [Internet]. 2024 [citado el 2 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://topas.readthedocs.io/en/latest/parameters/defaults.html>

16. Yu Y, Chen Z. Dose calculation of proton therapy based on Monte Carlo and empirical formula. *Radiat Prot Dosimetry* [Internet]. 2023 [citado el 22 de noviembre de 2024];199(2):124–33. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/366091211>
17. Attix FH. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. Wiley-VCH; 2004. 607 p.
18. González Aguilar Fernando de Jesús. *Protocolo para el cálculo de blindajes de una instalación radiactiva para teleterapia*. Querétaro: Centro Universitario Querétaro; 2023.
19. Gibbons John. *Khan's The Physics of Radiation Therapy*. 6th ed. Wolters Kluwer Health; 2020.
20. *Instrumentación y Equipamiento en Medicina Nuclear y Radioterapia. aceleradores lineales de electrones* [Internet]. 2024 [citado el 4 de julio de 2024]. Disponible en: <https://medicinayradioterapia.blogspot.com/2016/06/aceleradores-lineales-de-electrones-no.html>
21. Clarke R H, Dunster J, Chilton H, Guskova K, London A, Moscow W, et al. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. The International Commission on Radiological Protection. 1990;21.
22. Clement CH, Petoussi-Henss N, Bolch WE, Eckerman KF, Endo A, Hertel N, et al. *Annals of the ICRP Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*. ICRP. 2010;40(1-2).
23. Rodgers JE. Radiation therapy vault shielding calculational methods when IMRT and TBI procedures contribute. *J Appl Clin Med Phys*. Jul;2001;2(3):157.

24. Bielajew AF. Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport. Ann(MI):The University of Michigan; 2020.
25. Geant4 Collaboration. Geant4 Material Database [Internet]. Disponible en: https://geant4.web.cern.ch/documentation/dev/bfad_html/ForApplicationDevelopers/Appendix/materialNames.html;
26. Mercado-Quintero A V., Torres-García E, Isaac-Olivé K, Torres-García R, Aranda-Lara L, Torres-Velázquez H. Novel photopeak-independent correction method for internal activity calculation of ^{99m}Tc: a simulation study. Radiat Prot Dosimetry. 2025 Feb 1;201(2):105–12.
27. Geant4 Collaboration. Book for Application Developers. Disponible en: <https://geant4.web.cern.ch/documentation>
28. International Atomic Energy Agency (IAEA). (Phase-space database for external beam radiotherapy [Internet]. Vienna: IAEA. Disponible en: <https://www.iaea.org/resources/databases/phase-space>
29. Pelliccioni M. Overview of fluence to effective dose and fluence to ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code. Radiat Prot Dosimetry [Internet]. 2000;88(4):279–97. Disponible en: <http://rpd.oxfordjournals.org/>