

Pontificia Universidad Javeriana  
Maestría en Física Médica

Trabajo de Grado revisado y aprobado por:

Tutor

Wilmar Rodríguez, Dsc Wilmar Rodríguez H.

Jurados

Esperanza Castellanos, Ph.D Esperanza

Paola Caprile, PhD Paola Caprile

Mauricio Arciniegas

Mauricio Arciniegas, M.Sc Mauricio Arciniegas

Fecha de aprobación: 3 de agosto de 2021

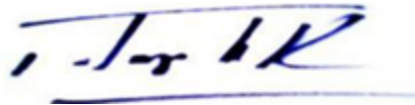
SIMULACIÓN EN GEANT4 PARA EL CÁLCULO DE BLINDAJES EN INSTALACIONES DE RADIOTERAPIA CON  
ACELERADORES DE MENOS DE 10 MV

Luis Daniel Cano Hincapié



---

Jhon Jairo Sutachan Rubio, Ph.D  
Director de Posgrados  
Facultad de Ciencias



---

Alba Alicia Trespalacios Rangel, Ph.D  
Decana  
Facultad de Ciencias

Bogotá, agosto de 2021



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Colombia

# **Simulación en Geant4 para el cálculo de blindajes en instalaciones de radioterapia con aceleradores de menos de 10 MV**

**Luis Daniel Cano Hincapié**

Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Ciencias, Departamento de Física  
Bogotá, Colombia  
Año 2021



# **Simulación en Geant4 para el cálculo de blindajes en instalaciones de radioterapia con aceleradores de menos de 10 MV**

**Luis Daniel Cano Hincapié**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Física Médica**

Director:  
Wilmar Rodríguez Herrera, MSc., Dr. Sc.

Línea de investigación:  
Protección radiológica  
Grupo de Investigación:  
Grupo de Física Médica

Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Ciencias, Departamento de Física  
Bogotá, Colombia  
Año 2021



# Dedicatoria

A mis padres quienes con su apoyo incondicional me permitieron crecer y desarrollarme libremente. A mi pareja por su paciencia y apoyo durante mis estudios, su inteligencia y sentido crítico me motivaron a ser más.

La búsqueda por el significado:

“No es el sexo lo que nos brinda significado, no es el poder lo que nos brinda significado. El sufriendo sufrimiento es lo que le da sentido a la vida”

Viktor Frankl

# Agradecimientos

Agradezco a mi asesor, gracias a su apoyo constante y enseñanzas, la experiencia de hacer este trabajo de grado fue única y satisfactoria. Agradezco a la Universidad Javeriana y en particular a todos los involucrados en creación, mantenimiento y enseñanza de la Física Médica, la experiencia que brinda la universidad y el programa a los estudiantes es de la mejor calidad posible. Finalmente agradezco a los profesores de prácticas académicas y en particular al profesor Marin por brindarnos una perspectiva diferente de la vida, por motivarnos a ser más y observar el mundo con los ojos de un niño.



# Resumen

En el presente trabajo se buscó validar el uso de Geant4 para simular la transmisión y atenuación de la radiación y comparar los resultados de simulaciones con la metodología de cálculo de barreras propuesta por los reportes actuales para una instalación de radioterapia de menos de 10MV. De acuerdo a lo obtenido en los experimentos del  $^{54}\text{Mn}$  en Geant4 se concluye que esta es una herramienta confiable para simular la atenuación de radiación ionizante. Los resultados de la simulación del concreto con los grosores de TVL deportados en la literatura incluyen el factor de reducción esperado. Los resultados de la simulación del bunker indican limitaciones en la capacidad de predicción de los cálculos teóricos propuestos por el NCRP al elegir un haz de tamaño de 10 cm x 10 cm y una sobre-estimación del grosor de barrera para los objetivos de diseño.



# Contenido

<b>Dedicatoria</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Contenido</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>VI</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>VII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Simulaciones de Montecarlo . . . . .	3
2.1.1. Ejemplo con dado . . . . .	3
2.2. Procesos físicos . . . . .	5
2.2.1. Efecto Compton . . . . .	7
2.2.2. Efecto fotoeléctrico . . . . .	8
2.2.3. Producción de pares . . . . .	9
2.3. Funcionamiento de Geant4 . . . . .	10
2.3.1. Corridas, eventos y pasos . . . . .	10
2.3.2. Elemento . . . . .	10
2.3.3. Material . . . . .	10
2.3.4. Sólido . . . . .	11
2.3.5. Volumen lógico . . . . .	11
2.3.6. Localización . . . . .	11
2.4. Cálculos analíticos . . . . .	11
2.4.1. Principales parámetros utilizados en el cálculo de blindajes . . . . .	13
2.5. Concreto . . . . .	15
2.6. Maniquí objetivo . . . . .	16
2.7. Esfera ICRU . . . . .	16

<b>3. Estado del arte</b>	<b>19</b>
3.1. Metodología de cálculo de blindajes . . . . .	20
3.2. Metodología de Montecarlo . . . . .	22
<b>4. Metodología</b>	<b>23</b>
4.1. Validación de Geant4: HVL, QVL y TVL del plomo . . . . .	23
4.1.1. Fuente de partículas puntual . . . . .	23
4.1.2. Diseño del experimento . . . . .	24
4.1.3. Valores de HVL, QVL y TVL reportados en literatura . . . . .	27
4.1.4. Simulación para comprobar el HVL . . . . .	27
4.1.5. Simulación para comprobar el QVL . . . . .	27
4.1.6. Simulación para comprobar el TVL . . . . .	28
4.2. Comparación con el NCRP: TVL del concreto . . . . .	28
4.2.1. Diseño del experimento . . . . .	29
4.2.2. Fuente cónica . . . . .	30
4.2.3. Simulación para comprobar el TVL para 4MV . . . . .	32
4.2.4. Simulación para comprobar el TVL para 6 MV . . . . .	32
4.3. Simulación del búnker . . . . .	33
4.3.1. Fuente plana cuadrada . . . . .	34
4.3.2. Construcción del maniquí . . . . .	35
4.3.3. Simulación para calibración de la fuente . . . . .	36
4.3.4. Simulación para comprobación de objetivo de diseño en barrera primaria . . . . .	38
4.3.5. Simulación para simular la radiación de fuga . . . . .	40
<b>5. Resultados y análisis de experimentos</b>	<b>42</b>
5.1. Resultados del experimento computacional para comprobar el HVL del Pb . . . . .	42
5.2. Resultados del experimento computacional para comprobar el QVL del Pb . . . . .	42
5.3. Resultados del experimento computacional para comprobar el TVL del Pb . . . . .	43
5.4. Discusión sobre la validación de Geant4: HVL, QVL y TVL del Pb . . . . .	43
5.5. Resultados del experimento computacional para comprobar el TVL para 4MV . . . . .	43
5.6. Resultados del experimento computacional para comprobar el TVL para 6 MV . . . . .	44
5.7. Discusión sobre el TVL del concreto y el NCRP . . . . .	44
5.8. Resultados de la calibración del haz . . . . .	45
5.9. Resultados de la simulación del bunker . . . . .	45
5.10. Discusión sobre la simulación del bunker . . . . .	46
<b>6. Conclusiones y perspectivas</b>	<b>47</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>49</b>

# Lista de figuras

2.1.	Dado pesado. La sombra roja indica una mayor densidad . . . . .	3
2.2.	Función densidad de probabilidad para cada cara en un dado cargado. . . .	4
2.3.	Función acumulativa para cada cara en un dado cargado . . . . .	4
2.4.	Discontinuidad de una función acumulada de una función de probabilidad discreta . . . . .	5
2.5.	Densidad de probabilidad obtenida en función del número de lanzamientos. Las líneas representan la frecuencia relativa obtenida para cada cara, los puntos representan la función de densidad de probabilidad verdadera de la cara	6
2.6.	Coefficientes de absorción para diversos tipos de interacción física para el aluminio. Datos tomados de la base de datos del NIST . . . . .	7
2.7.	Probabilidad de que un fotón se disperse a un ángulo $\theta$ eq. 2.8. . . . .	9
2.8.	Dimensiones del fantoma MIRD [14] . . . . .	17
4.1.	Esquema decaimiento $^{54}\text{Mn}$ . . . . .	24
4.2.	Experimento $^{54}\text{Mn}$ . . . . .	25
4.3.	Espectro de entrada usado para simulación en Geant4 de histograma de un acelerador de 4MV [36] . . . . .	30
4.4.	Espectro de entrada usado para simulación en Geant4 de histograma de un acelerador de 6MV [36] . . . . .	31
4.5.	Experimento concreto a. Disposición experimento b. Rayos del haz disperso en verde, pared en azul y detector cúbico color violeta . . . . .	32
4.6.	Fantoma del torso de un adulto ubicado en el sistema coordenado de la simulación . . . . .	36
4.7.	Experimento para la calibración del eje Z. a. Haz apagado. b. Haz encendido	37
4.8.	Experimento para la calibración del eje Y. a. Haz apagado. b. Haz encendido	37
4.9.	Experimento del búnker . . . . .	39
4.10.	Plano del búnker . . . . .	40

# Lista de tablas

2.1. Coeficientes de reflexión, $\alpha$ eq. 2.10 como función de la energía del haz y del ángulo de reflexión obtenida de [1]. . . . .	12
2.2. TVL para barrera primaria en función de la energía del haz [2] . . . . .	14
2.3. Energía promedio en función de ángulo de dispersión [2] . . . . .	14
2.4. TVL en cm para barrera secundarias como función del ángulo de reflexión y voltaje de aceleración [2] . . . . .	15
2.5. TVL para Radiación de fuga [2] . . . . .	15
2.8. Composición esfera ICRU [19, 17] . . . . .	18
4.1. Valores de HVL, QVL y TVL reportados . . . . .	27
4.2. Condiciones de simulación primer experimento . . . . .	27
4.3. Condiciones de simulación segundo experimento . . . . .	27
4.4. Condiciones de simulación segundo experimento . . . . .	28
4.5. Composición elemental de dos tipos de concreto usados . . . . .	29
4.6. Rangos de densidad . . . . .	29
4.7. TVL del concreto . . . . .	29
4.8. Condiciones del experimento . . . . .	32
4.10. Condiciones cálculo de barrera primaria . . . . .	34
4.11. Condiciones del experimento . . . . .	38
5.1. Resultados para el HVL del $^{54}\text{Mn}$ en Pb . . . . .	42
5.2. Resultados para el QVL del $^{54}\text{Mn}$ en Pb . . . . .	43
5.3. Resultados para el TVL del $^{54}\text{Mn}$ en Pb . . . . .	43
5.4. Resultados con un haz de 4MV . . . . .	44
5.5. Resultados para un haz de 6 MV . . . . .	44
5.6. Resultados de la calibración . . . . .	45
5.7. Resultados de la simulación para las diferentes ubicaciones del detector . . . . .	45
5.8. Dosis resultante a 30 cm detrás de la barrera . . . . .	46

# Capítulo 1

## Introducción

Un acelerador lineal de radioterapia es un dispositivo con el cual se aceleran y enfocan electrones para su posterior colisión contra un blanco metálico, produciendo un haz de rayos X o radiación primaria, con energías características asociadas al material del blanco y energías de 'bremsstrahlung' debido a la desaceleración de los electrones al interactuar con el núcleo atómico del material blanco. Este haz se colima para darle una forma específica y se proyecta sobre una zona en la anatomía del paciente, donde se produce radiación dispersa en múltiples direcciones. La radiación primaria, la radiación dispersa y la radiación de fuga que se producen en la generación de los rayos X y durante el tratamiento de un paciente, deben ser atenuadas para evitar la exposición al público y al personal ocupacional por encima de valores definidos en la normativa internacional.

Para ello se diseñan instalaciones con características adecuadas que deben satisfacer un nivel de blindaje que permita la protección contra la radiación ionizante, para definir las necesidades de dicho blindaje se requiere la realización de un cálculo utilizando metodologías reconocidas internacionalmente, el cual consiste en el proceso de definición del tipo y cantidad de material necesario para disminuir la dosis generada por una fuente de radiación. Esto se puede hacer analíticamente, por medio de ecuaciones y factores que simplifican el proceso. Sin embargo, es un proceso poco optimizado, que a veces se debe repetir por completo si hay algún cambio en los requerimientos y que fácilmente puede llevar a errores humanos, aún cuando se siguen lineamientos de referencia como los del IAEA o los del NCRP [1, 2, 3, 4].

El cálculo de blindajes en una zona controlada se suele hacer analíticamente, a través de la aplicación de ecuaciones basadas en aproximaciones y valores numéricos reportados en tablas. Ver por ejemplo las propuestas en los reportes del IAEA, el NCRP y el IPEM [1, 2, 3]

Las simplificaciones hechas en un cálculo analítico tienen la posible desventaja de generar sobre-costos debido a la necesidad de usar valores conservadores en todas sus aproximaciones. Por otra parte la dispersión de la radiación es un fenómeno que puede contribuir a la aparición de puntos calientes difíciles de predecir. Hace falta una herramienta de simulación que tenga en cuenta las contribuciones de radiación primaria, secundaria, dispersión y fuga

de forma más precisa y atendiendo a la naturaleza aleatoria de estos fenómenos. Además es importante automatizar el proceso para evitar posibles errores humanos\* de interpretación de las ecuaciones y los valores en tablas.

De acuerdo con en el IPEM [3], tenemos una inexactitud en los cálculos analíticos de tasas de dosis hasta de un factor de 10. Por lo que es de importancia saber si al desarrollar una simulación, se podría mejorar la exactitud de los cálculos de blindaje. El uso de herramientas de simulación para el cálculo de blindajes se justifica en la mayor exactitud que permiten en comparación a un cálculo analítico, una mayor flexibilidad, en la disminución de posibles errores y en que brindan información más amplia sobre las dosis en la instalación y sus alrededores. Una herramienta de este tipo puede ser usada durante la fase de planeación y cálculo de blindajes de una instalación de radioterapia, como complemento para verificar los cálculos desarrollados. También se puede disminuir la carga sobre el personal cuando se implementan nuevas tecnologías.

En los reportes técnicos actuales se propone una metodología para el cálculo de blindajes en diversas instalaciones de radioterapia usando factores, simplificaciones y consideraciones conservativas. En el presente trabajo se buscó validar el uso de Geant4 para simular la transmisión y atenuación de la radiación y comparar los resultados de simulaciones con la metodología de cálculo de barreras propuesta por los reportes actuales para una instalación de radioterapia de menos de 10MV. Se hizo una primera validación de Geant4 simulando la atenuación de la radiación gamma emitida por un isótopo monoenergético que incidía sobre una barrera de Pb. Posteriormente se simuló el espectro de radiación de un Varian Clinac de 6 MV, usando una fuente universal de partículas de Geant4. Se simula una barrera de concreto con composición obtenida del NIST, considerando posibles rangos de densidad y haces de 4 y 6MV. Se desarrolló la simulación de un búnker con forma de cubo y una barrera primaria de grosor obtenido según la metodología del NCRP 151. Se usa la sección del torso de un fantoma MIRD de un hombre adulto y material de composición ICRU, con una fuente de forma plana.

De acuerdo a lo obtenido en los experimentos del Mn54 en Geant4 se concluye que esta es una herramienta confiable para simular la atenuación de radiación ionizante. Los resultados de la simulación de pared de concreto indican en ocasiones sub-estimación cuando se usan los valores de densidad y TVL mínimos reportados en la literatura [5] y sobrestimación cuando se usan los valores de densidad y TVL máximos reportados en la literatura [2]. Los resultados de la simulación del búnker indican limitaciones en la capacidad de predicción de los cálculos propuestos por el NCRP para un haz de tamaño de 10 cm x 10 cm y una sobre-estimación del grosor de barrera para los objetivos de diseño.



# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Simulaciones de Montecarlo

El método Montecarlo es una solución numérica a un problema donde se modelan interacciones entre objetos con base a relaciones definidas entre dichos objetos. Se busca modelar la naturaleza a través de las dinámicas esenciales del sistema. En ese sentido el método Montecarlo es una aproximación a un sistema macroscópico a través de la simulación de sus interacciones microscópicas [6]

Las relaciones definidas a nivel microscópico entre los objetos se modelan por medio de funciones de densidad de probabilidad. Debido a la naturaleza aleatoria de los procesos, se requiere un generador de números aleatorios.

#### 2.1.1. Ejemplo con dado

Un ejemplo que ilustra claramente una simulación de Montecarlo es el caso de la simulación de un dado [7]. Si el dado es totalmente simétrico y su distribución de masa es homogénea, cada una de sus caras tiene una probabilidad igual de caer. Es decir, para cada número se tiene una densidad de probabilidad de  $\frac{1}{6}$ . En el caso de un dado pesado como el observado en figura 2.1, la probabilidad de obtener el número 2 aumenta debido a la modificación del centro de masa del dado, disminuyendo la probabilidad de obtener un 5.

Suponiendo el peso extra en la cara 2 es tal que la probabilidad de esta es dos veces la de la cara 5, se obtiene una función de densidad de probabilidad y una probabilidad acumulada dadas por eq. 2.1 y observadas en figuras 2.2, 2.3.

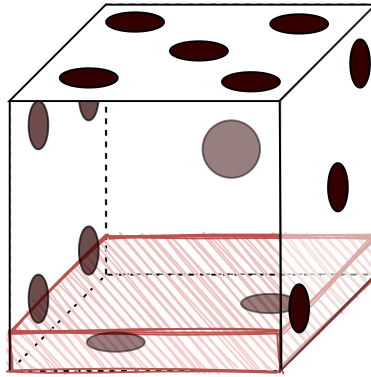


Figura 2.1: Dado pesado. La sombra roja indica una mayor densidad

$$\begin{aligned}
 P(x) &= \left\{ \frac{1}{6}, \frac{2}{9}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{9}, \frac{1}{6} \right\} \\
 &= \left\{ 0,17, 0,22, 0,17, 0,17, 0,11, 0,17 \right\} \\
 F(x) &= \left\{ 0,17, 0,39, 0,56, 0,72, 0,83, 1,00 \right\}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

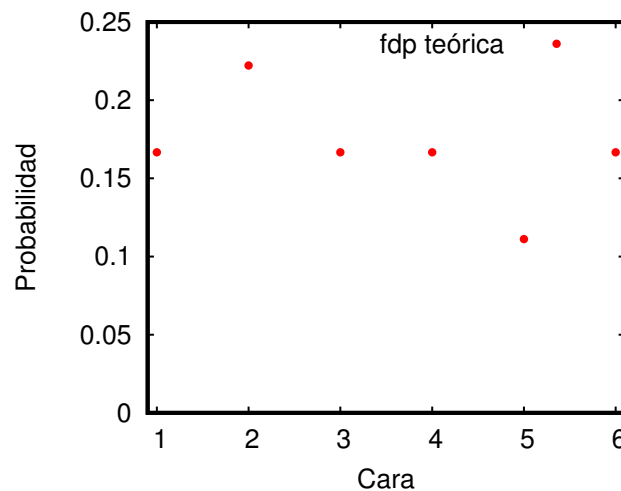


Figura 2.2: Función densidad de probabilidad para cada cara en un dado cargado.

Partiendo de cero para números menores a uno, la altura de los escalones en la función de probabilidad acumulada es igual a la densidad de probabilidad para la cara asociada al número donde empieza dicho escalón. El rango entre los escalones es equivalente a uno, es decir, la diferencia entre caras consecutivas. Se crean intervalos con el eje Y de la función acumulada, donde el intervalo entre  $Y = 0$  y la altura del primer escalón,  $Y = h_1$  se asocia a la cara 1, el intervalo entre la altura  $h_1$  del primer escalón y la altura  $h_2$  del segundo escalón se asocia a la cara 2 y así sucesivamente.

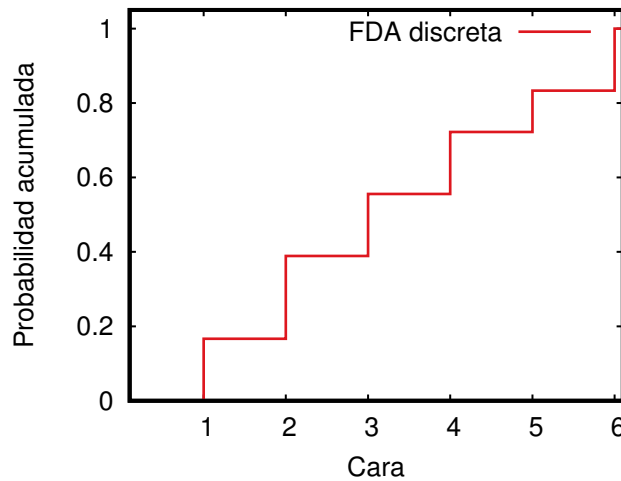


Figura 2.3: Función acumulativa para cada cara en un dado cargado

La probabilidad asociada a la cara  $i$  está dada por  $P(X = x_i) = p(x_i)$  y el valor de probabilidad acumulada asociado a esta cara está dado por eq. 2.2, con un rango  $i-1 < x \leq i$ . La función acumulativa es una función discontinua en los  $x_i$  de cada cara similar a lo observado en la figura 2.4.

$$h(x) = F_X(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i < x} p(x_i) \tag{2.2}$$

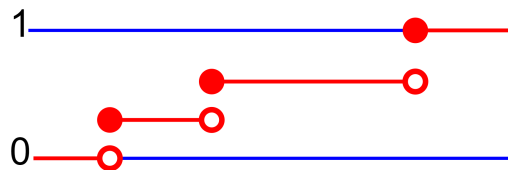


Figura 2.4: Discontinuidad de una función acumulada de una función de probabilidad discreta

Existen generadores de números aleatorios de doble precisión con distribución de probabilidad uniforme entre 0 y 1. Al definir intervalos entre 0 y 1 coincidentes con el dominio de la función acumulada, es decir, intervalos de la forma  $h(x_{i-1}) < Y \leq h(x_i)$ , cada uno de estos intervalos se pueden asociar lógicamente a cada una de las  $i$  caras. Al ejecutar ejecutar el generador aleatorio uniforme, se obtiene un valor entre 0 y 1 que cae dentro de alguno de los intervalos. Entre más grande la probabilidad de una cara, más grande es el intervalo, es decir, es más probable que un número caiga dentro de un intervalo más grande que los demás [7].

De acuerdo a lo anterior, al lanzar el dado varias veces, se puede obtener una aproximación a la densidad de probabilidad original a partir de la frecuencia relativa de cada cara. Como se puede observar en la figura 2.5, cuando se tienen pocos eventos, como es el caso de 30 lanzamientos, la frecuencia relativa de cada cara no reproduce correctamente la densidad de

probabilidad original, para 100 lanzamientos tenemos un mejor ajuste pero aún se observan diferencias significativas a la función original, por lo que se requiere un gran número de eventos para obtener una buena aproximación a la verdadera función de probabilidad como se observa con  $10^6$  lanzamientos.

## 2.2. Procesos físicos

Los principales fenómenos físicos de intercambio de energía entre la materia y la radiación incidente son el efecto de fotoeléctrico, predominante a bajas energías, el efecto Compton, predominante en energías intermedias, la producción de pares, presente a partir de 1.022 MeV y predominante en altas energías. Los coeficientes de absorción de los tipos de interacción física comentados se pueden observar en figura 2.6.

### 2.2.1. Efecto Compton

La dispersión Compton es un proceso en el cual un fotón incidente interactúa con un electrón orbital como si este fuese una partícula libre, ya que su energía de enlace es pequeña en comparación con la energía del fotón. La dinámica de la interacción se puede describir como una interacción partícula-partícula en la que el fotón transfiere parte de su energía al electrón y se dispersa. La energía del fotón disperso de Compton saliente  $E'_\gamma$  es igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente  $E_\gamma$  y la energía transferida al electrón  $E_{K_e}$  eq. 2.3. El proceso de dispersión se modela con la ecuación eq. 2.4, donde  $\theta$  es el ángulo de dispersión del fotón,  $\lambda$  y  $\lambda'$  las longitudes de onda de los fotones incidente y disperso, inversamente proporcionales a la energía del fotón (eq. 2.5).

$$E'_\gamma = E_\gamma - E_{K_e} \quad (2.3)$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (2.4)$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_\gamma} \quad (2.5)$$

Dado un fotón incidente con energía inicial  $h\nu$ , al usar las ecuaciones eq. 2.4 y eq. 2.5 y definiendo la razón entre energías del fotón incidente y disperso por la ecuación eq. 2.6, se obtiene la ecuación eq. 2.7.

$$\frac{E'_\gamma}{E_\gamma} = \frac{\lambda}{\lambda'} = f(E_\gamma, \theta) \quad (2.6)$$

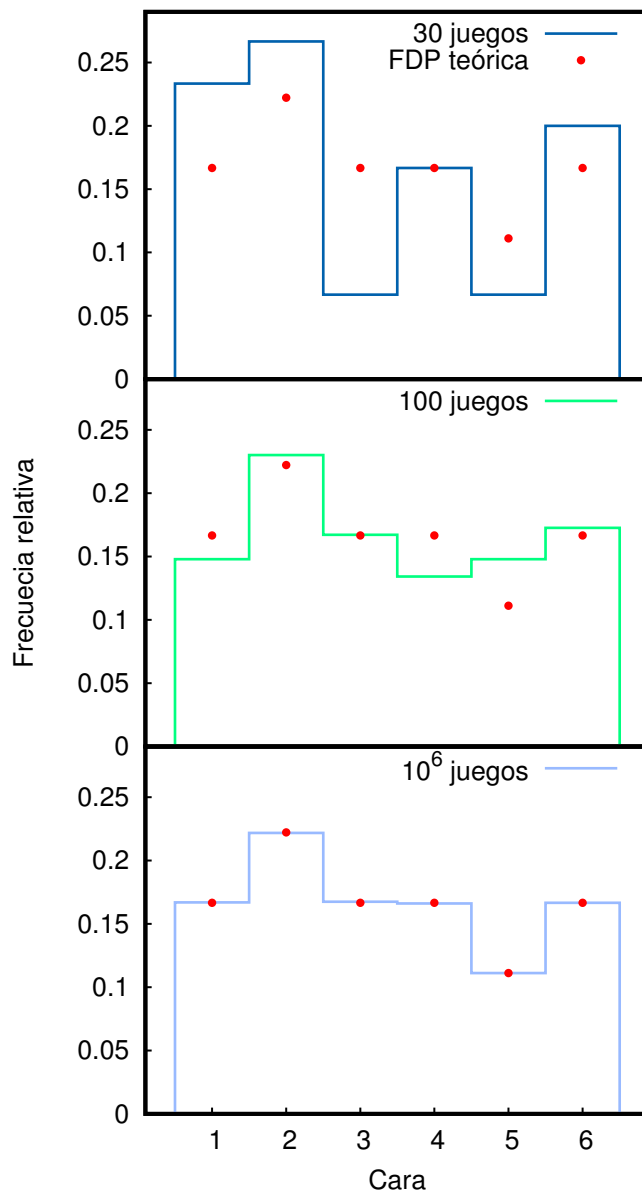


Figura 2.5: Densidad de probabilidad obtenida en función del número de lanzamientos. Las líneas representan la frecuencia relativa obtenida para cada cara, los puntos representan la función de densidad de probabilidad verdadera de la cara

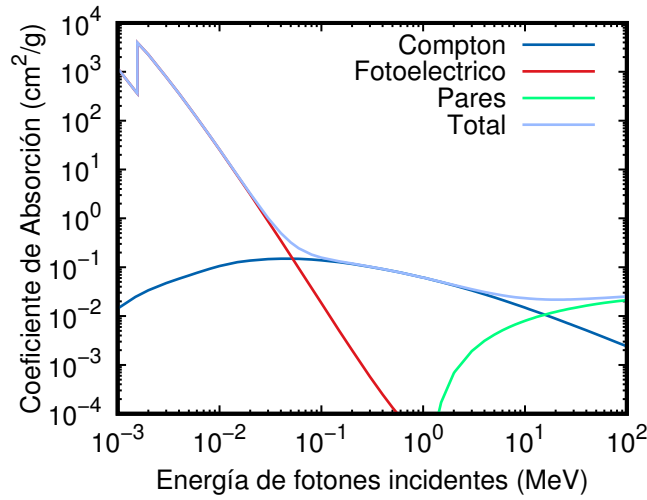


Figura 2.6: Coeficientes de absorción para diversos tipos de interacción física para el aluminio. Datos tomados de la base de datos del NIST

$$f(E_\gamma, \theta) = \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (2.7)$$

Las anteriores ecuaciones describen la transferencia de energía de un fotón incidente a un electrón disperso.

Los posibles ángulos de dispersión de un fotón incidente cubren todo el espacio, y la probabilidad de dispersión para cada ángulo  $\theta$  posible se modelan obteniendo la sección transversal diferencial de fotones dispersos, descrita por la ecuación de Klein–Nishina eq. 2.8

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 f(E_\gamma, \theta)^2 [f(E_\gamma, \theta) + f(E_\gamma, \theta)^{-1} - \sin^2 \theta] \quad (2.8)$$

$$= \frac{1}{2} r_e^2 \left( \frac{\lambda}{\lambda'} \right)^2 \left[ \frac{\lambda}{\lambda'} + \frac{\lambda'}{\lambda} - \sin^2 \theta \right] \quad (2.9)$$

Donde  $r_e$  es el radio clásico del electrón y  $r_e^2 \sim 79,406$  mb.

Al evaluar la función presentada en función de la energía se obtiene la figura 2.7, donde se evidencia que para fotones de alta energía, la distribución de fotones dispersos tiene una orientación preferencial hacia el frente.

La distribución angular de los fotones dispersos tiene un carácter probabilístico, difícil de predecir debido a la gran cantidad de electrones presentes a nivel macroscópico y la variación punto a punto de la densidad electrónica debido a la composición mixta de materiales complejos como el concreto. Esto sumado a la gran cantidad de fotones que se producen en

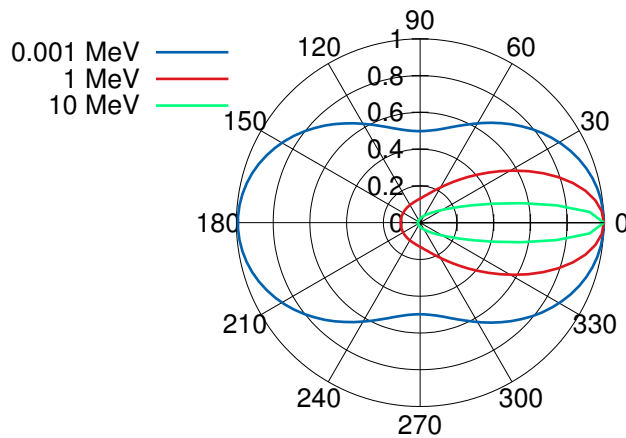


Figura 2.7: Probabilidad de que un fotón se disperse a un ángulo  $\theta$  eq. 2.8.

un haz de un acelerador, convierte este en un problema difícil de seguir mediante cálculos analíticos.

### 2.2.2. Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es un fenómeno de interacción donde un fotón con mayor energía a la de un electrón ligado en un orbital atómico interactúa con este, transmitiendo toda su energía. El electrón liberado tiene una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente y la energía de enlace del electrón. Usualmente el electrón liberado pertenece a una capa orbital interna y debido a esto posteriormente un electrón de una capa más externa llena la vacancia dejada por el foto electrón, emitiendo en el proceso un fotón de rayos X característico, con energía igual a la diferencia de energías de enlace de las dos capas. El ángulo de emisión más probable del fotoelectrón en relación con la dirección del fotón incidente es de 90 grados para fotones de baja energía (50 keV o menos), volviéndose más pequeño (más hacia adelante) a medida que aumenta la energía del fotón. La sección eficaz para este fenómeno disminuye conforme aumenta la energía del fotón incidente. Para energías de varios MeV como las usadas en radioterapia hay una baja probabilidad de que ocurra el efecto fotoeléctrico [8].

### 2.2.3. Producción de pares

Es un proceso de interacción entre un fotón con una energía mayor a dos veces la energía de masa en reposo de un electrón, con un núcleo atómico. El resultado es la producción de dos partículas: el electrón y el positrón. Dado que la masa en reposo de cada una de estas partículas es de 0,511 MeV, el umbral de energía para la producción de pares es de 1,022 MeV. La energía cinética total de este par de partículas es igual a la energía del fotón incidente menos 1.022 MeV, la energía de masa necesaria para producir el par positrón electrón. El

coeficiente másico de atenuación para la producción de pares aumenta logarítmicamente con la energía por encima del umbral y es proporcional a  $Z^2$ . Posteriormente a la producción del par electrón-positrón, el positrón tiene una alta probabilidad de combinarse con un electrón libre, resultando en un par de fotones de aniquilación, cada uno de energía 0.511 MeV. En radioterapia en los rangos de voltaje menores a 10 MV es un fenómeno de baja probabilidad pero que igual está presente y hay que tenerlo en cuenta.

## 2.3. Funcionamiento de Geant4

Geant4 es un software de simulación con base en el uso de métodos de Montecarlo para la simulación de procesos físicos de radiación. En su interior se usan corridas, eventos, caminos y pasos para compartimentar los procesos de ejecución del programa en secciones lógicas. Además por medio del uso de librerías físicas se pueden definir elementos y compuestos realistas que interactúan con las partículas y de esta forma simular correctamente los fenómenos de interacción radiación materia.

### 2.3.1. Corridas, eventos y pasos

Una corrida es un ciclo en el cual se ejecuta una colección de eventos. Dentro de esta, el usuario no puede cambiar la geometría del detector ni los procesos físicos predefinidos, es decir, el detector es inaccesible durante una corrida. En Geant4 las corridas se representan por la clase G4Run o una clase heredada de este modificada por el usuario.

Un evento es la simulación completa de cada partícula individual a través de sus diferentes interacciones o pasos. Dichas partículas se colocan en una pila. Cuando la pila se vacía, el procesamiento de un evento termina. La clase G4Event representa un evento y consta de los siguientes objetos al final de su procesamiento.

- Lista de vértices y partículas primarias
- Colección de trayectoria (opcional)
- Colecciones de éxitos
- Colecciones de dígitos (opcional)

El paso describe los cambios en posición y energía de una partícula, desde un punto inicial hasta un punto final. Contiene información de interacciones discretas de una partícula (pérdida de energía en el paso, tiempo del paso, etc.). En la interacción de un fotón en cada paso se produce alguna de las interacciones anteriormente descritas. En caso de que un paso esté limitado por un límite de volumen, el punto final se encuentra físicamente en el límite y, lógicamente, pertenece al siguiente volumen.

### 2.3.2. Elemento

Los elementos o G4Element son elementos lógicos que representan los átomos de los que se compone la materia. Se pueden combinar en proporciones para crear moléculas o compuestos.



En Geant4 existe una librería de elementos obtenida del NIST, con información acerca de la sección eficaz, fracción de masa y otras características ampliamente investigadas y caracterizadas.

### 2.3.3. Material

Un material o G4Material es la combinación de varios elementos en una proporción definida por el usuario. Un material puede representar una molécula o un compuesto de mayor complejidad. Para construir un material se debe definir un nombre, densidad y número de componentes (elementos). Posteriormente cada uno de los componentes se añaden al compuesto, usando como argumento el elemento a añadir y el número de átomos o fracción fracción de masa de cada uno. Por ejemplo, el agua se construye a partir de la unión de dos átomos de Hidrógeno y un átomo de Oxígeno. Mientras el aire se obtiene a partir de la unión de fracciones de masa de Oxígeno, Hidrógeno, Nitrógeno, entre otros.

### 2.3.4. Sólido

Los sólidos o G4Solid son geometrías que describen la forma de los objetos. Cada tipo de sólido puede recibir distintos argumentos a la hora de ser construido. El sólido tipo caja por ejemplo recibe como argumentos un nombre de identificación y las dimensiones en los ejes X, Y y Z. Otros sólidos más complejos pueden recibir como argumentos radios, alturas, o incluso ángulos [9]. Sobre los sólidos se pueden hacer operaciones lógicas como sustracción, uniones e intersecciones, para definir así sólidos de mayor complejidad.

### 2.3.5. Volumen lógico

Un volumen lógico o G4LogicalVolume es una entidad por medio de la cual se hace seguimiento de las interacciones físicas entre la radiación y la materia contenida en esta entidad. El volumen lógico es aquel que existe dentro de la simulación, requiere un nombre, una forma (G4Solid) y una composición (G4Material).

### 2.3.6. Localización

Los volúmenes lógicos deben ubicarse en el espacio por medio del objeto lógico G4PVPlacement. Un G4PVPlacement se construye a partir de un volumen lógico propio, un volumen lógico madre y una matriz de transformación (G4Transform3D). El volumen lógico propio se ubica en un desplazamiento y rotación en el sistema de coordenadas del volumen lógico madre. Todos los G4PVPlacement deben tener un volumen madre con excepción del volumen 'mundo', donde ocurre toda la simulación. Si una partícula salen del volumen mundo, estas desaparecen y no interactúan con nada más.

## 2.4. Cálculos analíticos

Algunos de los conceptos importantes usados en el proceso de cálculos analíticos hechos en radioprotección son:

**Tasa de dosis:** Es la tasa de dosis equivalente en un periodo de tiempo, en particular la tasa de dosis instantánea (IDR) se mide en mSv/hora

**Área Controlada:** Un área controlada es aquella que requiere de medidas administrativas, logísticas, infraestructura y monitoreo personal regular para evitar la exposición del personal ocupacional a tasas de dosis superiores a los establecidos en la reglamentación nacional.

**Zona no controlada:** Aquellas zonas donde no se hace un monitoreo constante, pero se toman medidas necesarias para evitar la exposición del público.

**Objetivos de diseño de blindaje ( $P$ ):** Son los márgenes de tasa de dosis equivalente ( $H$ ) usados en los cálculos del diseño. Gracias a estos niveles de referencia, se obtiene el grosor de material de pared necesario para evitar la exposición de personas a valores de dosis equivalente en tiempo superiores a los establecidos en normativa. Para el caso de zonas controladas la recomendación es de 0.1 mSv/semana y para zonas no controladas, la recomendación es de 0.02 mSv/semana

**Barrera primaria:** Es aquella superficie sobre la que puede llegar directamente la radiación producida por el blanco de la unidad de tratamiento. El cálculo del grosor de estas barreras se puede obtener a partir de datos empíricos como la capa hemireductora (HVL) y la capa decaeductora (TVL).

Otras variables importante son *carga de trabajo*, *factor de uso*, entre otras, las cuales están bien definidas en las referencias del NCRP y el IPEM [2, 3]

El cálculo de blindajes en una zona controlada se suele hacer analíticamente, a través de la aplicación de ecuaciones basadas en aproximaciones y valores numéricos reportados en tablas. Ver por ejemplo las propuestas en los reportes del IAEA, el NCRP y el IPEM [1, 2, 3]

Un ejemplo de una de las partes dentro del proceso de cálculo consiste en el uso del coeficiente de reflexión de pared  $\alpha$  usado para el cálculo de factor de transmisión de barrera  $B_w$  requerido para proteger de la radiación dispersa. Dicho factor es un aproximado de la fracción de radiación que en promedio se refleja en función del voltaje de aceleración, ángulo de incidencia, ángulo de reflexión y el tipo de material usado. Para más información sobre los términos mencionados y las variables presentes en la ecuación eq. 2.10, consultar en [1].

$$B_w = \frac{Pd_w^2 d_r^2}{\alpha AWUT} \quad (2.10)$$

Tabla 2.1: Coeficientes de reflexión,  $\alpha$  eq. 2.10 como función de la energía del haz y del ángulo de reflexión obtenida de [1].

TABLE 6. DIFFERENTIAL DOSE ALBEDO (WALL REFLECTION COEFFICIENT) 45° INCIDENT ANGLE, ORDINARY CONCRETE [34]

	Angle of reflection (from normal)			
	75	45	15	0
24 MV	3.37E-03	3.91E-03	3.91E-03	3.74E-03
20 MV	3.75E-03	4.20E-03	4.14E-03	3.95E-03
18 MV	4.01E-03	4.41E-03	4.32E-03	4.11E-03
15 MV	4.48E-03	4.78E-03	4.56E-03	4.34E-03
10 MV	5.75E-03	5.75E-03	5.38E-03	5.10E-03
6 MV	7.69E-03	7.35E-03	6.71E-03	6.35E-03
4 MV	9.36E-03	9.01E-03	8.19E-03	7.77E-03
Co-60	1.26E-02	1.19E-02	1.07E-02	1.02E-02
0.5 MeV	1.70E-02	2.15E-02	2.10E-02	2.03E-02
0.25 MeV	1.82E-02	3.05E-02	3.50E-02	3.39E-02

El problema del factor  $\alpha$  de la eq. 2.10 es que su determinación se da en condiciones muy particulares y discretas. Si se desean condiciones intermedias de ángulos, se debe hacer una interpolación que puede no modelar correctamente el proceso. El ángulo de dispersión de la radiación esta dado por la sección eficaz de Klein Nishina (eq. 2.8), lo cual quiere decir que hay probabilidad de dispersión no nula a todos los ángulos  $\theta$  por lo que en realidad necesitaríamos una infinidad de valores de  $\alpha$  aplicados de manera simultanea solamente para analizar la reflexión de un haz en una pared. Además de las limitaciones con en el cálculo del factor  $\alpha$ , la fluencia de un haz de fotones varía debido al uso de colimadores y la disposición de componentes de diseño del cabezal del acelerador varía con cada fabricante, lo cual hace que las características de la fluencia y espectro del haz varíen de acuerdo al modelo del acelerador. Finalmente, el concreto tiene una incertidumbre en su densidad de acuerdo a la empresa de construcción, en ocasiones se usan mezclas con materiales diferentes, o incluso se usa acero, plomo y materiales para cubrir el plomo como lo es el polietileno cargado con litio o boro. Todas estas variaciones de materiales y capas intermedias así como su interacción y sus efectos en la fluencia de partículas, generan una imposibilidad práctica a la hora de hacer cálculos analíticos usando tablas y ecuaciones puramente analíticas.

### 2.4.1. Principales parámetros utilizados en el cálculo de blindajes

El espesor de la barrera se puede determinar usando capas decimoreductoras basadas en la energía del acelerador y el tipo de material de blindaje. En este caso, el número requerido ( $n$ ) de TVL viene dado en función del factor de transmisión  $B$  por la eq. 2.11 [2]:

$$\text{Num. de TVLs} = \log_{10} \left( \frac{1}{B} \right) \quad (2.11)$$

$$t_{barrera} = TVL_1 + (n - 1)TVL_e \quad (2.12)$$

La primera ( $TVL_1$ ) y la capa de décimo valor de equilibrio ( $TVL_e$ ) del material deseado se utilizan para explicar los cambios espectrales en la radiación a medida que penetra la barrera. Así, cuando un espesor de barrera ( $t$ ) es mayor que el primer TVL1, el factor de transmisión total ( $B$ ) viene dado por eq. 2.13

$$B = 10^{-\left(1 + \left[\frac{t-TVL_1}{TVL_e}\right]\right)} \quad (2.13)$$

- HVL, QVL y TVL: Están definidos como aquellos espesores de material necesario para atenuar un haz de radiación incidente a la mitad, cuarta y decima parte de su intensidad inicial respectivamente.

La importancia de estos parámetros radica en su utilidad para caracterizar la calidad del haz. El HVL y el TVL dependen de la energía promedio del haz incidente, así como la composición del material atenuador.

Los parámetros HVL y TVL son diferentes para la radiación primaria y la radiación dispersa. La radiación primaria viene directamente del acelerador y tiene un espectro que puede ser caracterizado por un fabricante o empresa interesada en esta información. En cambio, la radiación secundaria tiene múltiples fuentes como lo son el paciente, las paredes y la radiación de fuga. Dependiendo del ángulo de dispersión, la energía de radiación dispersa tiene energías promedio variables (tabla 2.3), desde un máximo para ángulos de dispersión de 0 grados, hasta un mínimo para ángulos de dispersión de 90 grados, por lo que los TVL para radiación secundaria son aproximadamente iguales o inferiores a los de radiación primaria dependiendo del ángulo de dispersión, como se puede observar al comparar las tablas 2.2, 2.4. De forma similar ocurre con la radiación de fuga, la cual tiene un valor de TVL máximo para 90 grados en el cabezal y solo se reporta para este ángulo por razones conservativas (tabla 2.5).

Tabla 2.2: TVL para barrera primaria en función de la energía del haz [2]

Endpoint Energy (MV) <sup>b</sup>	Material	$TVL_1$ (cm)	$TVL_e$ (cm)
4	Concrete	35	30
	Steel	9.9	9.9
	Lead	5.7	5.7
6	Concrete	37	33
	Steel	10	10
	Lead	5.7	5.7
10	Concrete	41	37
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7
15	Concrete	44	41
	Steel	11	11
	Lead	5.7	5.7

Tabla 2.3: Energía promedio en función de ángulo de dispersión [2]

Endpoint Energy (MV)	Scatter Angle (degrees)							
	0	10	20	30	40	50	70	90
6	1.6	1.4	1.2	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2
10	2.7	2.0	1.3	1.0	0.7	0.5	0.4	0.2
18	5.0	3.2	2.1	1.3	0.9	0.6	0.4	0.3
24	5.6	3.9	2.7	1.7	1.1	0.8	0.5	0.3

Tabla 2.4: TVL en cm para barrera secundarias como función del ángulo de reflexión y voltaje de aceleración [2]

Scatter Angle (degrees)	TVL (cm)							
	Co-60	4 MV	6 MV	10 MV	15 MV	18 MV	20 MV	24 MV
15	22	30	34	39	42	44	46	49
30	21	25	26	28	31	32	33	36
45	20	22	23	25	26	27	27	29
60	19	21	21	22	23	23	24	24
90	15	17	17	18	18	19	19	19
135	13	14	15	15	15	15	15	16

Tabla 2.5: TVL para Radiación de fuga [2]

Endpoint Energy (MV) <sup>b</sup>	$TVL_1$ (cm)	$TVL_e$ (cm)
4	33	28
6	34	29
10	35	31
15	36	33
18	36	34
20	36	34
25	37	35
30	37	36
Co-60	21	21

De acuerdo al material con el que la radiación interactúe, la energía y el ángulo de los fotones dispersados varían, así como el espectro generado. Hay aproximaciones empíricas disponibles, con la limitación de no tener en cuenta las posibles dependencias puntuales de la interacción radiación-materia.

## 2.5. Concreto

El concreto suele ser el principal material usado para un búnker de una zona controlada debido a su capacidad de atenuación intermedia que permite su uso en construcciones ocupando un espacio práctico. Para la correcta simulación de los procesos físicos que ocurren dentro del concreto, se requiere una adecuada caracterización del material.

El concreto es un material que resulta de la combinación de variadas proporciones de materiales. Las proporciones exactas de dicha composición pueden variar de acuerdo al origen de los materiales usados para la mezcla y el proceso de fabricación. Por ende en el presente trabajo se usa una composición estándar de concreto, que bien se podría ajustar en futuras simulaciones de acuerdo a la caracterización química de un concreto industrial usado por una compañía específica.

En la literatura existen varias definiciones de la composición del concreto. En las referencias investigadas [10, 11] la composición de oxígeno está entre el 50 % y 60 % y la de silicio entre el 25 % al 35 %. Además se tienen otros materiales como el hierro, calcio, sodio y aluminio. En el presente trabajo se seleccionan valores usados en otros trabajos anteriores [12, 13]:

Elemento	Concreto 1 [12]	Concreto 2 [13]
Oxígeno	60.54 %	52 %
Silicio	22.79 %	32.5 %
Hidrógeno	9.97 %	0 %
Calcio	4.99 %	6 %
Aluminio	1.42 %	4 %
Hierro	0.28 %	4 %
Sodio	0 %	1.5 %

	Concreto 1	Concreto 2
Densidad	2.3 g-cm <sup>-3</sup>	2.5 g-cm <sup>-3</sup>

## 2.6. Maniquí objetivo

El volumen objetivo usado en el experimento del búnker es el maniquí MIRD, un volumen antropomórfico con dimensiones representativas de una persona, como se puede observar en figura 2.8.

Un material que puede componer a este fantoma es el material ICRU

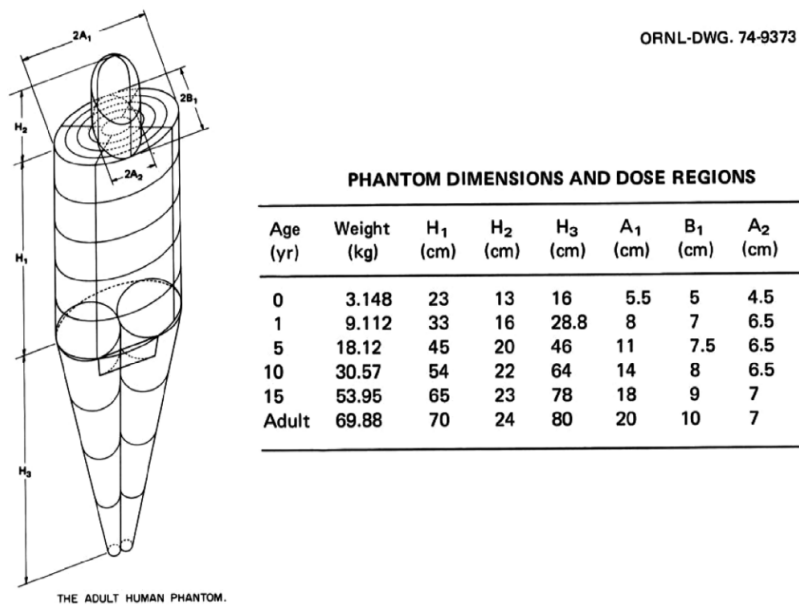


Figura 2.8: Dimensiones del fantoma MIRL [14]

## 2.7. Esfera ICRU

Un maniquí usualmente usado en radioprotección para la definición de cantidades operacionales [15] es la esfera ICRU, que tiene una composición equivalente y aproximada a tejido humano. Este material tiene una composición de cuatro elementos observada en tabla 2.8, reportada por primera vez en el ICRU 33 [16] y revisada en el ICRU 44 [17], también reportado en NIST [18].

Tabla 2.8: Composición esfera ICRU [19, 17]

Elemento	Composición (%)
Oxígeno	76.2
Carbono	11.1
Hidrógeno	10.1
Nitrógeno	2.6



# Capítulo 3

## Estado del arte

A lo largo de los años se han desarrollado investigaciones orientadas a la disminución del error en el cálculo de deposición de dosis [20, 21]. Para lograrlo se han diseñado simulaciones más sofisticadas, usando los principios físicos fundamentales de interacción de partículas. En las simulaciones se toma en cuenta más detalles de la geometría y los materiales implicados [22, 23], se aumenta el número de interacciones por partícula, el número de partículas simuladas y se disminuyen las energías de corte, simulando así más interacciones. A la par, conforme pasan los años los lenguajes de programación evolucionan y la capacidad física de cómputo incrementa, permitiendo así simulaciones más complejas. Un ejemplo de lo anterior se da al comparar MCNP [24], Penelope [25, 26] y Geant4 [27, 28, 29], los dos primeros desarrollados con Fortran y el segundo desarrollado con C++.

Por otra parte es preferible usar C++ a Fortran o C [30, 31], sus contendientes en términos de eficiencia de cómputo por varias razones mencionadas a continuación. C++ es un lenguaje orientado a objetos, lo cual implica que es un lenguaje modular, dicha propiedad permite crear módulos que actúan de forma independiente, crear abstracciones y mejorar la expresividad de los programas desarrollados, facilitando el desarrollo de estructuras de mayor complejidad; Geant4 es un ejemplo de esto, un proyecto acorde a las necesidades del CERN, donde se hacen simulaciones extremadamente complejas. Por lo anterior Geant4 es muy extenso y completo y por lo tanto permite la flexibilidad de desarrollar simulaciones tan detalladas y extensas como lo permitan los recursos físicos disponibles.

Continuando con los procesos de investigación, las generalizaciones se convierten posteriormente en ecuaciones [20, 32, 33, 34, 35], además se han logrado hacer avances importantes en materia de planeación de tratamientos [36]. Gracias a dichos avances se han podido crear protocolos de radioprotección donde se usan un conjunto de ecuaciones para facilitar el cálculo de deposición de dosis en el entorno circundante de un área controlada con el propósito de calcular el blindaje necesario para la protección del personal público y ocupacional en riesgo durante procesos de tratamiento o diagnóstico que involucre el uso de radiación ionizante.

Sin embargo, los cálculos analíticos pueden pasar por alto puntos calientes y no permiten

generar distribuciones de dosis. Uno de los métodos de aproximación más apropiados para resolver este tipo de problemas consiste en las simulaciones de Montecarlo [3].

Existe software comercial para el cálculo de blindajes [37], sin embargo por ser software privado tiene un costo, y debido a su carácter comercial, la metodología y los detalles están ocultos a la revisión de externos. Además hay software que automatiza el proceso de cálculos basado en las metodologías del IAEA y el NCRP [1, 2], que usan cálculos analíticos [4]. Dichos cálculos tienen la limitación de no considerar la distribución espacial de dosis, y tal vez sobre-estimar la cantidad de blindaje necesario o en el peor de los casos pasar por alto puntos calientes en el espacio.

En este orden de ideas, resulta conveniente el desarrollo de simulaciones de Montecarlo con herramientas de dominio público. Algunas de las más usadas actualmente en el área son MCNP, Penelope [20, 38, 39, 40, 23] y Geant4. Esta última es una herramienta creada por la Organización Europea para Investigación Nuclear (CERN). Debido a la amplia trayectoria de dicha organización, y al amplio uso en el área de dosimetría, Geant4 se plantea como una herramienta muy completa y fiable.

Hay una amplia gamma de metodologías de optimización de los algoritmos de simulación y técnicas de reducción de la varianza que son implementados de forma diferente por cada sistema de simulación [41, 42, 43]. Además existe una amplia gamma de modelos físicos para las secciones eficaces de cada procesos de interacción donde la mayoría depende del tipo de material [44]. De esta manera se pueden escoger entre distintos modelos analíticos así como incluir datos experimentales reportados en tablas. Geant4 permite escoger entre 5 diferentes tipos de implementación de dichos modelos físicos [45]. A través de comandos sencillos Geant4 permite variar entre estos diferentes modelos.

Hasta el momento no se ha reportado un software basado en Geant4 para el diseño de áreas controladas en radioterapia que permita realizar un mapa de dosis de la instalación así como la determinación de los blindajes necesarios para lograr las dosis objetivo en los alrededores de la instalación.

### **3.1. Metodología de cálculo de blindajes**

Actualmente el método más usado para el cálculo de blindajes consiste en seguir los lineamientos dispuestos en el NCRP 151 y reportes parecidos como el IPEM 75 y el IAEA 47. El procedimiento de cálculo usa diversas aproximaciones conservativas, con la esperanza de que en el peor de los casos igual se logre cumplir con los objetivos de diseño.

Este procedimiento de cálculo se conoce como 'cálculo directo' o analítico, y consiste en usar ecuaciones determinadas en radio-protección para obtener los espesores necesarios de las barreras de la instalación con el propósito de atenuar la radiación hasta un valor inferior a un objetivo de dosis límite propuesto. Los valores de TVL usados en estos cálculos se basan simulaciones de Montecarlo con una barrera y aproximaciones conservativas de TVL primarios, secundarios y de fuga obtenidos en investigaciones previas [46, 5].

Se confía en que los resultados obtenidos con una barrera se pueden extrapolar al uso de múltiples barreras, mediante el uso de ecuaciones de dispersión, geometría y aproximaciones conservativas para tomar en cuenta las contribuciones por radiación dispersa. Sin embargo esta metodología tiene varias limitaciones. Debido al uso de aproximaciones conservativas en los TVLs, se pierde reproducibilidad con respecto a las simulaciones originales, y en el proceso de hacer aproximaciones conservativas, se pierde exactitud en los resultados. Como consecuencia, se tienen errores por sobre estimaciones acumuladas en cada paso de los cálculos. Las diferencias entre lo diseñado y lo requerido puede llegar a ser tan grande como un orden de magnitud [3] con respecto a los resultados obtenidos en un estudio ambiental de radiación alrededor de la instalación.

Algunos indicios de lo anterior se observan en [4], donde se obtienen diferencias significativas entre los valores medidos y los calculados por medio de un software que implementa la metodología propuesta en el NCRP 151. Aunque la metodología clásica suele ajustarse apropiadamente a diseños sencillos de instalaciones, como se observa en una validación hecha de un diseño sencillo para un acelerador con energías de 6MV y 10MV [47], en este mismo artículo se observan algunos puntos calientes que aunque cumplen con los objetivos de diseño, se alejan de la capacidad predictiva de los cálculos y por ello comentan que instalaciones con formas más complejas requerirían de cálculos de Monte Carlo [47].

Por otra parte se han hecho mediciones en corredores y se han encontrado diferencias de 5 o más veces entre la dosis medida y lo esperado con los cálculos propuestos por en NCRP [48]. Estos resultados dejan claro la importancia de usar valores conservativos en los cálculos a mano, aunque no da ningún indicio de qué tan conservativo se debe ser. Otro problema que se comenta en esta investigación es que cualquier cambio mínimo en parámetros simples como la altura del pasillo o su longitud pueden hacer que las ecuaciones del NCRP tengan una capacidad predictiva aún menor. Por ejemplo hay una advertencia específica dada en el NCRP donde se comenta que su método de estimación de dosis en puerta y corredor está restringido a cuartos con una razón entre altura y ancho entre 1 y 2, y donde la razón entre la longitud del pasillo y su altura promedio sea un valor entre 2 y 6 [2].

Lo anterior plantea que diseños fundamentados en el NCRP y aproximaciones poco conservativas pueden generar sobre-costos importantes, debido a la necesidad de hacer correcciones posteriores a la construcción del búnker, cuando las medidas obtenidas en un estudio de radiación de la instalación den como resultado una dosis por encima de los límites anuales. También es preocupante que la barrera de seguridad de revisión de cálculos por un segundo evaluador o una institución de control nacional puede fallar a causa de supuestos o interpretaciones diferentes a las que utiliza la persona que hace el diseño sobre las ecuaciones y su rango de aplicación en la instalación evaluada.

## 3.2. Metodología de Montecarlo

En este orden de ideas, la metodología de Montecarlo se plantea como una opción complementaria para enfrentar el problema de diseño de blindajes. Previamente se han hecho

investigaciones con el software MCNP con resultados satisfactorios [3], con la desventaja de tener tiempos de cálculo muy extensos y la poca capacidad expresiva de Fortran.

Por otra parte, no se tiene conocimiento del uso previo del software Geant4 para el diseño de blindajes en salas de radioterapia. Debido a la flexibilidad de este sistema, es de interés abordar esta misión en el presente trabajo con una primera aproximación.

# Capítulo 4

## Metodología

### 4.1. Validación de Geant4: HVL, QVL y TVL del plomo

Con el propósito de ganar confianza en las simulaciones de Geant4 y de hacer una validación inicial con valores experimentales de HVL, QVL y TVL reportados en NIST, se desarrolló una simulación con una fuente de manganeso 54 ( $^{54}\text{Mn}$ ) con emisión pura (100 %) de fotones gamma de energía de 0.835 MeV como se puede observar en figura 4.1. Lo anterior es un problema parecido al que se desea resolver, consistente en la atenuación de fotones por medio del uso de materiales de blindaje, pero simplificado y que por esta razón representa un buen punto de partida. La idea era comprobar que se cumple con valores reportados en la literatura, pues los HVLs, QVLs y TVLs para núcleos radioactivos están bien definidos y se quiere estar seguro desde una base concreta de que se puede confiar en las simulaciones de atenuación de radiación electromagnética de alta energía.

El resultado fue positivo, con un grado de incertidumbre de aproximadamente 10 % debido al uso de un detector de aire. El uso de otros materiales para la detección podrá mejorar la precisión de los resultados y la eficiencia de la simulación. Dichos resultados serán presentados en el siguiente capítulo.

#### 4.1.1. Fuente de partículas puntual

El GPS (fuente generalizada de partículas) es una herramienta disponible en Geant4 por medio de la cual se pueden definir distribuciones espectrales, angulares y espaciales de las partículas fuente primarias. Para comunicarse con el GPS se pueden usar macros para definir las propiedades de la fuente, que se llaman al momento de la ejecución. En el presente trabajo de grado se usan tres tipos de fuente: fuentes puntuales, fuentes cónicas y fuentes de sección cuadrada.

La fuente puntual es un tipo de fuente de partículas con dimensión despreciable que emite desde un punto en el espacio a todas las direcciones, formando un campo de partículas

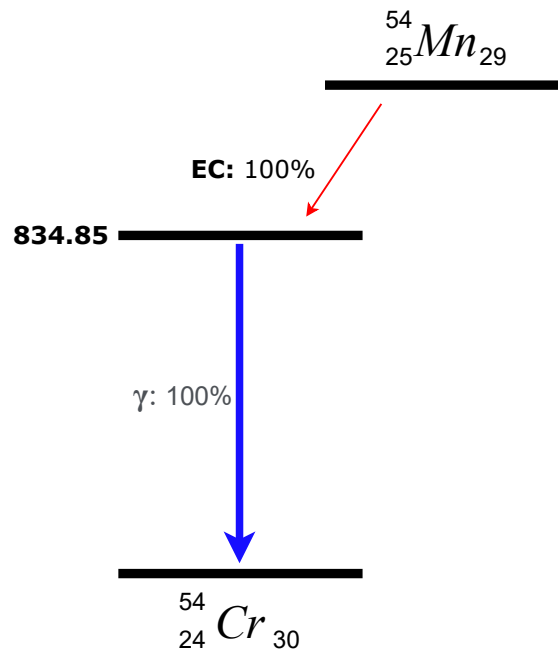


Figura 4.1: Esquema decaimiento  $^{54}\text{Mn}$

divergente con intensidad variable de acuerdo a la ley del inverso cuadrado. Se define el tipo de partícula gamma, la posición de origen, el tipo de posición puntual y la energía de las partículas. En código 4.1 se observa el macro usado para definir una fuente de partículas con una energía puntual de 0.835 MeV.

```
# Tipo de partícula
/gps/particle gamma
# Fuente puntual
/gps/pos/type Point
# Fuente isotrópica
/gps/ang/type iso

# Origen
/gps/pos/centre 0. 0. 0. m

# Energía
/gps/energy 0.835 MeV
```

Código 4.1: Macro del GPS para una fuente isotrópica puntual.

#### 4.1.2. Diseño del experimento

Se define un cubo de lado de 2 metros que consiste en el mundo lógico donde se va a desarrollar la simulación. Dentro de este mundo los eventos de interacción de radiación materia pueden ocurrir y las partículas como objeto lógico van a existir. A estas unidades lógicas se les puede asignar propiedades como masa, momento, energía, entre otros.

Este mundo lógico se llena de aire y los objetos de interés a ser simulados se ubican dentro. Se define un isótopo de  $^{54}\text{Mn}$  ubicado en el origen del mundo, obtenido desde la librería de partículas de isótopos radiactivos de Geant4. Cada evento equivale a un decaimiento del isótopo, es decir, la emisión de un fotón con energía de 834 keV y con dirección aleatoria, una característica del isótopo de la librería mencionada.

Posteriormente se construye una geometría de paralelepípedo para la pared, a la cual se asigna una entidad lógica, una traslación en el espacio de forma que se ubique a 20 cm de la fuente y finalmente como material el Pb, disponible en la librería de materiales de Geant4.

Luego se propone algo similar con un cubo de agua a usar como detector ubicado detrás de la pared y pegado a esta. El volumen de este cubo de agua es modificado para identificar la dependencia del volumen para identificar si existe alguna dependencia importante de la dosis con el volumen usado. Inicialmente se pensó en usar un cubo de aire, pero se encontró que los resultados son equivalentes a usar un cubo de agua como detector, y esto se debe a que con la presencia barrera lo que se ve afectado principalmente es la intensidad relativa de la al otro lado.

Para convertir el cubo de agua en detector, se define un apuntador al objeto de volumen lógico en Geant4 y se sigue en cada evento todos aquellos procesos de deposición de energía que se den en este volumen. Posteriormente se relaciona la energía total depositada en ese volumen con su masa para obtener la dosis total depositada.

Una captura visual del experimento se puede observar en figura 4.2a, y en figura 4.2b se puede visualizar la emisión de radiación. La pared de Pb tiene un color azul y el detector tiene un color lila. El isótopo de  $^{54}\text{Mn}$  se encuentra ubicado en el origen del centro coordenado.

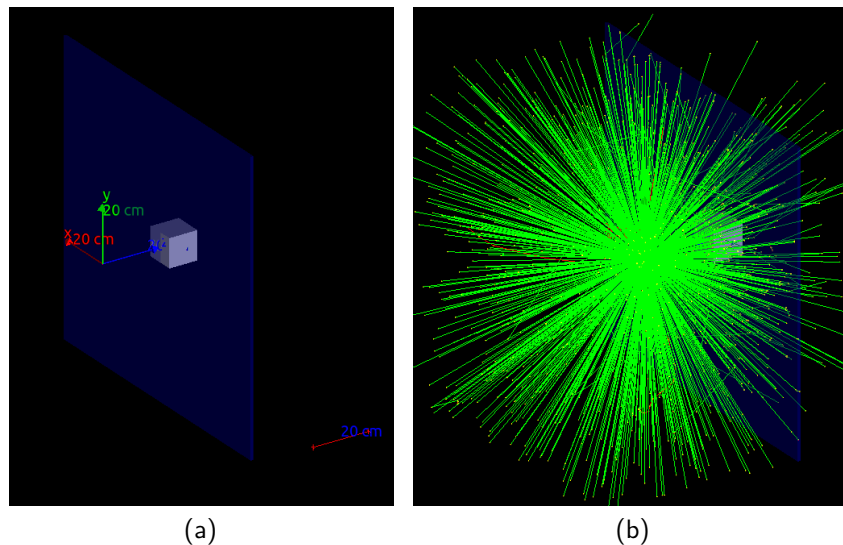


Figura 4.2: Experimento  $^{54}\text{Mn}$

Se considera que debido a la gran cantidad de eventos se sigue una función de probabilidad

de Poisson y por lo tanto el RMS o desviación estándar depende del número de eventos.

$$\text{Nro de Eventos} = n \quad (4.1)$$

$$\text{Energía por paso} = E_{\text{step}_j} \quad (4.2)$$

$$\text{Energía por evento} = \Delta E_i = \sum_j E_{\text{step}_j} \quad (4.3)$$

$$\overline{\Delta E} = \frac{\sum_i \Delta E_i}{n} \quad (4.4)$$

$$SSE_T = \sum_i \Delta E_i^2 \quad (4.5)$$

$$\sigma_{\Delta E} = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta E_i^2}{n} - \left(\frac{\sum_i \Delta E_i}{n}\right)^2} = \sqrt{\frac{SSE_T}{n} - \overline{\Delta E}^2} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{\overline{\Delta E}} = \frac{\sigma_{\Delta E}}{\sqrt{n}} \quad (4.7)$$

$$\text{Energía Total} = E_T = n\overline{\Delta E} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{E_T} = n(\sigma_{\overline{\Delta E}}) = n \frac{\sigma_{\Delta E}}{\sqrt{n}} = \sqrt{n}(\sigma_{\Delta E}) \quad (4.9)$$

$$RMS = \sigma_{E_T} = \sqrt{SSE_T - \frac{E_T^2}{n}} \quad (4.10)$$

A partir del RMS se tiene el rango de incertidumbre del resultado. Para obtener el valor de atenuación se usa eq. 4.11.

$$\text{factor de atenuación } f_a = \frac{\text{Dosis sin barrera}}{\text{Dosis con barrera}} \quad (4.11)$$

Se obtiene el rango de incertidumbre de dicho factor a partir de la fórmula de propagación de errores eq. 4.12.

$$\Delta z = z \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \dots} \quad (4.12)$$



### 4.1.3. Valores de HVL, QVL y TVL reportados en literatura

A continuación se modifica el grosor o sección transversal de la pared de Pb, haciéndolo igual a los valores reportados en la literatura para HVL, QVL y TVL [49], con un número significativo de eventos con tal de tener un RMS bajo, del orden de menos del 10%. Se obtiene la dosis depositada, el RMS para el TVL, HVL, QVL y se reportan.

Tabla 4.1: Valores de HVL, QVL y TVL reportados

	Grosor [mm]	Factor de reducción
HVL	10.1	2
QVL	19	4
TVL	29.9	10

### 4.1.4. Simulación para comprobar el HVL

En la tabla 4.4 se pueden observar las condiciones de simulación del experimento para comprobar el valor del HVL para el  $^{54}\text{Mn}$  en Pb. Se utilizan varios tamaños de detector con tal de observar la dependencia de los resultados con el tamaño de detector.

Tabla 4.2: Condiciones de simulación primer experimento

Condición	Valor Exp 1	Valor Exp 2	Valor Exp 3
Distancia fuente-pared	20 cm	20 cm	20 cm
Material objetivo	Agua	Agua	Agua
Material de pared	Pb	Pb	Pb
Grosor pared	10.1 mm	10.1 mm	10.1 mm
Lado cubo detector	4 cm	2 cm	20 cm

### 4.1.5. Simulación para comprobar el QVL

Se desarrolla el mismo proceso, esta vez solo con un lado de detector de 20 cm para comprobar el factor de reducción de 4 esperado con un grosor de barrera de 19 mm.

Tabla 4.3: Condiciones de simulación segundo experimento

Variable	Valor
Distancia fuente-pared	20 cm
Material objetivo	Agua
Material de pared	Pb
Grosor pared	19 mm
Lado cubo detector	4 cm

### 4.1.6. Simulación para comprobar el TVL

Para comprobar el TVL, se usa un grosor de pared de 29.1 mm para comprobar el factor de reducción esperado de 10.

Tabla 4.4: Condiciones de simulación segundo experimento

Variable	Valor
Distancia fuente-pared	20 cm
Material objetivo	Agua
Material de pared	Pb
Grosor pared	29.1 mm
Lado de cubo detector	4 cm

## 4.2. Comparación con el NCRP: TVL del concreto

Un acelerador lineal usado en radioterapia produce espectros polienergéticos de haces de fotones además de contaminación causada por fotones y neutrones dependiendo de la energía de los electrones incidentes sobre el blanco. Para aceleradores de menos de 10 MV, la dosis depositada por neutrones se puede considerar despreciable. Además, los blindajes diseñados para proteger al personal ocupacional y al público de la radiación ionizante proveniente de los fotones tienen un grosor muy superior al necesario para proteger de la contaminación electrónica proveniente del haz.

### Composición del concreto

El concreto es un compuesto usualmente usado para el blindaje en zonas controladas debido a su bajo costo en comparación con otros materiales y utilidad para atenuar la radiación. Se encontraron dos composiciones de concreto usualmente usadas en simulaciones de Geant4 disponibles en foros de desarrolladores y expertos en [12] y [13]. Posteriormente revisando más a profundidad la literatura [46] se encontró congruencia entre los valores mencionados en estos foros y los reportados en entidades reconocidas. Resulta cuanto menos interesante que muchas de las referencias literarias disponibles en las cuales se basa el reporte en Ref [2] tan solo mencionan la densidad del material. En la tabla 4.5 se pueden observar las composiciones atómicas de dos concretos, simuladas en Geant4 por medio de la librería de materiales de Geant4. Dicha librería carga datos disponibles en el NIST y contiene propiedades de sección eficaz para los diversos tipos de partículas y energías que puedan entrar en contacto con el material propuesto. El concreto por otra parte es un compuesto no disponible directamente en el NIST y por lo tanto se debe construir en Geant4 definiendo un objeto tipo material el cual tiene una densidad y varios componentes, y añadiendo elementos con su cantidad relativa de masa porcentual en porcentaje o fracción.

En la tabla 4.6 se pueden observar rangos de densidad del concreto encontrados en la literatura. En la tabla 4.7 se pueden observar los valores reportados de TVL de concreto.

Nótese que para un mismo valor de voltaje de aceleración, diferentes autores reportan diferentes valores de TVL. Por esta razón en la tabla 4.7 se muestran los valores extremos que se encontraron en publicaciones. Se observa que los valores mas grandes para el TVL son los que se usan en el reporte 151 del NCRP lo que constituye una aproximación conservativa implícita que es adicional a las aproximaciones hechas en los cálculos cuya naturaleza es también siempre conservativa.

Tabla 4.5: Composición elemental de dos tipos de concreto usados

Elemento	Concreto 1 [12]	Concreto 2 [13]
Oxígeno	60.54 %	52 %
Silicio	22.79 %	32.5 %
Hidrógeno	9.97 %	0 %
Calcio	4.99 %	6 %
Aluminio	1.42 %	4 %
Hierro	0.28 %	4 %
Sodio	0 %	1.5 %

Tabla 4.6: Rangos de densidad

	Mínimo	Máximo
Densidad, $\rho$	2.2 [ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ]	2.4 [ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ] [2]

Tabla 4.7: TVL del concreto

Energía	Mínimo	Máximo
4 MeV	29.5 cm (Maruyama) [5]	35 cm (NCRP) [2]
6 MeV	31.7 cm (Maruyama) [5]	37 cm (NCRP) [2]

### 4.2.1. Diseño del experimento

#### Fuente usada

De forma similar a lo hecho con el isótopo  $^{54}\text{Mn}$ , se propone una fuente de fotones divergente, en este caso polienergético. En la literatura se cuenta con haces de radiación caracterizados como es el caso de [32], donde se caracterizaron varios haces producidos por diversos aceleradores. Para este experimento se hace uso de dos haces, uno de un acelerador Varian de 4MV en figura 4.3 y otro de un acelerador Varian de 6MV en figura 4.4. Estos espectros se obtienen de tablas de datos disponibles en el artículo mencionado, y se simulan en Geant4 por medio del GeneralParticleSource de Geant4. En este módulo se definen las propiedades

de un cañón de partículas, en este caso fotones. Esta fuente se define como puntual y de emisión divergente, con energías dispuestas por usuario como puntos de un histograma con la función `/gps/hist/point`.

Se limita el rango angular de emisión del haz de tal forma que cubra solamente la pared, ya que los fotones que no golpean contra la pared no generan un aporte significativo de dosis en el objetivo, disminuyendo así el número de fotones a simular y los tiempos necesarios para la simulación. Con las capacidades del GPS, también se pueden definir haces planos sin divergencia, o haces divergentes con una sección rectangular como podrían ser los de un acelerador. Los ángulos de emisión se limitan usando las funciones `/gps/ang/mintheta` y `/gps/ang/minphi`, los detalles de estas funciones se pueden encontrar en la guía de desarrollador de Geant4 [9].

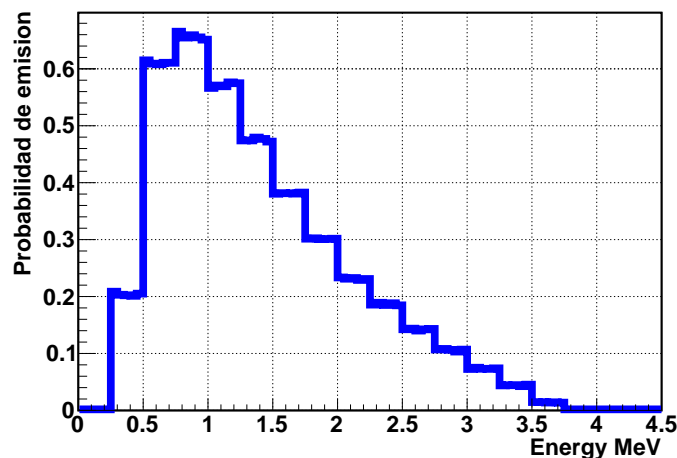


Figura 4.3: Espectro de entrada usado para simulación en Geant4 de histograma de un acelerador de 4MV [36]

#### 4.2.2. Fuente cónica

Una fuente cónica se construye a partir de una fuente puntual a la cual se le modifica la dirección angular por medio de `/gps/ang/rot1` y `/gps/ang/rot2`, dos vectores que sirven para definir la dirección del haz. Además se requiere definir un ángulo de apertura, un valor que se obtiene de acuerdo al tamaño del haz deseado. Para un haz cónico con un origen puntual, si se desea que el haz tenga un tamaño de 40 cm en el isocentro, se define un ángulo de 22.62 grados. El comando `/gps/ang/maxtheta` sirve para definir la mitad del ángulo de apertura deseado. Un ejemplo del macro usado para simular un haz cónico de 6 MV se observa código 4.2. Los detalles del histograma del espectro de 6 MV están disponibles en un macro aparte que se puede observar en código 4.3.

```
# Tipo de particula
/gps/particle gamma
# Fuente puntual
```

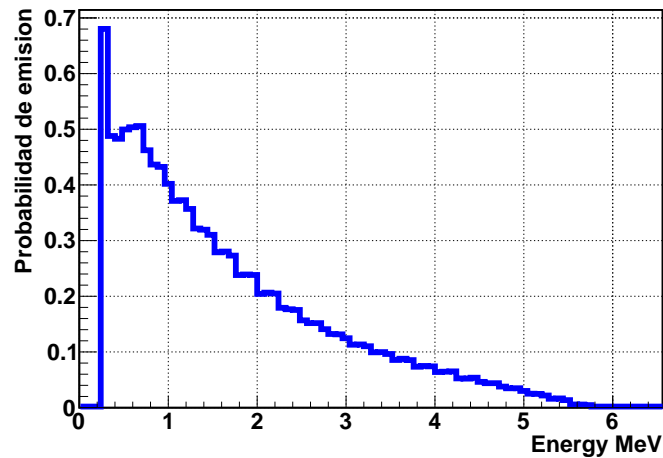


Figura 4.4: Espectro de entrada usado para simulación en Geant4 de histograma de un acelerador de 6MV [36]

```

/gps/pos/type Point
# Fuente isotropica
/gps/ang/type iso

# Dirigido a direcci n Z+
/gps/ang/rot1 0 1 0
/gps/ang/rot2 1 0 0
# Origen
/gps/pos/centre 0. 0. -1. m

# Apertura del cono
/gps/ang/maxtheta 11.31 deg

# Tipo de energia definida por usuario
/gps/ene/type User
/gps/hist/type energy
# Espectro de energia
/control/execute puntosHist6MV.in

```

Código 4.2: Macro usado para la creación de una fuente cónica con dirección Z+.

```

# Puntos del histograma para 6 MV
/gps/hist/point 0.250 0.0205291
#...
/gps/hist/point 3.000 0.0332878
/gps/hist/point 3.250 0.0285872
/gps/hist/point 5.750 0.0013430
#...
/gps/hist/point 6.000 0.0000416

```

Código 4.3: Espectro de un haz de 6 MV.

### Condiciones del experimento

- Tiempo aproximado de cada simulación: 30 minutos
- Número de eventos:  $10^8$

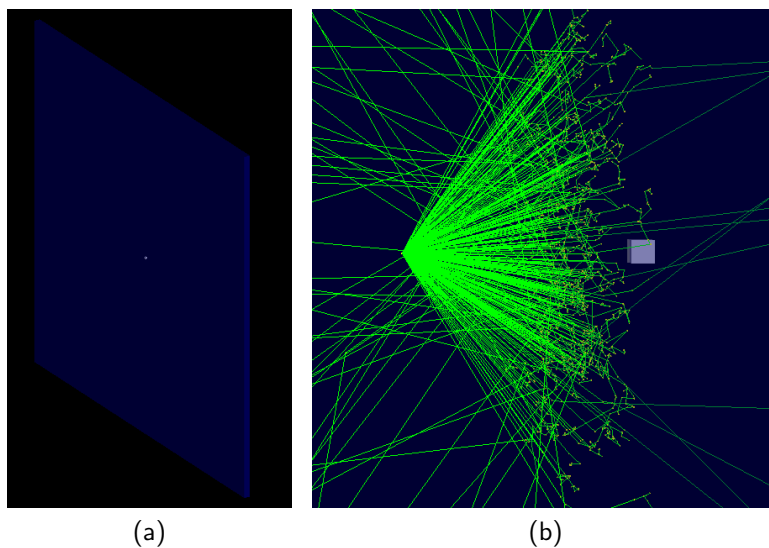


Figura 4.5: Experimento concreto a. Disposición experimento b. Rayos del haz disperso en verde, pared en azul y detector cúbico color violeta

#### 4.2.3. Simulación para comprobar el TVL para 4MV

Tabla 4.8: Condiciones del experimento

Variable	Unidad	Valor
Material objetivo	-	Agua
Material de pared	-	Concreto
Ubicación detector	-	A 30 cm de la pared
Distancia fuente-pared	cm	100
Lado de cubo detector	cm	20
Grosor de barrera	cm	29.5 a 35
Densidad de concreto	$[\frac{g}{cm^3}]$	2.2 a 2.4

#### 4.2.4. Simulación para comprobar el TVL para 6 MV

Variable	Unidad	Valor
Material objetivo	-	Agua
Material de pared	-	Concreto

Variable	Unidad	Valor
Ubicación detector	-	A 30 cm de la pared
Distancia fuente-pared	cm	100
Lado de cubo detector	cm	20
Grosor de barrera	cm	31.7 a 37.0
Densidad de concreto	$[\frac{g}{cm^3}]$	2.2 a 2.4

### 4.3. Simulación del búnker

Se propone la construcción de un búnker con sección transversal cuadrada de 10 metros de lado y 3 metros de alto. El isocentro del acelerador coincide con el punto de origen del sistema coordenado absoluto y 1.3 metros de distancia al piso del búnker.

Se definen paredes secundarias de 50 cm de ancho utilizadas para modelar adecuadamente la radiación dispersa y una pared primaria de grosor necesario para alcanzar el objetivo de diseño  $P$ . Las dimensiones del grosor de barrera primaria necesaria para atenuar y cumplir el objetivo de diseño se desarrolla siguiendo los lineamientos del NCRP 151 a partir de la ecuación {eq. 4.13}.

$$B_{pri} = \frac{(P)(d_{f-d})^2}{(W)(U)(T)} \quad (4.13)$$

Donde

- $P$  es el objetivo de diseño, o tasa de dosis equivalente límite semanal detras de la barrera.
- $B_{pri}$  es el inverso del factor de reducción necesario para obtener a  $P$ .
- $d_{f-d}^2$  es la distancia de la fuente al detector.
- $W$  es la carga de trabajo semanal o dosis equivalente semanal tratada en la instalación.
- $U$  es el factor de uso o tiempo relativo que el haz va a incidir sobre la barrera.
- $T$  es el factor de ocupación o tiempo que se espera de uso de la zona detras de la barrera.

Las condiciones para el cálculo del grosor de barrera son:

El factor de ocupación se considera como como 1 para una zona donde siempre va a estar presente el personal ocupacional, El factor de uso se define como 0.25 de forma conservativa. Se considera un promedio de 3 Gy por paciente en el isocentro, 45 pacientes por día y 5 días laborales para una carga de trabajo semanal  $W = 675$  Gy/semana. El isocentro está ubicado a 5 m del borde externo de la barrera primaria y a 5.3 m del punto de medida.

Tabla 4.10: Condiciones cálculo de barrera primaria

Condición	Unidad	Valor
Nro. Pacientes	-	45
Días semana	-	5
$T$	-	1
$U$	-	0.25
$d_{foco-iso}$	cm	100
$W$	$\frac{\text{Gy}}{\text{semana}}$	675
$d_{iso}$	m	5.3
Objetivo $P$	$\frac{\mu\text{Sv}}{\text{semana}}$	100

Tomando en cuenta todo lo anterior se desarrolla el cálculo de  $B_{pri}$

$$B_{pri} = \frac{(100 \times 10^{-6})(5,3 + 1)^2}{(675)(0,25)(1)} = 2,35 \times 10^{-5} \quad (4.14)$$

Donde  $B_{pri}$  es el 'factor de atenuación' del que se ha hablado previamente el presente documento. Para cumplir con este factor se requiere un grosor de barrera dado por un número  $n$  de TVLs:

$$n = \log \left( \frac{1}{2,35 \times 10^{-5}} \right) = 4,63 \quad (4.15)$$

El grosor de barrera  $t$  en cm está dado por el valor del TVL para radiación primaria, de 37 cm para  $TVL_1 = 37$  cm y  $TVL_e = 33$  cm

$$t = TVL_1 + (n - 1)TVL_e \quad (4.16)$$

$$t_{pri} = 37 \text{ cm} + (4,63 - 1)(33 \text{ cm}) = 156,7 \text{ cm} \simeq 157 \text{ cm} \quad (4.17)$$

### 4.3.1. Fuente plana cuadrada

El haz de un acelerador es plano y divergente. Las propiedades relacionadas con la distribución espacial del origen se definen por medio de los comandos **/gps/pos/** y sus derivados. Se define como origen un plano por medio de **/gps/pos/type Plane** y las dimensiones del plano se controlan con **/gps/pos/halfx** y **/gps/pos/halfy**. Además se requiere precisar la dirección normal de la figura geométrica por medio de los vectores **/gps/pos/rot1** y **/gps/pos/rot2**.



El plano de origen se define a 2 metros del isocentro y posteriormente se enfoca definiendo `/gps/ang/type focused` y la localización del foco por medio de `/gps/ang/focuspoint` a un metro del isocentro. El haz se enfoca en un punto en el espacio a un metro de distancia, creando una fuente virtual similar a una fuente puntual. Un metro después, en el isocentro, el haz se ha reflejado con la forma de un plano igual al plano origen.

La utilidad de la herramienta de enfoque consiste en que le brinda divergencia al haz y conserva la distribución espacial deseada y definida desde el origen. El punto de enfoque actúa como una fuente y el plano de origen crea la distribución plana buscada. El macro para la creación de la fuente divergente y plana está disponible en código 4.4.

```
# Tipo de partícula Gamma
/gps/particle gamma

# Cuadrado de 10 cm
/gps/pos/type Plane
/gps/pos/shape Square
/gps/pos/halfx 5. cm
/gps/pos/halfy 5. cm
# Posición de origen del plano
/gps/pos/centre 0. 0. -2. m

# Dirección del plano
/gps/pos/rot1 1 0 0 # Incidencia plano XY
/gps/pos/rot2 0 1 0

# Tipo "enfocado"
/gps/ang/type focused
# Localización del foco
/gps/ang/focuspoint 0. 0. -1. m
# Dirección del haz Z+
/gps/ang/rot1 0 1 0
/gps/ang/rot2 1 0 0

# Tipo de energía definido por usuario
/gps/ene/type User
/gps/hist/type energy
# Espectro de energía disponible en otro macro
/control/execute puntosHist6MV.in
```

Código 4.4: Macro para la creación de una fuente divergente plana y cuadrada

### 4.3.2. Construcción del maniquí

La sección del tronco del MIRD, tiene dimensiones de 70 cm de alto y sección transversal elíptica de lados de 40 cm y 20 cm. Se desea evaluar la dosis en una persona y por eso dicho fantoma resulta útil como aproximación a la geometría y material de un ser humano. Se evaluará la dosis en maniquí a un lado y otro de la barrera. En figura 4.6 se puede observar el fantoma ubicado en el sistema coordenado de la simulación, donde este se gira de forma

que el eje axial coincida con el eje x del sistema de coordenadas absoluto.

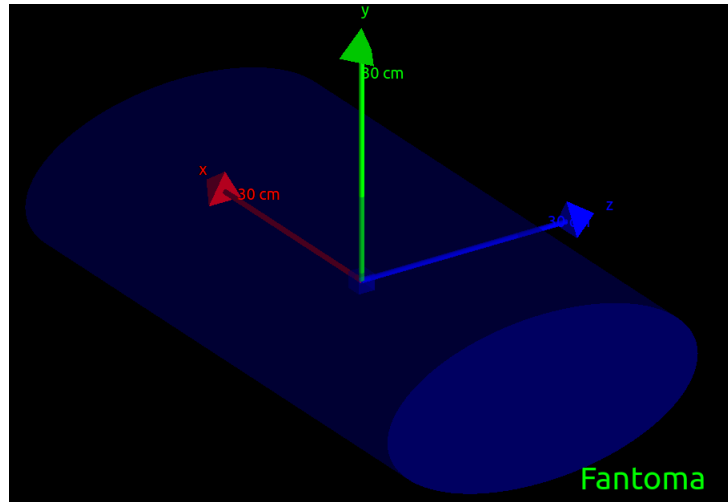


Figura 4.6: Fantoma del torso de un adulto ubicado en el sistema coordenado de la simulación

El material elegido para este maniquí es el mismo material de la esfera ICRU de cuatro componentes, al tener una composición representativa del tejido blando [17], razón por la que se suele usar para la calibración de cantidades operacionales que reflejen la dosis equivalente depositada en el cuerpo de una persona.

### 4.3.3. Simulación para calibración de la fuente

El proceso de calibración de la fuente se desarrolla con un volumen detector ubicado en el isocentro, en el centro del fantoma como se observa en las figuras 4.7a, 4.8a, con el objetivo de relacionar la cantidad de eventos con la dosis depositada en el isocentro por un haz incidente en los ejes Z y Y como se observa en las figuras 4.7b, 4.8b. El factor de calibración se obtiene a partir de una combinación de factores de escala C y de calibración M.

Considerando que la dosis tiene una relación lineal con el número de eventos dada por

$$D_{Total} = N\Delta D_i \quad (4.18)$$

Se obtiene que la dosis por evento está dada por

$$\Delta D_i = \frac{D_{Total}}{N} \quad (4.19)$$

La anterior función lineal se conserva en todos los puntos de espacio. Por ende las relaciones obtenidas en el isocentro asociadas al número de eventos, se cumplen para todos los puntos. Este es el caso de factor de calibración que convierte dosis simulada a una dosis resultado.

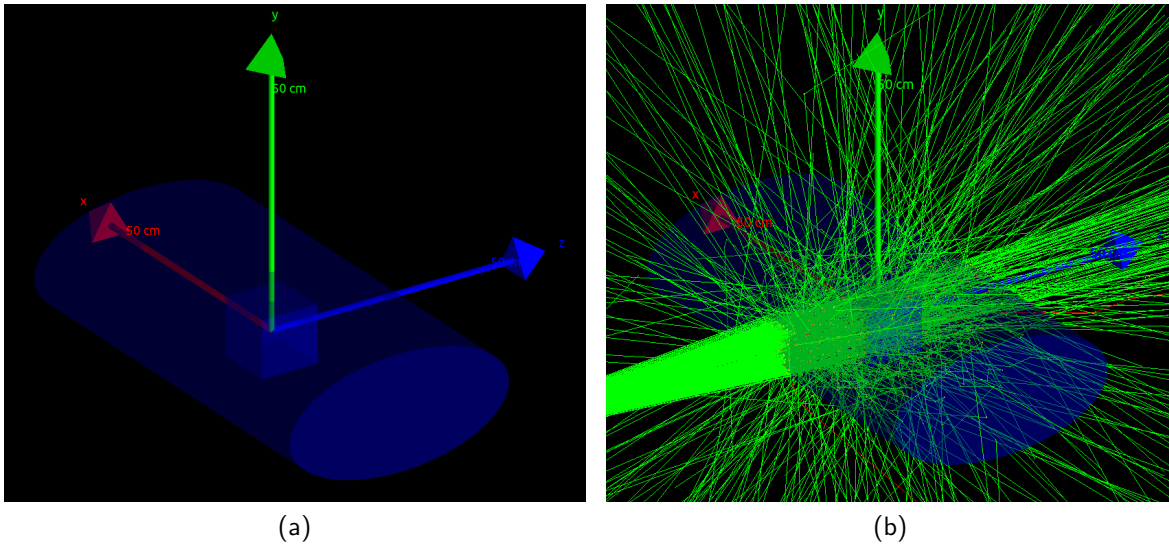


Figura 4.7: Experimento para la calibración del eje Z. a. Haz apagado. b. Haz encendido

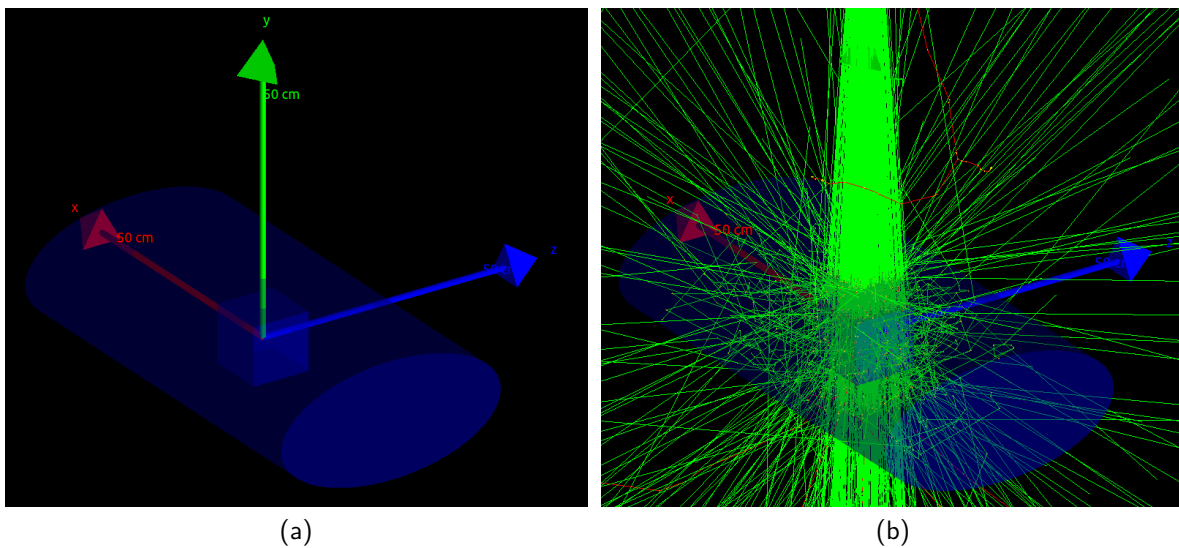


Figura 4.8: Experimento para la calibración del eje Y. a. Haz apagado. b. Haz encendido

Además el factor de escala relaciona la dosis de referencia medida en la calibración, con una dosis objetivo en el isocentro.

Para ilustrar lo anterior, si se supone que la dosis obtenida en una simulación de  $10^6$  eventos es de 1 nGy, y se toma 1 Gy de dosis objetivo, el factor de escala es de  $10^9$ . Es decir, si se mide 1 nGy en la simulación, eso equivale a 1 Gy de dosis resultado. De igual manera el factor de calibración se ve afectado por la cantidad de eventos de la simulación, si la dosis de referencia para  $10^6$  eventos es 1 nGy, y se mide 1 nGy en  $10^5$  eventos, eso equivale a 10 Gy de dosis resultado.

De esta forma queda claro que el factor de calibración del valor de referencia en la simulación  $M_{sim \Rightarrow ref}$  está dado por

$$C = \frac{\Delta D_{sim}}{\Delta D_{ref}} \quad (4.20)$$

$$C = \left( \frac{N_{ref}}{N_{sim}} \right) \left( \frac{D_{sim}}{D_{ref}} \right) \quad (4.21)$$

Y el factor de escala está dado por

$$M_{D_{ref}} = \frac{D_{ref}}{D_{cal}} \quad (4.22)$$

$$M_{1 \text{ Gy}} = \frac{1 \text{ Gy}}{D_{ref}} \quad (4.23)$$

Finalmente la dosis resultado está dada por

$$\text{Dosis resultado} = M \times C \times \text{Dosis medida} \quad (4.24)$$

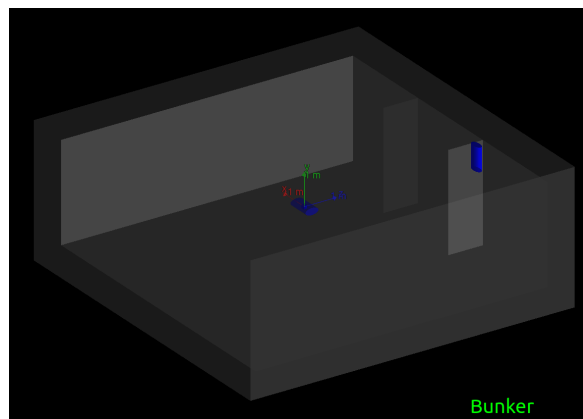
#### 4.3.4. Simulación para comprobación de objetivo de diseño en barrera primaria

Las condiciones del experimento están dadas en tabla 4.11.

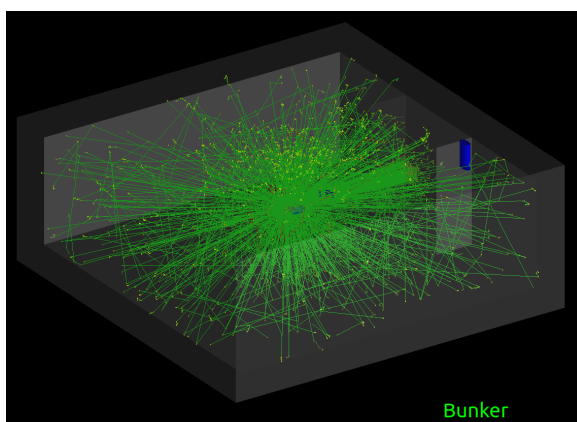
Tabla 4.11: Condiciones del experimento

Variable	Unidad	Valor
Material Fantoma	-	ICRU
Material de pared	-	Concreto NIST
Ubicación detector	-	A 30 cm de la pared
Lado de cubo detector	cm	20

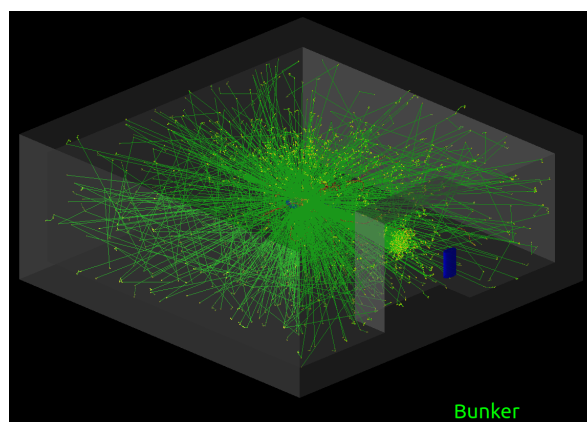
Variable	Unidad	Valor
$TVL_1$	cm	37
$TVL_e$	cm	33
Grosor de barrera	cm	157
Densidad de concreto	$\frac{g}{cm^3}$	2.35
Carga de trabajo W	$\frac{Gy}{semana}$	675



(a) Disposición del experimento



(b) Perspectiva desde el interior del búnker



(c) Perspectiva detrás de la barrera

Figura 4.9: Experimento del búnker

La disposición de los fantasmas ubicados en el isocentro y detrás de la barrera primaria se observa en figura 4.9a y en el haz primario dirigido a la barrera primaria en figura 4.9b y figura 4.9c. La sección transversal del búnker se puede observar en figura 4.10.

#### 4.3.5. Simulación para simular la radiación de fuga

En los reportes de radioprotección disponibles se considera que la radiación de fuga representa un 0.1% de la dosis depositada por el haz primario [2, 3, 1].

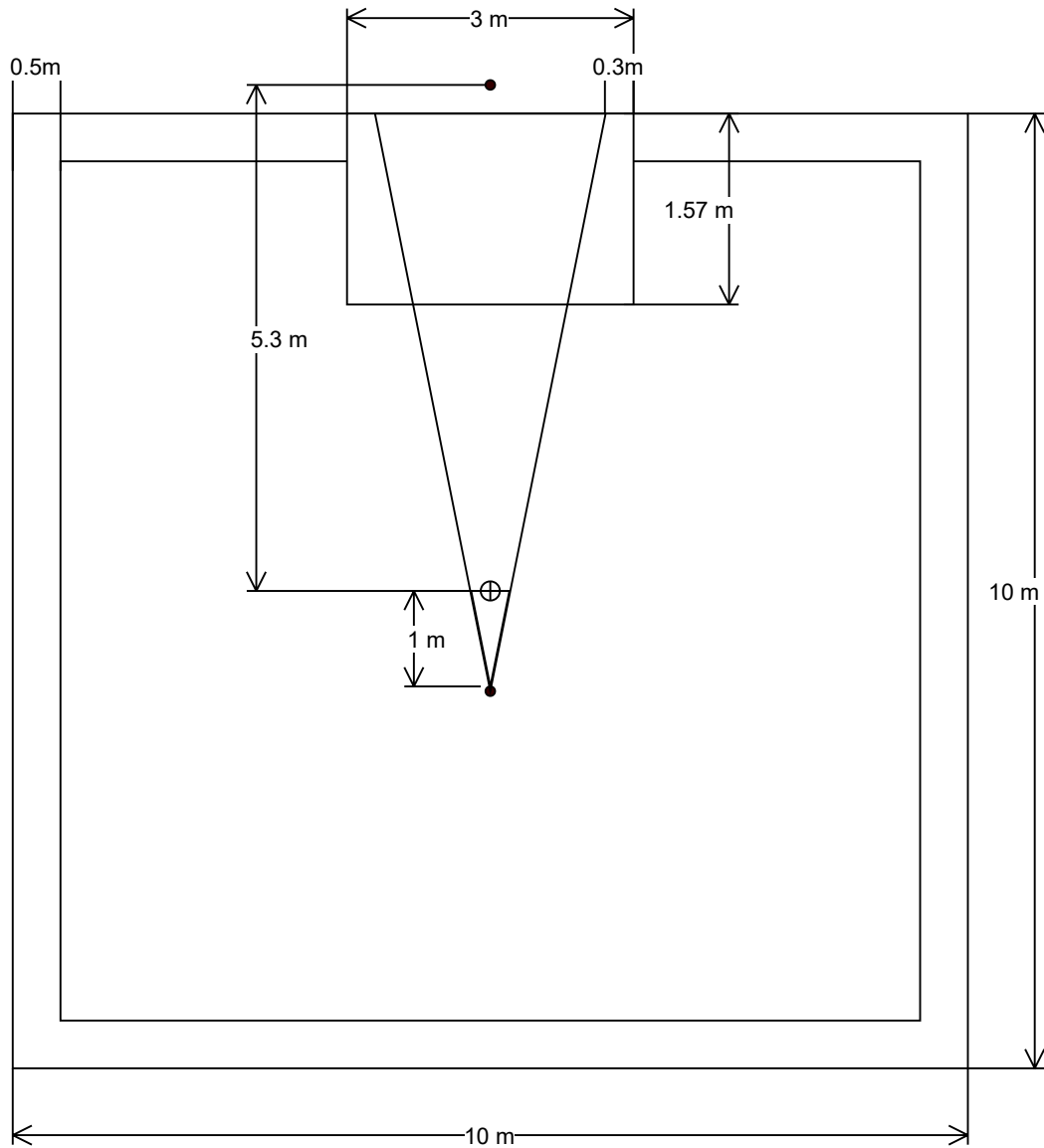


Figura 4.10: Plano del búnker

Con base en lo anterior se propone una fuente de radiación isotrópica tal que la dosis en el isocentro debido a la radiación de fuga corresponda a una milésima parte de la dosis depositada por el haz primario. Es decir,

$$\text{Dosis fuga} = \frac{\text{Dosis en isocentro}}{1000} \quad (4.25)$$

Debido a que el haz primario y la radiación de fuga tienen áreas de efecto distintas, no se puede hacer una comparación directa entre el número de eventos. En este caso se requiere una relación entre las intensidades, de tal forma que

$$\text{Intensidad de fuga} = \frac{\text{Intensidad haz primario}}{1000} \quad (4.26)$$

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{Numero de eventos}}{\text{Área de efecto}} \quad (4.27)$$

$$I_f = \frac{N_f}{A_f} = \left( \frac{1}{1000} \right) \left( \frac{N_p}{A_p} \right) \quad (4.28)$$

$$N_f = N_p \left( \frac{1}{1000} \right) \left( \frac{A_f}{A_p} \right) \quad (4.29)$$

Donde  $A_p$  describe el área transversal del haz primario en el isocentro y  $A_f$  describe el área de una esfera con centro en la fuente y radio en el isocentro. Otra forma de describir a  $A_p$  consiste en una aproximación conservativa a una capa esférica, que para valores pequeños del haz primario se aproxima al área de un círculo de diámetro igual al tamaño del haz.

Para un haz de 10 cm de lado se tiene que  $A_f = 1600A_p$ , es decir:

$$N_f = N_p \left( \frac{1}{1000} \right) (1600) = 1,6N_p \quad (4.30)$$

Por lo tanto si se desea que la radiación de fuga represente el 0.1 % de un haz de radiación primaria de 10 cm de lado, se requiere crear una fuente isotrópica que tenga 1.6 veces la cantidad de eventos del haz primario. Finalmente el espectro de la radiación de fuga se considera a primera aproximación como el mismo espectro de la radiación primaria.

# Capítulo 5

## Resultados y análisis de experimentos

### 5.1. Resultados del experimento computacional para comprobar el HVL del Pb

A partir de los resultados disponibles en tabla 5.1, se puede observar que hay una buena coincidencia del factor de reducción de dosis obtenido experimentalmente y el teórico que es igual a 2 para el HVL de el  $^{54}\text{Mn}$  en Pb. Se observa también que los resultados tienen una menor incertidumbre entre mayor es el volumen del detector, algo que se esperaba. Sin embargo esa diferencia en la incertidumbre no es tan grande y bien se podría usar un lado de detector de 4 cm sin sacrificar exactitud en los resultados.

Tabla 5.1: Resultados para el HVL del  $^{54}\text{Mn}$  en Pb

Lado cm	Dosis sin pared [nGy]	Dosis con pared [nGy]	Factor Reducción
4 cm	$6.41 \pm 0.09$	$3.32 \pm 0.06$	$1.93 \pm 0.04$
2 cm	$6.92 \pm 0.25$	$3.67 \pm 0.18$	$1.9 \pm 0.1$
20 cm	$4.63 \pm 0.02$	$2.35 \pm 0.01$	$1.97 \pm 0.01$

### 5.2. Resultados del experimento computacional para comprobar el QVL del Pb

En tabla 5.2 se puede observar que hay una buena coincidencia en los valores del QVL obtenidos, con un factor de reducción aproximadamente igual 4.



#### 5.4. DISCUSIÓN SOBRE LA VALIDACIÓN DE GEANT4: HVL, QVL Y TVL DEL Pb 43

Tabla 5.2: Resultados para el QVL del  $^{54}\text{Mn}$  en Pb

Lado cm	Dosis sin pared [nGy]	Dosis con pared [nGy]	Factor Reducción
20 cm	$13.42 \pm 0.03$	$3.41 \pm 0.02$	$3.94 \pm 0.02$

### 5.3. Resultados del experimento computacional para comprobar el TVL del Pb

En tabla 5.3 se puede observar que se obtiene un valor del factor de reducción cercano a 10, con una mayor desviación. Posiblemente en este punto se requieran más eventos para simular adecuadamente el fenómeno.

Tabla 5.3: Resultados para el TVL del  $^{54}\text{Mn}$  en Pb

Lado cm	Dosis sin pared [nGy]	Dosis con pared [nGy]	Factor Reducción
20 cm	$21.40 \pm 0.04$	$2.27 \pm 0.01$	$9.42 \pm 0.06$

### 5.4. Discusión sobre la validación de Geant4: HVL, QVL y TVL del Pb

Los resultados obtenidos en tabla 5.1, tabla 5.2 y tabla 5.3 indican una buena congruencia entre lo simulado con Geant4 y lo reportado en la literatura para los valores de grosor de barrera necesarios reducir la intensidad de un haz incidente 2, 4 y 10 veces. Con base en estos resultados, se adquiere confianza en la simulación para un haz monoenergético incidente en una barrera, un problema similar pero mucho más simplificado respecto al que se quiere abordar en el presente trabajo, en el que se requiere simular haces polienergéticos en el rango de los MeV como es el caso de un haz producido por un acelerador y materiales multielementales como lo es el concreto.

Como el resultado fue positivo para lo que se esperaba, continuamos con el siguiente experimento que consiste en comparar los valores reportados del TVL de concreto con los obtenidos en una simulación de Geant4.

### 5.5. Resultados del experimento computacional para comprobar el TVL para 4MV

Tabla 5.4: Resultados con un haz de 4MV

Voltaje [MV]	TVL [cm] [2, 5]	$\rho$ [ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ]	D1 [nGy]	D2 [nGy]	Factor Reducción
4	29.5	2.2	15.09 $\pm$ 0.05	2.07 $\pm$ 0.02	7.28 $\pm$ 0.07
4	29.5	2.4	15.09 $\pm$ 0.05	1.68 $\pm$ 0.02	9.00 $\pm$ 0.09
4	35.0	2.2	15.09 $\pm$ 0.05	1.34 $\pm$ 0.01	11.21 $\pm$ 0.13
4	35.0	2.4	15.09 $\pm$ 0.05	1.08 $\pm$ 0.01	14.02 $\pm$ 0.18

## 5.6. Resultados del experimento computacional para comprobar el TVL para 6 MV

Tabla 5.5: Resultados para un haz de 6 MV

Voltaje [MV]	TVL [cm][2, 5]	$\rho$ [ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ]	D1 [nGy]	D2 [nGy]	Factor Reducción
6	31.7	2.2	16.58 $\pm$ 0.07	2.54 $\pm$ 0.03	6.53 $\pm$ 0.07
6	31.7	2.4	16.58 $\pm$ 0.07	2.06 $\pm$ 0.02	8.03 $\pm$ 0.09
6	37.0	2.2	16.58 $\pm$ 0.07	1.80 $\pm$ 0.02	9.24 $\pm$ 0.12
6	37.0	2.4	16.58 $\pm$ 0.07	1.44 $\pm$ 0.02	11.52 $\pm$ 0.16

## 5.7. Discusión sobre el TVL del concreto y el NCRP

Los resultados indican que hay una fuerte dependencia del valor del TVL como función de la densidad del concreto y su composición ya que al variar la densidad de 2.2 a 2.4 produce cambios bastante significativos en el factor de reducción. Por otro lado se hicieron experimentos cambiando la composición del concreto en donde no se produjeron cambios apreciables. De la misma manera distintos autores reportan diferentes valores de TVL. Se observa en general que además de la fuerte dependencia con la densidad ya que para los valores de TVL mas pequeños reportados, los resultados son cercanos pero no alcanzan a llegar a un factor de reducción de la dosis de 10 y que los valores de TVL reportados mas grandes dan como resultado un factor de reducción cercano a 10 pero que en todo caso siempre es mayor. En resumen, se encuentra que el factor esperado de 10 se encuentra dentro del rango de los valores simulados lo cual muestra que los resultados de la simulación son también coherentes y válidos en este caso de una simulación mas compleja que la del  $^{54}\text{Mn}$ .

Vale la pena aclarar que al simular la reducción de dosis para distintos grosores de TVL como los propuestos por diversos autores en la literatura, no se puede encontrar un valor de reducción de dosis de 10 para todos los valores ni para dos valores de densidad diferentes al mismo tiempo y por esto se verifica que el factor de reducción de 10 caiga dentro del

rango que se genera debido a cambios en densidad y TVL propuestos por cada autor. Esta diferencia en los resultados indican la importancia de reportar un TVL acompañado de otros parámetros como la densidad y composición del concreto así como el espectro utilizado.

Como el resultado es coherente con lo reportado en la literatura, se puede continuar con la simulación del búnker.

## 5.8. Resultados de la calibración del haz

Como el gantry puede rotar e irradiar a nuestro maniquí en distintas direcciones entonces se pueden obtener factores de calibración a dosis dependiendo del eje de irradiación. Para la simulación se supondrá que la dosis prescrita se distribuirá en los 4 ejes de irradiación por partes iguales.

Tabla 5.6: Resultados de la calibración

Variable	Unidad	Z	Y
Dosis Objetivo	Gy	1	1
$D_{ref}$	Gy	3.30E-09	4.80E-09
$n_{ref}$	-	1.00E+05	1.00E+05
$M_{cal}$	-	3.03E+08	2.08E+08

## 5.9. Resultados de la simulacion del bunker

En tabla 5.7 se evidencian los resultados de la simulación con  $10^9$  eventos para las fuentes de radiación primaria y de fuga. La simulación entrega un valor de dosis y un valor de RMS que es la desviación estándar de los resultados. Estos valores de dosis y rms deben ser corregidos y escalados de acuerdo a la ecuación eq. 4.24.

Tabla 5.7: Resultados de la simulación para las diferentes ubicaciones del detector

Variable	Unidad	Z+	Y-	Z-	Y+
$D_{fuga}$	Gy	2.70E-14	2.86E-14	2.70E-14	2.70E-14
$D_p$	Gy	5.29E-12	2.23E-15	0.00E+00	1.16E-15
RMS $D_p$	Gy	2.31E-13	7.91E-16	0.00E+00	5.29E-16
RMS Fuga	Gy	1.40E-14	1.61E-14	1.61E-14	1.61E-14
$n_{sim}$	-	1.00E+09	1.00E+09	1.00E+09	1.00E+09

Finalmente al sumar las contribuciones de dosis de radiación primaria y de fuga, se obtiene la dosis resultado en tabla 5.8, con un valor de  $27.52 \mu\text{Sv}$  y un valor de incertidumbre de  $\pm 2,38 \mu\text{Sv}$  para un rango de confianza del 95 %.

Tabla 5.8: Dosis resultante a 30 cm detrás de la barrera

Variable	Unidad	Valor
Dosis resultado	$\mu\text{Sv}$	27.52
Incertidumbre	$\mu\text{Sv}$	2.38

## 5.10. Discusión sobre la simulación del bunker

Se esperaba un valor de  $100 \mu\text{Sv}$ , lo cual indica que se está sobrestimando el grosor necesario de barrera primaria para atenuar la radiación por un factor de 3.6 aproximadamente. Hay varias razones para esto, en primer lugar en los cálculos por razones conservativas al momento de calcular la barrera primaria toman como si no hubiese fantoma, considerando el isocentro como un punto del haz donde la radiación tiene 3 Gy y se propaga en la dirección del haz con una intensidad que disminuye con el inverso cuadrado de la distancia a la fuente, cuando en realidad el fantoma genera una atenuación sobre el haz y la radiación dispersa que se produce en el interior. Por otra parte los reportes no tienen en cuenta variaciones en el tamaño del haz y por razones conservativas siempre toman el mayor tamaño de campo posible, mientras que la simulación tiene un tamaño de haz cuadrado de 10 cm de lado.

# Capítulo 6

## Conclusiones y perspectivas

Por medio del experimento hecho con el plomo y un isótopo de  $^{54}\text{Mn}$  se logró comprobar que Geant4 simula correctamente los fenómenos de interacción entre la radiación y la materia, al obtener factores de atenuación de dosis acordes a lo reportado en la literatura. Por lo tanto Geant4 se plantea como una herramienta útil para radioprotección.

Los experimentos con el concreto dieron como resultado un factor de reducción de 10 incluido dentro del rango de factores de reducción que se obtienen con los TVLs reportados por diversos autores en la literatura, lo cual indica la correcta simulación de fenómenos de interacción radiación materia entre un haz polienergético de 6 MV y un material multielemental como el concreto. Se encontró una relación entre la densidad del concreto y el valor del TVL obtenido, lo que indica que el tipo de mezcla hecha en una construcción afecta el valor de atenuación de las paredes construidas y que este no es un valor fijo como lo plantean los referentes técnicos para el cálculo de blindajes. Sería una buena práctica por parte de las instituciones encargadas de hacer reportes proponer rangos para los valores de TVL y dar más información acerca de las condiciones experimentales o de simulación con las cuales se obtuvo este valor como el la densidad del concreto, su composición exacta y el espectro del acelerador usado.

La exactitud de los resultados obtenidos en la validación de los factores de atenuación con el Pb y el concreto dan indicios de que las aproximaciones hechas al usar un fuentes puntuales y un perfil intensidad de haz plano, sin la necesidad de simular todos los procesos físicos involucrados en la generación de rayos X dentro de un acelerador, son suficientes y apropiadas. Sin embargo esta hipótesis debería ser comprobada y hasta el momento no se han encontrado artículos, reportes o trabajos de grado donde hayan hecho este tipo de comparación, para saber que tanto error inducen estas simplificaciones. Si se demostrara que estas aproximaciones no inducen un error significativo en los resultados, se podría usar la metodología propuesta a lo largo de este trabajo de grado para el cálculo de barreras, la cual no requiere simulaciones muy extensas y sería útil para los profesionales encargados de diseñar áreas controladas.

El valor de tasa dosis equivalente obtenida detrás de la barrera primaria es menor al obtenido con los cálculos analíticos desarrollados con la metodología propuesta en los manuales de radioprotección, lo cual indica una sobrestimación del grosor de la barrera. Es pertinente continuar esta línea de investigación y explorar las posibles variaciones entre los valores obtenidos con los cálculos analíticos propuestos en los manuales y los obtenidos por medio de una simulación en un pasillo, en la puerta y alrededor del búnker. Además es pertinente usar diversos tamaños de haz, factores de uso y diseños de búnker para explorar la variación entre lo simulado y lo calculado para encontrar posibles fallos en las metodologías propuestas por los reportes y manuales de radioprotección.

### **Perspectivas**

Los tiempos necesarios para la simulación de  $10^6$  eventos en el búnker fueron de 35 horas aproximadamente con la capacidad de cómputo actual (un servidor de 8 núcleos con procesadores intel Xeon E5), y un total de 70 horas debido a que se simuló la radiación de fuga y la radiación primaria aparte. El tiempo requerido para obtener la dosis depositada en otras zonas dentro y alrededor del búnker no requiere un tiempo muy superior debido a la existencia de una herramienta llamada 'multidetector', la cual permite crear múltiples volúmenes sensibles. Debido a su complejidad, se propone la implementación de la herramienta de múltiples detectores para futuros trabajos. Con un servidor más potente se podría obtener una simulación con uno o dos ordenes de magnitud mayor de eventos, en múltiples puntos alrededor del búnker, en pocos días o incluso en menos de un día. Con más capacidad de cómputo se podría hacer simulación similar a la hecha en este trabajo de grado en menos de 4 horas. Para una optimización aún mayor de los tiempos de simulación, se podría implementar una herramienta que sirva para almacenar resultados anteriores de simulación y que permita disminuir los tiempos de otras simulaciones o por si se necesitan hacer cambios menores o repetir la simulación.

La construcción de una réplica virtual del búnker a partir de los planos arquitectónicos por parte del equipo de ingenieros y arquitectos con un software CAD para su posterior importación a Geant4 permitiría hacer una comprobación previa del cumplimiento de los objetivos de diseño y evitar errores humanos por no tomar en cuenta algún detalle de la complejidad espacial de la construcción y sus alrededores u omisiones por parte del equipo de construcción, errores que pueden surgir a partir de fallas en la comunicación entre los físicos y los ingenieros o por limitaciones formativas de uno u otro lado. Los errores en una fase de diseño se pueden corregir fácilmente y sin mayores sobrecostos, sin embargo una vez construida la instalación, estos errores incluso si son pequeños generan sobrecostos muy altos. La posibilidad de explorar diseños alternativos, múltiples condiciones de factores de uso acordes a las necesidades de la institución, futuros cambios de tecnología o incluso una variedad de condiciones como tipos de materiales y concretos usados, de forma precisa y sin generar confusiones ni fallas, le puede brindar al físico un mayor alcance en beneficio de la protección de personal ocupacional y el público. Finalmente sería útil validar los resultados absolutos de simulaciones, diseños y estudios ambientales de radiación de salas existentes para encontrar coincidencias y discrepancias en los valores obtenidos de dosis equivalente.

# Bibliografía

- [1] *Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities*. Inf. téc. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2006. URL: [Link].
- [2] *Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities: Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements*. en. Inf. téc. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements, 2005.
- [3] Patrick Horton y David Eaton. *Design and Shielding of Radiotherapy Treatment Facilities: IPEM Report 75 2nd Edition: IPEM Report 75, 2nd Edition*. en. Inf. téc. IOP Publishing, jul. de 2017. DOI: 10.1088/978-0-7503-1440-4. URL: [Link] (visitado 02-09-2020).
- [4] Andrew Mc Morrow. "Radiation Shielding and Bunker Design". en. En: *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research* 18.1 (mayo de 2019). ISSN: 25741241. DOI: 10.26717/BJSTR.2019.18.003106. URL: [Link] (visitado 31-08-2020).
- [5] Takashi Maruyama y col. "ATTENUATION OF 4-32MV X-RAYS IN ORDINARY CONCRETE, HEAVY CONCRETE, IRON AND LEAD". en. En: (), pág. 8.
- [6] Alex F Bielajew. "Fundamentals of the Monte Carlo Method for Neutral and Charged Particle Transport". en. En: (), pág. 356.
- [7] Fernando Cristancho. *Notas de Clases de Instrumentacion Nuclear*. 2010.
- [8] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. en. 4th ed. Hoboken, N.J: John Wiley, 2010. ISBN: 978-0-470-13148-0.
- [9] "Book For Application Developers". En: (), pág. 445.
- [10] Tomasz Piotrowski y col. "Monte Carlo Simulations for Optimization of Neutron Shielding Concrete". en. En: (), pág. 14.
- [11] Sh. Sharifi, R. Bagheri y S.P. Shirmardi. "Comparison of Shielding Properties for Ordinary, Barite, Serpentine and Steel–Magnetite Concretes Using MCNP-4C Code and Available Experimental Results". en. En: *Annals of Nuclear Energy* 53 (mar. de 2013), págs. 529-534. ISSN: 03064549. DOI: 10.1016/j.anucene.2012.09.015. URL: [Link] (visitado 25-11-2020).
- [12] *Examples/Advanced/Underground\_physics/Src/DMXDetectorMaterial.lcc* · *75c7fd177dc4853b8a93aaedc78d6037aa36dba6* · *Geant4 / Geant4*. en. URL: [Link] (visitado 25-11-2020).

- [13] *Geant4.10: FCALMaterialConsultant Class Reference*. URL: [Link] (visitado 25-11-2020).
- [14] WS Snyder. "Estimates of Specific Absorbed Fractions for Monoenergetic Photon Sources Uniformly Distributed in Various Organs of a Heterogeneous Phantom". En: *MIRD pamphlet 5* (1978).
- [15] "Report 39". En: *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements* os20.2 (feb. de 1985), NP-NP. ISSN: 1473-6691. DOI: 10.1093/jicru/os20.2.Report39. URL: [Link] (visitado 25-05-2021).
- [16] I ICRU. "Radiation Quantities and Units". En: *ICRU Report 33* (1980).
- [17] D. R. White y col. "Report 44". En: *Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements* os23.1 (ene. de 1989), NP-NP. ISSN: 1473-6691. DOI: 10.1093/jicru/os23.1.Report44. URL: [Link] (visitado 07-04-2021).
- [18] *NIST: X-Ray Mass Attenuation Coefficients - Table 2*. URL: [Link].
- [19] Stanley H. Benedict. "Review of Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students". en. En: *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 5.3 (jul. de 2004), págs. 91-92. ISSN: 1526-9914. DOI: 10.1120/jacmp.2021.25315. URL: [Link] (visitado 15-05-2021).
- [20] E. J. Waller y col. "Experimental and Computational Determination of Neutron Dose Equivalent around Radiotherapy Accelerators". eng. En: *Radiation Protection Dosimetry* 107.4 (2003), págs. 225-232. ISSN: 0144-8420. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006394.
- [21] Pedro Andreo. "Monte Carlo Simulations in Radiotherapy Dosimetry". En: *Radiation Oncology* 13.1 (jun. de 2018), pág. 121. ISSN: 1748-717X. DOI: 10.1186/s13014-018-1065-3. URL: [Link] (visitado 25-08-2020).
- [22] Artur Omar, Pedro Andreo y Gavin Poludniowski. "A Model for the Energy and Angular Distribution of x Rays Emitted from an X-Ray Tube. Part I. Bremsstrahlung Production". en. En: *Medical Physics* n/a.n/a (). ISSN: 2473-4209. DOI: 10.1002/mp.14359. URL: [Link] (visitado 25-08-2020).
- [23] Artur Omar, Pedro Andreo y Gavin Poludniowski. "A Model for the Energy and Angular Distribution of x Rays Emitted from an X-Ray Tube. Part II. Validation of x-Ray Spectra from 20 to 300 kV". en. En: *Medical Physics* n/a.n/a (). ISSN: 2473-4209. DOI: 10.1002/mp.14360. URL: [Link] (visitado 25-08-2020).
- [24] Christopher J Werner y col. "MCNP Users Manual-Code Version 6.2". En: *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos* (2017).
- [25] J. Sempau y col. "An Algorithm for Monte Carlo Simulation of Coupled Electron-Photon Transport". en. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 132.3 (nov. de 1997), págs. 377-390. ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/S0168-583X(97)00414-X. URL: [Link] (visitado 26-08-2020).
- [26] J. Sempau y col. "Experimental Benchmarks of the Monte Carlo Code Penelope". en. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 207.2 (jun. de 2003), págs. 107-123. ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/S0168-583X(03)00453-1. URL: [Link] (visitado 26-08-2020).



- [27] S. Agostinelli y col. "Geant4—a Simulation Toolkit". en. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 506.3 (jul. de 2003), págs. 250-303. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8. URL: [Link] (visitado 26-08-2020).
- [28] J. Allison y col. "Geant4 Developments and Applications". En: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 53.1 (feb. de 2006), págs. 270-278. ISSN: 1558-1578. DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
- [29] J. Allison y col. "Recent Developments in Geant4". en. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 835 (nov. de 2016), págs. 186-225. ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125. URL: [Link] (visitado 26-08-2020).
- [30] Thomas Keffer. *Why C++ Will Replace FORTRAN (or, at Least, Why It Should)*. 1994. URL: [Link] (visitado 26-08-2020).
- [31] Daniel Elton. *Why Physicists Still Use Fortran*. 2015. URL: [Link] (visitado 26-08-2020).
- [32] T Shimozato y col. "Calculation of 10 MV X-Ray Spectra Emitted by a Medical Linear Accelerator Using the BFGS Quasi-Newton Method". en. En: *Physics in Medicine and Biology* 52.2 (ene. de 2007), págs. 515-523. ISSN: 0031-9155, 1361-6560. DOI: 10.1088/0031-9155/52/2/014. URL: [Link] (visitado 02-09-2020).
- [33] Ahmed Meghzifene y col. "IAEA Contribution to International Harmonization of Guidelines for Clinical Medical Radiation Physicists". en. En: *Medical Physics* 40.6Part26 (2013), págs. 441-441. ISSN: 2473-4209. DOI: 10.1118/1.4815410. URL: [Link] (visitado 25-08-2020).
- [34] Raymond K. Wu y Patton H. McGinley. "Neutron and Capture Gamma along the Mazes of Linear Accelerator Vaults". eng. En: *Journal of Applied Clinical Medical Physics* 4.2 (2003), págs. 162-171. ISSN: 1526-9914. DOI: 10.1120/jacmp.v4i2.2532.
- [35] R. C. McCall, T. M. Jenkins y R. A. Shore. "Accelerator Produced Neutrons in a Concrete Room". en. En: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 26.1 (feb. de 1979), págs. 1593-1602. ISSN: 0018-9499. DOI: 10.1109/TNS.1979.4330446. URL: [Link] (visitado 06-09-2020).
- [36] Daryoush Sheikh-Bagheri y D. W. O. Rogers. "Monte Carlo Calculation of Nine Megavoltage Photon Beam Spectra Using the BEAM Code". en. En: *Medical Physics* 29.3 (feb. de 2002), págs. 391-402. ISSN: 00942405. DOI: 10.1118/1.1445413. URL: [Link] (visitado 02-09-2020).
- [37] *Radiation Software / Grove Software*. URL: [Link] (visitado 31-08-2020).
- [38] H. S. Kim y col. "Evaluation of the Photoneutron Field Produced in a Medical Linear Accelerator". eng. En: *Radiation Protection Dosimetry* 123.3 (2007), págs. 323-328. ISSN: 0144-8420. DOI: 10.1093/rpd/ncl162.
- [39] Mansour Zabihzadeh y col. "Monte Carlo Estimation of Photoneutrons Contamination from High-Energy X-Ray Medical Accelerators in Treatment Room and Maze: A Simplified Model". eng. En: *Radiation Protection Dosimetry* 135.1 (jul. de 2009), págs. 21-32. ISSN: 1742-3406. DOI: 10.1093/rpd/ncp097.
- [40] Manije Beigi, Fatemeh Afarande y Hosein Ghiasi. "Safe Bunker Designing for the 18 MV Varian 2100 Clinac: A Comparison between Monte Carlo Simulation Based

- upon Data and New Protocol Recommendations". En: *Reports of Practical Oncology and Radiotherapy* 21.1 (2016), págs. 42-49. ISSN: 1507-1367. DOI: 10.1016/j.rpor.2015.10.003. URL: [Link] (visitado 25-08-2020).
- [41] M. Vilches y col. "Monte Carlo Simulation of the Electron Transport through Thin Slabs: A Comparative Study of Penelope, Geant3, Geant4, Egsnrc and Mcnpx". en. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 254.2 (ene. de 2007), págs. 219-230. ISSN: 0168583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2006.11.061. URL: [Link] (visitado 02-08-2021).
- [42] L Maigne y col. "Comparison of GATE/GEANT4 with EGSnrc and MCNP for Electron Dose Calculations at Energies between 15 keV and 20 MeV". en. En: *Physics in Medicine and Biology* 56.3 (feb. de 2011), págs. 811-827. ISSN: 0031-9155, 1361-6560. DOI: 10.1088/0031-9155/56/3/017. URL: [Link] (visitado 02-09-2020).
- [43] John Paul Archambault y Ernesto Mainegra-Hing. "Comparison between EGSnrc, Geant4, MCNP5 and Penelope for Mono-Energetic Electron Beams". en. En: *Physics in Medicine and Biology* 60.13 (jul. de 2015), págs. 4951-4962. ISSN: 0031-9155, 1361-6560. DOI: 10.1088/0031-9155/60/13/4951. URL: [Link] (visitado 02-09-2020).
- [44] Emily Poon y Frank Verhaegen. "Accuracy of the Photon and Electron Physics in GEANT4 for Radiotherapy Applications: Photon and Electron Physics in GEANT4". en. En: *Medical Physics* 32.6Part1 (mayo de 2005), págs. 1696-1711. ISSN: 00942405. DOI: 10.1118/1.1895796. URL: [Link] (visitado 02-08-2021).
- [45] Pedro Arce y col. "A Proposal for a Geant4 Physics List for Radiotherapy Optimized in Physics Performance and CPU Time". en. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 964 (jun. de 2020), pág. 163755. ISSN: 01689002. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163755. URL: [Link] (visitado 02-08-2021).
- [46] Francesco d'Errico. "NCRP Report No. 144—Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities National Council on Radiation Protection and Measurements Issued 31 December 2003; Revised 7 January 2005: NCRP, Bethesda, MD, USA ISBN: 0-929600-77-0, 499 Pp, 100(Hardcover), 80 (Electronic File Downloadable from <http://ncrppublications.Org>)". En: (2005).
- [47] Annalie Ronaldson. "Validation of Linac Bunker Shielding Calculations". en. En: (), pág. 1.
- [48] John Kildea. "An Evaluation of NCRP Report 151: Radiation Shielding Design for Radiotherapy Facilities, and a Feasibility Study for 6 MV Open-Door Treatments in an Existing High-Energy Radiation Therapy Bunker." en. Tesis doct. Ottawa: Library y Archives Canada = Bibliothèque et Archives Canada, 2011. ISBN: 9780494684290.
- [49] David S. Smith y Michael G. Stabin. "EXPOSURE RATE CONSTANTS AND LEAD SHIELDING VALUES FOR OVER 1,100 RADIONUCLIDES". en. En: *Health Physics* 102.3 (mar. de 2012), págs. 271-291. ISSN: 0017-9078. DOI: 10.1097/HP.0b013e318235153a. URL: [Link] (visitado 10-06-2021).