



***“Análisis de métodos de reducción de varianza  
aplicados a cálculos de blindajes mediante el  
método Monte Carlo”***

***ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES  
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE***

**Alumno: Mildenberger, Sebastian Alejandro**

**Director: Bazzana, Santiago**

**Co-director: Ramos, Ricardo Luis**



**UNSAM**

UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## Índice

<b>1. Resumen</b> .....	1
<b>2. Introducción</b> .....	2
2.1. Dosimetría .....	2
2.2. Interacción de la radiación ionizante con la materia.....	2
2.2.1. Partículas cargadas.....	2
2.2.2. Partículas sin carga.....	3
2.3. Blindaje.....	5
2.4. Transporte de partículas.....	8
2.5. El método Monte Carlo.....	9
2.5.1. MCNP.....	10
2.5.2. Promedios, variancias en Monte Carlo.....	11
2.5.3. Reducción de varianza.....	12
2.5.4. Figura de mérito (FOM).....	15
<b>3. Materiales y Métodos</b> .....	17
3.1. Descripción del modelo .....	17
3.2. Comparación entre diferentes formas de cálculo de dosis .....	20
3.3. Métodos de reducción de varianza.....	20
3.3.1. División de geometría mediante esquema de importancias: .....	21
3.3.2. Transformación exponencial .....	22
3.3.3. Ventanas de pesos.....	22
3.3.4. Combinación de métodos.....	23
3.3.5. Ampliación del análisis: pared de 20 cm de espesor .....	23
<b>4. Resultados y Discusiones</b> .....	24
4.1. Comparación entre el <i>Tally F6</i> y <i>Tally F4</i> .....	24
4.2. División de geometrías mediante esquema de importancias .....	25
4.3. Transformación Exponencial .....	27
4.4. Ventanas de pesos.....	28



4.5. Combinación de métodos.....	30
4.6. Ampliación del análisis: pared de 20 cm de espesor.....	31
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>35</b>
<b>6. Referencias bibliográficas .....</b>	<b>36</b>
<b>7. Anexos.....</b>	<b>37</b>
7.1. Anexo 1 Unidades y medidas.....	37
7.2. Anexo 2: Tablas de coeficientes másicos de absorción de energía .....	40
7.3. Anexo 3: Entrada de un caso corrido con MCNP .....	42



## 1. Resumen

Las radiaciones ionizantes pueden alterar las estructuras químicas de las moléculas que forman las células de nuestro organismo con consecuencias nocivas. Una manera eficiente para el control de la exposición a la irradiación externa consiste en la interposición de blindajes de materiales adecuados entre las fuentes de radiación y las personas expuestas. El diseño de estos blindajes de radiación debe asegurar que la tasa de dosis que reciban las personas expuestas no ponga en riesgo su integridad y puedan desarrollar sus tareas de manera segura.

Uno de los programas más utilizados en dicho cálculo es MCNP (Monte Carlo N-Particle), basado en los métodos numéricos Monte Carlo para simular el transporte de partículas en geometrías complejas. El programa permite modelar todo tipo de escenarios mediante la especificación de distintas geometrías, materiales, fuentes de radiación y ofrece diferentes maneras para estimar la tasa de dosis. Por otro lado, si bien los resultados obtenidos son más precisos que los conseguidos por otros métodos de cálculo, los tiempos implicados resultan muy altos. Para disminuir estos tiempos, el código implementa diferentes métodos de reducción de varianza que permiten enfocar el cálculo en alguna región del espacio modelado.

Uno de los objetivos de este trabajo es el aprendizaje y uso de la herramienta MCNP, complementado mediante búsqueda bibliográfica relacionada al tema, como así también el estudio de los fundamentos teóricos de la dosimetría, cálculo de blindajes y métodos Monte Carlo.

Para ello, a modo de inicializarse en cálculos de dosimetría mediante MCNP, se comparan diferentes formas que tiene este programa para calcular dosis absorbida por un fantoma debido a fotones. Se determinan y analizan los resultados de los cálculos de tasas de dosis, obtenidos a partir de la deposición de energía, y mediante la fluencia de partículas, junto con los factores de kerma correspondientes.

El otro objetivo de este trabajo consiste en analizar diferentes herramientas relacionadas con la optimización de cálculos de blindajes de radiación. El estudio se enfoca en analizar la utilidad de los métodos de reducción de varianza, esquema de importancias, transformación exponencial y ventanas de pesos aplicados a un sistema con radiación gamma, y al estudio de su sensibilidad ante la modificación de los distintos parámetros que definen a cada uno.

Los resultados obtenidos permiten determinar si existen diferencias significativas en las formas de obtener la tasa de dosis y comparar los métodos de reducción de varianza de modo de optimizar el tiempo de cálculo necesario para obtener resultados confiables.

## 2. Introducción

En este capítulo se describen los fundamentos teóricos que resultan de importancia para el desarrollo del trabajo. En primera instancia se mencionan los principios en que se basa la dosimetría, las distintas interacciones de las radiaciones con la materia, y la teoría relacionada al cálculo de blindaje. Luego, se detallan los fundamentos del transporte de partículas y del método Monte Carlo utilizados por el código MCNP. Por último, se describen los métodos de reducción de varianza estudiados.

### 2.1. Dosimetría

Las radiaciones ionizantes, como su nombre indica, tienen la capacidad de producir ionizaciones en los átomos con los que interactúan debido a su alta energía. Así, estas radiaciones pueden alterar las estructuras químicas de las moléculas que forman las células de nuestro organismo. Si la molécula alterada es importante para el funcionamiento de la célula, como es el caso del ADN (ácido desoxirribonucleico), habrá consecuencias nocivas para la célula. Dependiendo, entre otros factores, de la dosis de radiación el daño producido será de mayor o menor gravedad, lo que a su vez determinará el tipo de efecto que puede producirse en el organismo.

Para poder evaluar los riesgos de las radiaciones y consecuentemente los efectos biológicos de las mismas, es necesario establecer mecanismos que permitan cuantificar la energía transmitida o depositada en la materia.

La dosimetría estudia las dosis recibidas en los tejidos y en la materia como consecuencia de la exposición a la radiación ionizante, tanto de manera directa como indirecta.

Existen diferentes magnitudes y unidades de interés en el campo de la dosimetría. Las definiciones que serán de interés en el desarrollo de este trabajo se presentan en el Anexo 1.

### 2.2. Interacción de la radiación ionizante con la materia.

Las interacciones se dividirán en dos grandes grupos según la naturaleza de la partícula incidente. De esta manera tendremos [3]:

#### 2.2.1. Partículas cargadas

Las partículas cargadas interactúan con los núcleos o los electrones orbitales del medio material mediante:

- Excitación/Ionización: la partícula incidente pierde energía excitando electrones, que pasan a un estado de energía superior al fundamental, y/o ionizando átomos (arrancan electrones orbitales). En el primer caso, el electrón excitado vuelve al estado fundamental emitiendo un fotón de

energía equivalente a la de excitación, mientras que en el segundo caso se produce un par iónico.

- Frenado radiactivo: la partícula colisiona con un núcleo atómico por interacción coulombiana se pueden producir bruscas aceleraciones que, de acuerdo con las leyes de la electrodinámica, darán lugar a la emisión de radiación electromagnética de espectro continuo (Bremsstrahlung).
- Colisión elástica: la partícula incidente es desviada de su trayectoria por efecto de la interacción electrostática con los electrones atómicos o con las cargas del núcleo, perdiendo sólo una fracción de su energía cinética inicial.

En el estudio de las interacciones de las partículas cargadas con la materia, existen dos conceptos de interés: el alcance y el poder de frenado.

Se define como alcance a la mínima distancia necesaria para detener la radiación. El poder de frenado expresa la cantidad de energía perdida por la partícula en su trayectoria, y se define como la energía perdida por unidad de camino recorrido:

$$S(E) = - dE / dx$$

Según la partícula que interactúe, los mecanismos de interacción que predominen serán:

#### **Para partículas $\alpha$ :**

La pérdida de energía de estas partículas en el medio absorbente se debe principalmente a la ionización y excitación, siendo despreciables las pérdidas por frenado o Bremsstrahlung.

#### **Para partículas $\beta$ :**

La pérdida de energía de estas partículas en el medio se debe principalmente a la ionización y excitación y al frenado radiactivo o Bremsstrahlung. Dado que las mayores aceleraciones ocurren sobre electrones energéticos atravesando el campo eléctrico de núcleos con carga elevadas, el frenado radiactivo es el proceso más importante en interacción de partículas  $\beta$  con elementos de número atómico (Z) alto.

### **2.2.2. Partículas sin carga**

A diferencia de las partículas cargadas, donde la interacción coulombiana tiene gran importancia, las partículas no cargadas quedan fuera de estas consideraciones e interactúan con los núcleos de los átomos del medio material en forma mecánica, como es el caso de los neutrones, o por medio de mecanismos particulares entre los electrones de los átomos del medio y las radiaciones electromagnéticas.



Según la partícula que interactúe, los mecanismos de interacción que predominen serán:

### Neutrones

La ausencia de carga eléctrica hace que los neutrones sean muy penetrantes en la materia y por lo tanto sus interacciones sólo pueden ser posibles cuando los mismos se acercan a los núcleos a distancias del orden del radio nuclear (mediante fuerzas de corto alcance). Por lo tanto podemos dividir la interacción de los neutrones con la materia básicamente en reacciones de dispersión y reacciones de absorción.

Las reacciones de dispersión pueden ser elásticas o inelásticas. En las primeras el efecto neto es un cambio en la dirección y en la energía del neutrón, mientras en las segundas, además de dicho cambio, el núcleo blanco queda en un estado excitado volviendo al estado fundamental mediante la emisión de radiación gamma.

En las reacciones de absorción el neutrón es capturado por el núcleo blanco, el cual queda en un estado excitado pudiendo volver al estado fundamental por emisión de radiación  $\gamma$  o de partículas (neutrones, protones,  $\beta$ ,  $\alpha$ , etc.).

Un haz de neutrones sólo puede ser reducido en intensidad aumentando el espesor absorbente interpuesto.

La cuantificación de la disminución de la intensidad del haz de neutrones, en función del absorbente interpuesto, se obtiene mediante la siguiente expresión exponencial:

$$I(x) = I_0 e^{-\Sigma_R x}$$

$I_0$  es la intensidad del haz de neutrones incidente sobre el blindaje,  $I(x)$  la intensidad del haz emergente, y  $\Sigma_R$  se denomina sección eficaz macroscópica, que depende de la energía inicial de los neutrones y del material blindante.

### Radiación electromagnética ( $\gamma$ , X)

Los mecanismos de interacción con la materia son:

- Efecto fotoeléctrico: colisión elástica entre el fotón incidente y un electrón atómico, el que se libera por ser la energía del fotón mucho mayor que la de unión del electrón, resultando en la desaparición del fotón. El efecto fotoeléctrico presenta una fuerte dependencia con el número atómico que se manifiesta en su coeficiente de atenuación. Este coeficiente es proporcional a  $Z^5$ , esto hace que por ejemplo, el plomo sea un excelente blindaje para rayos X de bajas energías.

- **Dispersión Compton:** es una colisión elástica entre el fotón incidente y un electrón atómico, el que se libera por ser la energía del fotón mucho mayor que la de unión del electrón. El resultado es la desaparición del fotón inicial (de energía  $E_0$ ) y la aparición de otro fotón de menor energía ( $E$ ), acompañado de un electrón cuya energía cinética es aproximadamente la diferencia  $E_0 - E$ .  
Este mecanismo de interacción prevalece, en general, para fotones cuyas energías están comprendidas entre 0,5 y 10 MeV.
- **Formación de pares:** si la energía del fotón incidente es superior a 1,02 MeV, es posible que al pasar por las proximidades de un núcleo desaparezca, y en su lugar la energía se haya transformado en un electrón y en un positrón.

La radiación electromagnética sólo puede ser reducida en intensidad aumentando el espesor del absorbente interpuesto.

La atenuación de la radiación electromagnética en la materia se caracteriza por una ley exponencial:

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

Donde,  $I_0$  es la intensidad del haz incidente sobre el blindaje,  $I(x)$  la intensidad del haz emergente, y  $\mu$  es el coeficiente de atenuación.

### 2.3. Blindaje

Los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes se conocen desde el mismo momento en que estas fueron descubiertas, demostrados más tarde por los estudios efectuados en poblaciones expuestas en accidentes radiológicos, durante el ataque nuclear de las ciudades de Hiroshima y Nagasaki y en las múltiples investigaciones realizadas al efecto, en las personas sobreexpuestas en accidentes, así como en animales de experimentación a nivel de laboratorio.

Por lo tanto, la filosofía que actualmente se considera es la de restringir al máximo posible el riesgo con relación al beneficio que tiene la utilización de técnicas radiológicas y/o nucleares.

Los tres mecanismos de control de la irradiación externa son [1]:

- **Tiempo:** Las dosis absorbidas por irradiación externa son directamente proporcionales al tiempo durante el cual se estuvo expuesto al campo de radiación. Condiciona los diseños de sistemas o componentes, de modo que las tareas de reparación, mantenimiento e inspección en servicio sean ejecutadas de manera sencilla y rápida. Se tiende a la robotización.
- **Distancia:** La dosis recibida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente radiactiva (geometrías puntuales, es decir cuando las

distancias punto-fuente son significativamente mayores que las dimensiones de la fuente). Cuando la distancia punto-fuente es comparable a las dimensiones de la fuente, la reducción de la tasa de dosis como consecuencia del aumento de dicha distancia, es menos notable y depende de la geometría de la fuente.

- **Blindaje:** La interposición de espesores de materiales adecuados entre las fuentes de radiación y las personas expuestas resulta eficiente para el control de la exposición a la irradiación externa. La atenuación que sufre la radiación ionizante depende de su naturaleza, de su propia energía y de la naturaleza del material absorbente.

### **Blindaje para las diferentes partículas [1]**

Según los mecanismos de interacción expuestos en el punto 2.2, se deben realizar diferentes consideraciones en el estudio de los blindajes, según cuál sea la partícula incidente:

#### **2.3.1. Partículas alfa**

El reducido alcance de las partículas  $\alpha$  en aire y su escasa penetración en el tejido, hacen innecesario cualquier tipo de protección contra la radiación externa.

#### **2.3.2. Partículas beta**

Dado su alcance finito, la tasa de fluencia de estas partículas puede reducirse a cero si se interpone un material de espesor mayor o igual al alcance de las partículas en dicho material.

Hay que tener en cuenta la radiación de frenado producida por la interacción con el propio blindaje, por lo que deben utilizarse materiales ligeros y de bajo número atómico. Si las fuentes son de gran actividad habrán de recubrirse de una capa de plomo.

#### **2.3.3. Neutrones**

En la interacción de la radiación neutrónica con la materia siempre hay presente además radiación gamma y/u otras partículas, por lo que el material blindante debe absorber además de los neutrones otros tipos de radiación siendo la más importante la radiación gamma.

Para resolver el problema del blindaje de los neutrones, primero se debe frenar a los mismos para luego absorberlos. Al primer proceso se lo denomina moderación. Durante la moderación el neutrón efectúa choques elásticos e inelásticos con los núcleos del moderador tendiendo a establecer un equilibrio térmico con los mismos (razón por la cual a los neutrones resultantes se los denomina térmicos). Si tenemos en cuenta la masa del neutrón, vemos que el



mejor moderador es el hidrógeno, ya que posee casi la misma masa. En la práctica no se utiliza el hidrógeno pues su baja densidad haría necesarios grandes volúmenes del mismo para obtener una buena moderación. Por lo tanto se emplean materiales con un alto contenido de hidrógeno y de densidad relativamente alta, como por ejemplo agua, parafina, polietileno, concreto, etc.

La segunda condición que debe cumplir un buen material blindante es ser un buen absorbente de neutrones. En este caso también resultan convenientes los materiales hidrogenados, por la alta sección eficaz de absorción del hidrógeno para neutrones térmicos.

#### 2.3.4. Radiación electromagnética

Para radiación X y gamma la eficiencia relativa de los distintos materiales varía con la energía de los fotones. A bajas energías, donde prima el efecto fotoeléctrico, es notable la eficiencia de materiales de alto número atómico, tales como el plomo, con respecto a otros de número atómico bajo, como el hormigón y el agua.

Una situación similar se presenta a altas energías (fotones de más de 10 MeV) donde es preponderante el efecto de formación de pares. Para energías intermedias, donde predomina el efecto Compton, la eficiencia es aproximadamente proporcional a la densidad de los materiales. Esto último justifica, si no hay razones de espacio o peso, el uso masivo de hormigón común como blindaje.

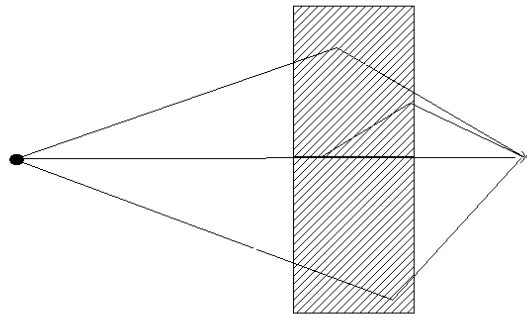
#### Cálculo de blindaje para radiación gamma

Se distingue entre condiciones geométricas de haz estrecho (o colimado) y haz ancho (o no colimado).

Para el caso de un haz monoenergético colimado la expresión que relaciona la tasa de dosis con el espesor del material absorbente es la presentada anteriormente:

$$\dot{D} = \dot{D}_0 * e^{-\mu x}$$

En un caso real, la radiación no es colimada y por lo tanto se producen fotones secundarios (debido al efecto Compton y a la creación de pares), que junto con el haz directo inciden sobre el punto de interés de tal manera que el efecto neto es un aumento de la tasa de dosis en el punto de interés.



Dicho efecto se tiene en cuenta mediante el denominado factor de acumulación o *build up* (B):

$$\dot{D} = \dot{D}_o * e^{-\mu x} * B$$

Dicho factor depende del material, de la energía incidente y del espesor de blindaje interpuesto y puede definirse como:

$$B_{(x,\rho,E)} = \frac{\text{respuesta de la radiación colisionada y no colisionada}}{\text{respuesta de la radiación no colisionada}}$$

Para una fuente puntual monoenergética la ecuación anterior resulta:

$$\dot{D} = \frac{A}{4 * \pi * r^2} * \frac{\mu_{en}}{\rho} * \epsilon * E * e^{-\mu x} * B_{(\mu x)}$$

Sin embargo, con el avance de las computadoras y su gran poder de procesamiento de datos, los cálculos de dosis mediante factores de *build up* están cayendo en desuso, dejando su lugar, principalmente, a métodos que requieren un gran poder de cálculo para encontrar la solución a la ecuación de transporte de partículas pero que permiten modelar sistemas más complejos, como el método Monte Carlo.

## 2.4. Transporte de partículas

Es el proceso mediante el cual una partícula se propaga a través de los átomos en un sistema físico. Este proceso se describe matemáticamente a partir de la denominada ecuación de transporte.

A continuación, para ejemplificar los modelos matemáticos usados en la representación del transporte de partículas, se describe la ecuación utilizada para el transporte neutrones, existiendo otras similares para las demás partículas.

### Ecuación de transporte de Boltzmann [3][4]

Para el caso de neutrones el proceso de transporte incluye la transmisión de neutrones desde un sitio de colisión (un núcleo atómico) al siguiente, la

dispersión de neutrones, la captura de neutrones por núcleos y la iniciación de eventos de fisión, en los que un núcleo se divide.

Dicho proceso de transporte se describe en forma general mediante la ecuación lineal de Boltzman, la cual se basa en el simple concepto físico de que la variación temporal del número de neutrones, dentro del volumen de control estudiado, es igual a las ganancias menos las pérdidas de neutrones en dicho volumen:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, \Omega, E, t) + \Omega \cdot \nabla \psi(\mathbf{x}, \Omega, E, t) + \Sigma_t(E) \psi(\mathbf{x}, \Omega, E, t) \\ = \int_0^\infty \int_{4\pi} \Sigma_s(\Omega' \cdot \Omega, E' \rightarrow E) \psi(\mathbf{x}, \Omega', E', t) d\Omega' dE' \\ + \frac{\chi_p(E)}{4\pi} \int_0^\infty \int_{4\pi} [1 - \beta(E')] v \Sigma_f(E') \psi(\mathbf{x}, \Omega', E', t) d\Omega' dE' \\ + \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^6 \chi_j(E) \lambda_j C_j(\mathbf{x}, t) + \frac{1}{4\pi} Q(\mathbf{x}, E, t). \end{aligned}$$

Cada uno de sus términos describe un proceso físico específico que causa una ganancia o pérdida de neutrones.

Del lado izquierdo de la igualdad, el primer término representa la variación temporal de la población neutrónica, el segundo la pérdida de neutrones por fugas y el tercero la pérdida de neutrones por colisiones. Por el lado derecho de la igualdad el primer término representa las ganancias de neutrones por *scattering*, el segundo la producción de neutrones *prompt*, el tercero la producción de neutrones retardados, a partir del decaimiento de los respectivos precursores, y el cuarto término es el aporte de neutrones provenientes de una fuente externa isotrópica.

Uno de los métodos de cálculo más utilizados en la actualidad para llevar a cabo el transporte de partículas es el método Monte Carlo.

## 2.5. El método Monte Carlo

Este método es una solución numérica a un problema que modela objetos interactuando con otros objetos o el ambiente, basado en simples relaciones objeto-objeto u objeto-ambiente. Representa un intento de modelar la naturaleza a través de la simulación directa de la dinámica esencial del sistema en cuestión. En este sentido el método Monte Carlo es simple en su enfoque, la solución a un sistema macroscópico, se da a través de la simulación de sus interacciones microscópicas.

Una solución se determina por un muestreo aleatorio de las interacciones microscópicas, hasta que el resultado converge. Por lo tanto, el mecanismo de obtener una solución involucra cálculos repetitivos, en la medida en que las

interacciones microscópicas puedan ser modeladas matemáticamente, la solución repetitiva se puede ejecutar en una computadora. En el caso del transporte de partículas, el modelo matemático viene dado por la ecuación de transporte.

Los métodos Monte Carlo son muy diferentes de los métodos de transporte determinísticos. Estos últimos proporcionan una visión profunda y permiten desarrollar una intuición sofisticada sobre cómo se puede esperar que los campos macroscópicos de partículas se comporten y resuelven la ecuación de transporte para un comportamiento promedio de las partículas. Por el contrario, Monte Carlo obtiene respuestas simulando partículas individuales y registrando algunos aspectos de su comportamiento promedio. El comportamiento promedio de las partículas en el sistema físico se infiere entonces del comportamiento promedio de las partículas simuladas.

El método Monte Carlo puede ser utilizado para duplicar teóricamente un proceso estadístico (como la interacción de partículas nucleares con materiales) y es particularmente útil para problemas complejos que no pueden ser modelados por códigos informáticos que utilizan métodos determinísticos. Los sucesos probabilísticos individuales que comprenden un proceso son simulados secuencialmente.

El proceso de muestreo estadístico se basa en la selección de números aleatorios, análogos a tirar dados en un casino de juego. En el transporte de partículas el proceso consiste en seguir cada una de las partículas de una fuente a través de su vida hasta su muerte (absorción, escape, etc.). Las distribuciones de probabilidad se muestrean al azar usando datos de transporte para determinar el resultado en cada paso de su vida. Los números entre 0 y 1 se seleccionan al azar para determinar el tipo de interacción (si existe) y dónde tiene lugar la misma, basándose en las reglas (física) y las probabilidades (datos de transporte) que rigen los procesos y materiales involucrados. [5][6]

### 2.5.1. MCNP

El método Monte Carlo para resolver problemas de transporte surgió del trabajo realizado en Los Alamos durante la Segunda Guerra Mundial. El método generalmente se atribuye a Fermi, von Neumann, Ulam, Metrópolis y Richtmyer. MCNP, lanzado por primera vez en 1977, es el sucesor de su trabajo y ha estado en desarrollo continuo desde entonces.

MCNP (Monte Carlo N-Particle) [12] es un código Monte Carlo de transporte de neutrones, fotones y electrones, de uso general, geometrías generalizadas y dependiente del tiempo.

Se puede utilizar en varios modos de transporte, sólo neutrones, fotones o electrones, transporte combinado de neutrones-fotones donde los fotones son producidos por interacciones de neutrones, neutrones-fotones-electrones y electrones-fotones.

El código trata una configuración tridimensional arbitraria de materiales en celdas geométricas delimitadas por superficies de primer y segundo grado.

El usuario crea un archivo de entrada que posteriormente se lee por MCNP. Este archivo contiene información sobre el problema en áreas como:

- Especificaciones de la geometría
- La descripción de los materiales y la selección de las evaluaciones de las secciones eficaces
- La ubicación y características de la fuente de neutrones, fotones o electrones
- El tipo de respuestas o acumuladores (comúnmente conocidos como *tallies*) que permitirán obtener los resultados deseados
- Cualquier técnica de reducción de varianza utilizada para mejorar la eficiencia.

A continuación se introducen algunos conceptos necesarios para comprender cómo funciona el proceso de reducción de varianza en MCNP.

### 2.5.2. Promedios, variancias en Monte Carlo

Los resultados en Monte Carlo se obtienen muestreando posibles trayectorias aleatorias y asignando un resultado  $x_i$  a cada una. Las trayectorias aleatorias típicamente producirán un rango de resultados dependiendo del *tally* y la reducción de varianza seleccionados. [7]

Se define el *valor promedio* ( $\bar{x}$ ) de los resultados  $x_i$  para todas las historias (N) calculadas en el problema como:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

La *varianza* de la población de los valores  $x$  es una medida de la separación entre estos y está dada por:

$$\sigma^2 = \int (x - E(x))^2 f(x) dx = E(x^2) - (E(x))^2$$

Siendo  $E(x)$  la respuesta verdadera o el valor esperado de  $x$  y  $f(x)$  es la función de densidad de probabilidad para seleccionar las trayectorias aleatorias que resultan en  $x$  para el *tally* que está siendo estimado.

La raíz cuadrada de la varianza es la desviación estándar de la población de resultados (S), que puede ser estimada por Monte Carlo (para N grandes) como:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1} \approx \overline{x^2} - \bar{x}^2$$

$$\overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2$$

La varianza estimada de  $\bar{x}$  está dada por:

$$S_{\bar{x}}^2 = \frac{S^2}{N}$$

Se observa que  $S_{\bar{x}}$  es proporcional a  $1/\sqrt{N}$  que es un inconveniente inherente de método Monte Carlo.

### 2.5.3. Reducción de varianza

El método Monte Carlo aplicado al transporte de radiación tiene la desventaja de requerir tiempos de cálculo muy largos para poder obtener resultados estadísticamente aceptables, en comparación con métodos determinísticos. Una forma de disminuir estos tiempos manteniendo resultados con buena convergencia estadística, es utilizando alguna técnica de reducción de varianza.

Los valores de MCNP se normalizan por partícula de partida y se imprimen en la salida acompañados de un segundo número R, que es el error relativo estimado, definido como una desviación estándar estimada de la media  $S_{\bar{x}}$  dividida por la media estimada  $\bar{x}$

$$R = (S/\sqrt{N})/\bar{x}.$$

R será proporcional a  $1/\sqrt{N}$  donde N es el número de historias. Así, por ejemplo, para reducir a la mitad R, debemos aumentar el número total de historias cuatro veces.

El error relativo estimado se puede utilizar para formar intervalos de confianza sobre la media estimada, lo que permite hacer una declaración sobre cuál es el verdadero resultado. El teorema del límite central indica que cuando N se acerca al infinito hay un 68% de probabilidad de que el resultado verdadero esté en el rango  $\bar{x} \cdot (1 \pm R)$  y una probabilidad del 95% en el rango  $\bar{x}(1 \pm 2R)$ . Es muy importante tener en cuenta que esta confianza se refiere sólo a la precisión del cálculo de Monte Carlo en sí y no a la exactitud del resultado en comparación con el verdadero valor físico<sup>1</sup>. En el caso de MCNP se recomienda que el error relativo R debe ser inferior a 0,10 para producir resultados confiables. [12]

<sup>1</sup>En la comparación de los valores calculados con los valores reales del sistema físico intervienen, además de convergencia estadística del cálculo, otros factores como las simplificaciones utilizadas durante el modelado, la confiabilidad de datos nucleares y el conocimiento acotado del sistema real (como la geometría y los materiales utilizados)

Para una ejecución de MCNP dada, el tiempo  $T$  de ordenador consumido es proporcional a  $N$ ; en busca de aumentar la eficiencia del cálculo, sobre todo en problemas donde la radiación debe recorrer grandes distancias desde el punto donde es generada hasta la región donde se requiere obtener resultados, se busca obtener el menor  $R$  en un tiempo dado  $T$ . Recordando que  $R = (S/\sqrt{N})/\bar{x}$  existen dos maneras de reducir el error estadístico: 1) disminuir  $S$  y 2) aumentar  $N$ , es decir, disminuir el tiempo por historia de partículas. Para poder realizar cualquiera de estas 2 cosas es necesario modificar la simulación real de la naturaleza del problema, lo que requiere la definición de técnicas de simulación análogas y no análogas.

Hay 2 formas de simular estadísticamente la correcta densidad de partículas en un medio:

- El método Monte Carlo análogo, simplemente muestrea los eventos de acuerdo a sus probabilidades físicas naturales. Las partículas son seguidas a través de sus interacciones con el medio modelado y cada interacción es sorteada a partir de todos los tipos de eventos posibles a partir de la probabilidad natural de que dicho evento ocurra. El modelo análogo recibe este nombre porque equivale a simular el transporte de la radiación de manera análoga a como ocurre en la naturaleza.
- Las técnicas no análogas, o técnicas de reducción de varianza, no simulan directamente la naturaleza, sino que son libres de modificar el transporte de radiación siempre y cuando la densidad de partículas se mantenga igual al de la simulación análoga. Esto se logra asignando un peso a cada partícula simulada y ajustando dicho peso de modo de no distorsionar la naturaleza del problema modelado. El peso puede pensarse como el número de partículas físicas representadas por las partículas en MCNP. Cada vez que se toma una decisión, las técnicas no análogas requieren que el peso asociado con cada resultado sea el mismo que en el análogo, de forma tal que el número de partículas ejecutándose en cualquier trayectoria aleatoria sean las mismas que en el método análogo.

MCNP cuenta con muchas técnicas de reducción de varianza. A continuación, se describirán los tres tipos básicos de técnicas que se utilizaron en este trabajo:

1. División de una partícula: se refiere a dividir el peso de las partículas entre dos o más hijas cuando la partícula inicial llega a determinada región del espacio modelado y seguir, a partir de allí, a cada partícula hija de forma independiente. Usualmente el peso es dividido equitativamente entre  $k$  partículas hijas iguales, cuyas características son idénticas al padre excepto por un factor de  $1/k$  en el peso. Esta técnica busca evitar que, debido a la naturaleza estadística del método de cálculo, partículas de un peso mucho mayor al peso promedio alcancen a la región de interés, buscando disminuir la desviación estándar a costa de aumentar el tiempo de cálculo.

2. Ruleta rusa: toma una partícula de peso  $w_0$ , la transforma en una partícula de peso  $w_1 > w_0$  con una probabilidad  $w_0/w_1$  y la “mata” (esto es, peso=0) con una probabilidad  $1-(w_0/w_1)$ . Esta técnica busca disminuir el tiempo de cálculo, evitando seguir partículas con un peso demasiado bajo que, en caso de llegar a la región de interés, no producirían un efecto significativo en el resultado.
3. Muestreo desde funciones de densidad de probabilidad no análogas: consiste en muestrear desde cualquier distribución arbitraria en lugar de la probabilidad física, ajustando los pesos de las partículas para compensar esta modificación.

Estas tres técnicas básicas, en conjunto o por separado, se utilizan en general en ciertos métodos de reducción de varianza de MCNP, algunos de los cuales se resumen brevemente a continuación:

- **División de geometría mediante esquemas de importancia.** Consiste en atribuirle una importancia relativa a cada región del sistema modelado, en función de la probabilidad de que las partículas que atraviesen dicha región alcancen a la región de interés. Cuando las partículas son transportadas de una región de mayor importancia a una región de menor importancia (donde probablemente contribuirán poco al resultado deseado del problema) se someten al proceso de ruleta rusa. Es decir, cuando las partículas llegan a una región de menor importancia, se sortea su continuidad de acuerdo a la relación de importancias entre la región a la que llega y de la que viene. Si la partícula sobrevive, su peso es aumentado de modo de no afectar a la densidad de radiación en dicha región. De esta manera, las partículas que se dirigen a regiones sin importancia (alejadas de la región de interés) son seguidas con menos frecuencia, pero la solución del problema permanece sin distorsión. Por otro lado, si una partícula es transportada a una región de mayor importancia (donde es probable que contribuya al resultado del problema deseado), se divide en dos o más partículas, cada una con menos peso. De esta manera, las partículas importantes se siguen con más frecuencia, sin embargo la solución no se distorsiona porque, en promedio, el peso total se conserva. Las regiones se diferencian en importancias asignando un valor numérico a las mismas en el archivo de entrada creado por el usuario. Las partículas que ingresan a una región de importancia 0 se matan instantáneamente.
- **Ventanas de peso.** Es una técnica que usa división del volumen de control y ruleta rusa. Para cada celda o región, el usuario suministra un límite de peso inferior y uno superior como un múltiplo especificado del límite inferior. Estos definen una ventana de pesos de partículas aceptables. Si una partícula está por debajo del límite de peso inferior, se aplica ruleta rusa y el peso de la partícula se incrementa a un valor dentro de la ventana o se la aniquila. Si una partícula está por encima del límite de peso superior, se divide de modo que todas las partículas

divididas se encuentren dentro de la ventana. No se realizan acciones sobre las partículas dentro de la ventana.

Esta técnica ayuda a mantener la dispersión de peso dentro de límites razonables a través del problema. Tan pronto como el peso se eleva por encima del valor superior de la ventana, la partícula se divide y las multiplicaciones de peso subsiguientes afectarán, de esta manera, sólo a una fracción del peso de la partícula (previa a la división). Por lo tanto, es difícil para el *tally* ser severamente perturbado por una partícula de peso extremadamente grande. Además, las partículas de bajo peso se sortean en la ruleta, por lo que el tiempo no se pierde siguiendo a las partículas de peso trivial. A su vez, el peso inferior de la ventana puede utilizarse para “guiar” a las partículas hacia las regiones de interés, imponiendo un límite de peso alto cuando la partícula se dirija a una región desde la que no es probable que contribuya a determinar la densidad de radiación en la zona de interés.

- **Transformación exponencial.** Muestra la distancia a una colisión a partir de una función de densidad de probabilidad no análoga. La transformación exponencial permite que los recorridos de partículas sean en una dirección preferida reduciendo artificialmente la sección eficaz macroscópica en dicha dirección y aumentando la sección eficaz en la dirección opuesta. En una colisión, el peso de una partícula se multiplica por un factor  $wc$  de modo que se mantiene el peso esperado de una colisión en cualquier punto. El peso de la partícula se ajusta de tal manera que, multiplicado por la probabilidad de que la siguiente colisión se encuentre en una distancia  $ds$  respecto de  $s$ , permanezca constante. Este método apunta a lograr que las partículas que viajan en una determinada dirección logren atravesar distancias más largas que las que viajan en otras direcciones, siendo muy útiles para problemas donde las partículas deben atravesar distancias muy largas (en relación a su camino libre medio) en medios muy absorbentes como resultan los problemas de cálculo de blindaje.

#### 2.5.4. Figura de mérito (FOM)

Como se dijo anteriormente las técnicas de reducción de varianza buscan aumentar la eficiencia de los cálculos en MCNP. Para evaluar dicha eficiencia MCNP calcula una figura de mérito (FOM) para cada *tally* como una función del número de historias e imprime los resultados en los gráficos de fluctuación de registro al final de la salida. El FOM se define como:

$$FOM = \frac{1}{(R^2T)}$$

Donde T es el tiempo de cálculo de la computadora en minutos. Cuanto más eficiente sea un cálculo de MCNP, mayor será el FOM porque se requiere menos tiempo de computadora para alcanzar un valor dado de R o porque se alcanza un menor valor de R para un determinado tiempo de cálculo.

El FOM también puede definirse como:



$$FOM = t * \left(\frac{\bar{x}}{S}\right)^2$$

$$t = \frac{N}{T}$$

Siendo, t el número de partículas corridas por minuto en una computadora específica, S la desviación estándar estimada y  $\bar{x}$  la media estimada.

Como  $\bar{x}$  debería ser la misma para los problemas con diferentes reducciones de varianza, aumentar el FOM es equivalente a aumentar  $t/S^2$  (disminuir S con técnicas de reducción de varianza generalmente reduce t).

El FOM tiene tres usos. Uno importante es como un indicador de confiabilidad del *tally*. Si el FOM no es aproximadamente una constante (excepto para las fluctuaciones estadísticas tempranas en el problema), los intervalos de confianza pueden no coincidir con el valor del resultado esperado. Un segundo uso para el FOM es optimizar la eficiencia del cálculo de Monte Carlo haciendo varias pruebas cortas con diferentes parámetros de reducción de la varianza y luego seleccionar el problema con el FOM más grande. Un tercer uso para el FOM es estimar el tiempo de la computadora requerido para alcanzar un valor deseado de R a partir de la expresión:

$$T \sim \frac{1}{R^2 \cdot FOM} T \sim 1 / (R$$

### 3. Materiales y Métodos

En este trabajo se analizan diferentes aspectos relacionados con el cálculo de blindajes de fotones, utilizando como herramienta de cálculo el código MCNP5 v1.60 [12], y un clúster de 20 procesadores perteneciente a la Gerencia de Reactores y Centrales Nucleares en el Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica<sup>2</sup>.

Para introducirse en la metodología de cálculo y las herramientas incorporadas en el programa, se comparan los resultados obtenidos utilizando 2 métodos de cálculo de dosis absorbida por un fantoma: utilizando el *tally* F4 (flujo de fotones) con factores de kerma y el *tally* F6 (deposición de energía).

Luego, se analizan diferentes métodos de reducción de varianza con el objetivo de optimizar el tiempo de cálculo para el caso particular de un cálculo de blindaje de fotones.

El trabajo se realiza utilizando geometrías, materiales y fuentes características de reactores de investigación.

#### 3.1. Descripción del modelo

La figura 3.1 presenta un esquema del modelo utilizado para el cálculo, siendo A y B las cañerías de un circuito por el cual pasa agua pesada irradiada en un reactor, C la pared que se usa como blindaje, y D un fantoma de agua (simulando a una persona) en el cual se calculan las dosis. Como material para el blindaje se selecciona trabajar con hormigón pesado, el cual se utiliza normalmente en los reactores para este tipo de casos.

---

<sup>2</sup> El código de cálculo fue utilizado siempre por los directores del trabajo, que cuentan con la licencia pertinente. Las salidas eran luego transferidas al autor del trabajo para la realización del análisis de los resultados.

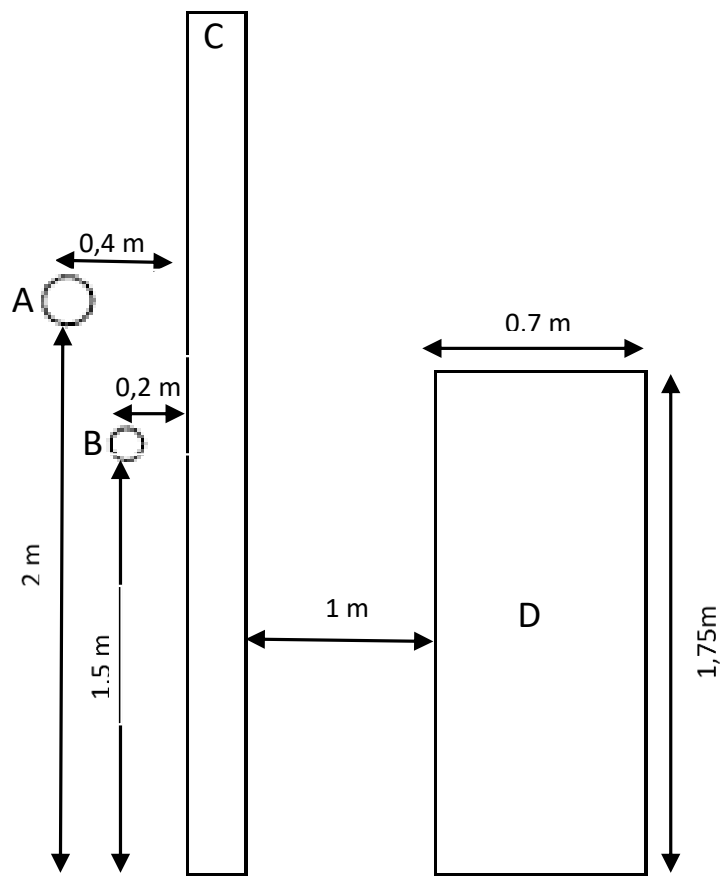


Figura 3.1 – Sistema modelado

Para determinar el espesor de blindaje a utilizar se busca que la tasa de dosis absorbida por el fantoma resulte menor a  $3 \mu\text{Gy/h}$ . Esto se realiza como una aproximación a lo exigido por la Autoridad Regulatoria Nuclear en la Norma 4.1.1 para locales sin restricción de acceso para trabajadores [8], buscando centrar el estudio en situaciones relacionadas con lo que ocurre en reactores de investigación. Según esta norma, la tasa de dosis equivalente ambiental en esas condiciones no debe exceder  $3 \mu\text{Sv/h}$ . Si bien la tasa de dosis equivalente ambiental no se refiere a la tasa de dosis absorbida por un fantoma como el modelado, se decide realizar esta aproximación para disminuir la cantidad de cálculos que se alejan de los objetivos del trabajo.

Durante el estudio se modifica el espesor de pared entre 20 cm y 150 cm, para encontrar aquel que satisface el criterio, manteniendo constantes las distancias de la pared a las cañerías y al fantoma.

Se modela el agua contenida dentro de las cañerías pero no la cañería en sí misma. Esta consideración se realiza con el fin de no complejizar el problema en cuestiones que se alejan del objetivo del trabajo y resulta conservativa desde el punto de vista del cálculo de dosis, ya que no se incluye en el modelo una barrera de la radiación. Las dimensiones consideradas para las dos cañerías se muestran en la Tabla 3.1:

Cañería	Longitud [m]	Diámetro [m]
1	6	0,1143
2	6	0,168

Tabla 3.1 – Dimensiones de las cañerías.

Como se dijo anteriormente, como fuente de radiación se considera agua pesada irradiada dentro de un reactor. Más precisamente, los valores de actividad del agua utilizados son representativos de los que se encontrarían en el circuito de refrigeración del agua pesada utilizada como reflector en un reactor de 30MW de potencia térmica. Sólo se considera la actividad de radiación gamma aportada por el decaimiento del  $^{16}\text{N}$ <sup>3</sup>, cuyas características de interés se muestran en la Tabla 3.2.

Isótopo	Constante de decaimiento ( $\lambda$ ) [1/s]	Energía de gamma [MeV]	Rendimiento ( $\eta$ )
$^{16}\text{N}$	9.72E-02	6.12863	67.00%
		7.11515	4.90%

Tabla 3.2 – Características del decaimiento del  $^{16}\text{N}$

Para cada tramo de cañerías modelado se calcula la cantidad de gammas producidos en el volumen real de agua que dicho tramo representa, tomando como actividad promedio del  $^{16}\text{N}$  para ambas cañerías  $\bar{A} = 1,86 * 10^6 \text{Bq/cm}^3$ .

$$A_i^{\text{Fotones}} = \bar{A} * Vol_i * \eta_T = \bar{A} * \pi * \frac{\phi_i^2}{4} * L_i * (\eta_1 + \eta_2)$$

donde  $\phi_i$  y  $L_i$  representan el diámetro y la longitud de la cañería  $i$ , resultando:

$$A_1^{\text{Fotones}} = 1,86 * \frac{10^6 \text{Bq}}{\text{cm}^3} * \pi * \frac{(11,43 \text{cm})^2}{4} * 600 \text{cm} * (0,67 + 0,049) = 8,23 * 10^{10} \frac{\text{fot}}{\text{s}}$$

$$A_2^{\text{Fotones}} = 1,86 * \frac{10^6 \text{Bq}}{\text{cm}^3} * \pi * \frac{(16,8 \text{cm})^2}{4} * 600 \text{cm} * (0,67 + 0,049) = 1,77 * 10^{11} \frac{\text{fot}}{\text{s}}$$

$$A_{\text{Total}}^{\text{Fotones}} = A_1^{\text{Fotones}} + A_2^{\text{Fotones}} = 8,23 * 10^{10} \text{BQ} + 1,77 * 10^{11} \text{BQ} = 2,583 * 10^{11} \frac{\text{fotones}}{\text{s}}$$

Dado que MCNP calcula resultados por partícula de fuente, el valor  $A_{\text{Total}}^{\text{Fotones}}$  permite escalar los resultados a la situación modelada, y los valores  $A_1^{\text{Fotones}}$  y  $A_2^{\text{Fotones}}$  determinar las probabilidades de que los fotones se generen en una u otra cañería. La posición en la cañería donde se genera el fotón y la dirección de salida se sortean equi-probablemente, mientras que su energía será

<sup>3</sup> El  $^{16}\text{N}$  se produce en la irradiación del agua como producto de la reacción  $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$  y resulta la reacción más importante desde el punto de vista radiológico debido a la alta energía de sus gammas de decaimiento.

6.12863 MeV (con una probabilidad de 81,8%) o 7.11515 MeV (con una probabilidad de 19,2%).

### 3.2. Comparación entre diferentes formas de cálculo de dosis

Se utilizan dos tipos de *tally* para su análisis:

El *tally* F6 calcula la deposición de energía promedio en la región seleccionada, utilizando tablas de MCNP. El resultado se afecta por factores para el cambio de unidades, obteniendo las tasas de dosis correspondientes.

El *tally* F4 calcula el flujo de partículas en la región elegida. Para determinar las tasas de dosis, el flujo se multiplica por factores de Kerma tabulados para los distintos elementos que componen la celda de estudio y para varias energías de la radiación gamma incidente. Dichas Tablas se presentan en el Anexo 2 [9]

En este trabajo se calculan dichos *tallies* en la totalidad de la celda que representa el fantoma, para los casos en que se aumentan de a 10 cm el espesor de pared, desde 20 cm hasta 90 cm. Se comparan los resultados obtenidos mediante el cálculo de diferencias relativas porcentuales, acompañadas de los errores relativos correspondientes, según las ecuaciones:

$$\text{Diferencia porcentual} = \left( \frac{x - y}{y} \right) * 100$$

$$\text{Error relativo} = 100 * \left( \frac{x}{y} \right) * \sqrt{\Delta x^2 + \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right)^2}$$

Siendo x e y los resultados a comparar, y  $\Delta x$  y  $\Delta y$  sus errores relativos.

### 3.3. Métodos de reducción de varianza

Se realiza el análisis de los tres métodos seleccionados: esquemas de importancia, transformación exponencial y ventanas de peso.

Para esto se modela una pared de hormigón pesado de 90 cm de espesor, que proporciona una tasa de dosis absorbida por el fantoma inferior a 3  $\mu\text{Sv/h}$ . Se considera como criterio que los resultados a comparar deben tener un error relativo asociado menor o igual al 1%.

Los resultados se analizan buscando, para cada caso, aquella configuración que genere el mayor FOM y se estudia la sensibilidad de este ante variaciones de los parámetros que definen cada uno de los métodos de reducción de varianza.

### 3.3.1. División de geometría mediante esquema de importancias:

Este método se aplica dividiendo la pared de 90 cm en 9 segmentos iguales de 10 cm cada uno y asignándoles valores de importancia creciente en dirección de la ubicación del fantoma, como se esquematiza en la Figura 3.2.

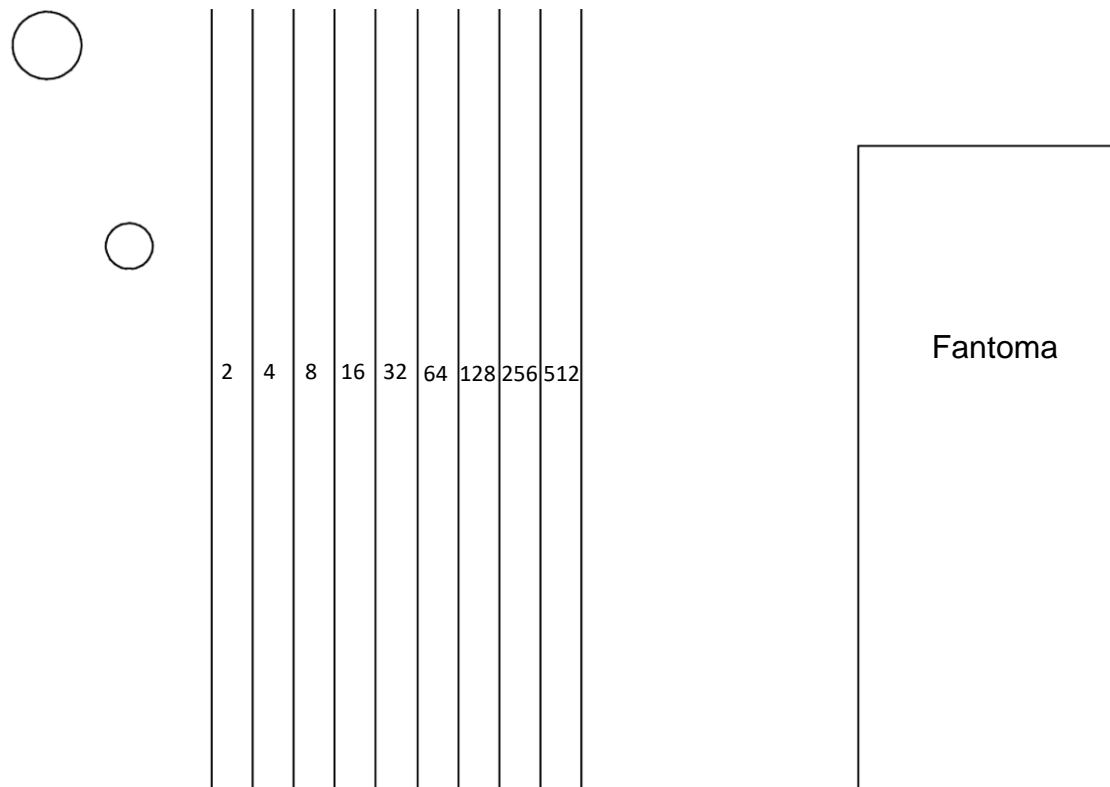


Figura 3.2 División de geometría mediante esquema de importancias

Esto se realiza respetando siempre variaciones de importancias menores a un factor de 3, entre regiones consecutivas. De esta manera los resultados dados por MCNP no pierden confiabilidad. [7]

Una de las configuraciones analizadas (“esquema óptimo”) es aquella en la que el aumento de importancia en celdas consecutivas es tal que mantiene constante la población de fotones, es decir, el número de partículas que ingresan en las divisiones sucesivas de la pared es siempre el mismo. Este esquema se puede armar a partir de los datos de variación de población mostrados en la salida de una corrida con MCNP. Este esquema de importancia permite obtener altos valores de FOM y es muy utilizado en distintos análisis relacionados con la optimización de cálculos de transporte de radiación. [10][11]

También, con el objeto de determinar si cambia el FOM óptimo por el tamaño de los segmentos, se usan celdas de 5 cm cada una, en lugar de las de 10 cm, y se mantiene la misma relación de importancias en ambos casos, para lo cual

se considera en las celdas de 5 cm un factor de aumento de importancia igual a la raíz cuadrada del que se utilizan con los segmentos de 10 cm.

Para todos los análisis anteriores se determinan los FOM de cada corrida y se los presentan gráficamente en función de las importancias correspondiente a cada caso.

Por último, seleccionando los factores de aumento de importancia correspondientes a las FOM más altas encontradas, se varían los espesores de las celdas en que se dividía la pared. Los resultados se presentan en un gráfico del FOM en función de los espesores con el objeto de encontrar la configuración óptima.

Todos los resultados se encuentran en la sección 4.2.

### 3.3.2. Transformación exponencial

Este método se analiza variando, entre 0.4 y 0.9, el parámetro que indica cuánto se reduce la sección eficaz en la dirección de interés (factor  $p$ ), y a su vez modificando el ángulo entre la dirección de las partículas desde la fuente y la ubicación de la persona.

El manual de MCNP sugiere utilizar la transformación exponencial junto con ventanas de pesos por lo que el análisis se hace combinando estos dos métodos. [7]

Se presentan los resultados graficando el FOM en función del factor  $p$ , para una dirección perpendicular a la pared y en dirección hacia el centro del fantoma, con el objeto de analizar la sensibilidad del FOM a dichos cambios.

### 3.3.3. Ventanas de pesos

Para analizar este método de reducción de varianza, se usa el generador de ventanas de peso. Es una herramienta que sirve para determinar el valor óptimo del límite inferior de la ventana de peso para cada celda del problema, de modo que las partículas transportadas se dirijan hacia la región de interés. A continuación, MCNP suministra las ventanas de peso en un archivo de salida adecuado para su uso como archivo de entrada en un cálculo posterior. [7]

El primer conjunto de ventanas de peso generado se utiliza en cálculos posteriores, para obtener un mejor conjunto de ventanas. Esto se realiza en varias iteraciones para encontrar la configuración óptima de límites inferiores para la ventana.

Con el resultado óptimo del generador de ventanas, se procede a modificar tres parámetros, con el objetivo de determinar sus influencias en los resultados del método:

- WUPN, que determina el límite superior de la ventana en función del límite inferior dado por el generador de ventana.



- WSURVN, que establece el peso, dentro de la ventana, que obtiene una partícula luego de sobrevivir un sorteo por ruleta rusa.
- MXSPLN, que establece el número máximo en que será dividida una partícula que posee un peso mayor al del límite superior.

MCNP toma ciertos valores por default para estos tres parámetros [12], en el estudio primero se modifican los tres a la vez manteniendo las relaciones entre ellos, y luego se cambian sus valores por separado, con el objeto de determinar cómo y en qué medida afectan, cada uno de estos parámetros, al FOM.

Los resultados se presentan en gráficos de FOM en función de los distintos parámetros de estudio.

#### **3.3.4. Combinación de métodos**

Junto con el análisis del punto 3.3.2, se realiza la combinación de los métodos de división de geometría con transformación exponencial.

Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.1 para comparar el FOM en los métodos por separados y combinados.

#### **3.3.5. Ampliación del análisis: pared de 20 cm de espesor**

Con el fin de estudiar la posibilidad de generalizar los resultados anteriores para distintos espesores de pared, se decide realizar nuevamente los cálculos de estudio de los métodos de reducción de varianza con una pared de hormigón pesado de 20 cm de espesor. Se elige una pared de este espesor con el objetivo de disminuir los tiempos de cálculo involucrados: por ejemplo, aplicando ventanas de pesos con una pared de 20 cm de espesor se alcanza una convergencia del 1% en el error relativo en 5 minutos reales, mientras que los cálculos con 90 cm de pared requieren 30 minutos para alcanzar la misma convergencia.

Para este modelo se estudia el método de división de geometría mediante esquemas de importancias, sólo variando los saltos en importancia entre celdas consecutivas. Mientras que los métodos de transformación exponencial y ventanas de pesos se analizan en forma análoga al caso de pared de 90 cm de espesor.

## 4. Resultados y Discusiones

En este capítulo se presentan los resultados de los cálculos que se presentaron en el capítulo anterior y se discuten los mismos.

### 4.1. Comparación entre el *Tally* F6 y *Tally* F4

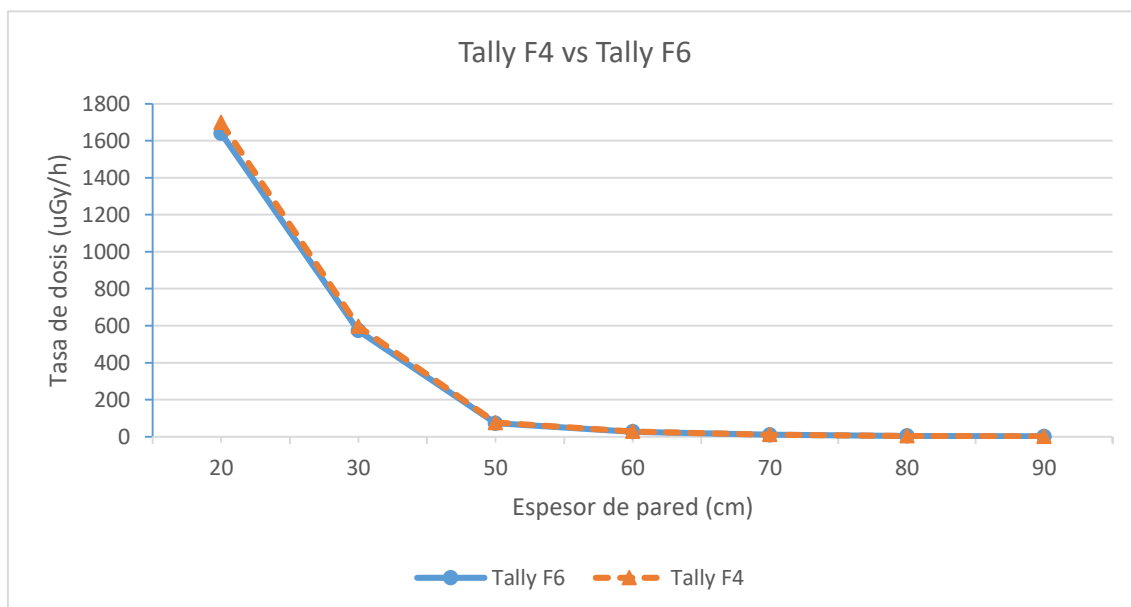


Figura 4.1 Tasa de dosis obtenido con los distintos tipos de *tallies* en función del espesor de pared. Los errores estadísticos de todos los puntos resultan menores al 1%.

En la Figura 4.1, se muestran los resultados de las tasas de dosis obtenidas para espesores crecientes, utilizando los *tally* F6 y F4. Se observa la disminución exponencial de la tasa de dosis con el aumento del espesor del blindaje. Con una pared de 90 cm se alcanza una tasa de dosis de aproximadamente 1,6  $\mu\text{Gy/h}$ , que está por debajo del límite de 3  $\mu\text{Gy/h}$  utilizado como criterio en este trabajo.

En la Figura 4.2 se presentan las diferencias porcentuales que resultan entre los valores de tasa de dosis determinados utilizando los *tally* F4 y F6. Se observa una diferencia de alrededor de un 4% con un error estadístico asociado del 1,5% aproximadamente, siendo siempre mayor la dosis obtenida a partir del *tally* F4.

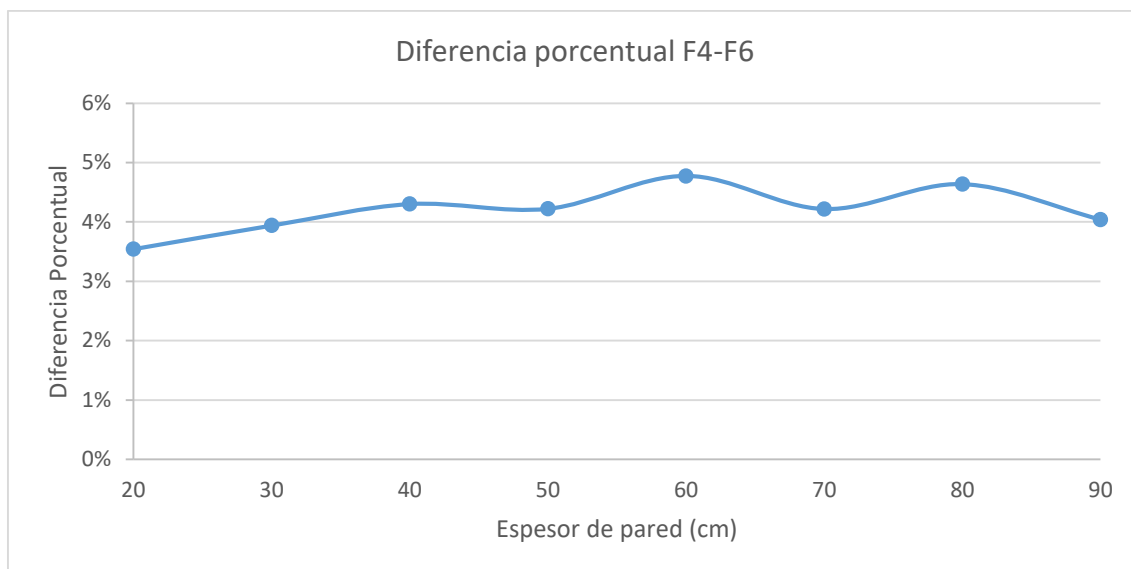


Figura 4.2 Diferencia porcentual entre los *tallies* F4 y F6. El error estadístico obtenido mediante propagación de errores para los puntos resulta en todos los casos menores al 1.5%.

Esta diferencia observada podría asociarse a las diferencias en las tablas utilizadas por MCNP en el caso del *tally* F6 y las tablas de factores de kerma usadas en el caso del *tally* F4.

Por otro lado con el *tally* F4, aunque las diferencias no superan el 5%, las dosis obtenidas resultaron siempre mayores que las determinadas por el *tally* F6, por lo que los resultados determinados para este caso particular son más conservativos usando el *tally* F4 y puede tomarse como un criterio en el cálculo de dosis.

#### 4.2. División de geometrías mediante esquema de importancias

En la Figura 4.3, se muestra la variación del FOM en función de los factores en que aumentan, de manera creciente, las importancias de los segmentos en que es dividida la pared de 90 cm. Se indica el FOM máximo que determina la configuración óptima para aplicar el método en la situación analizada.

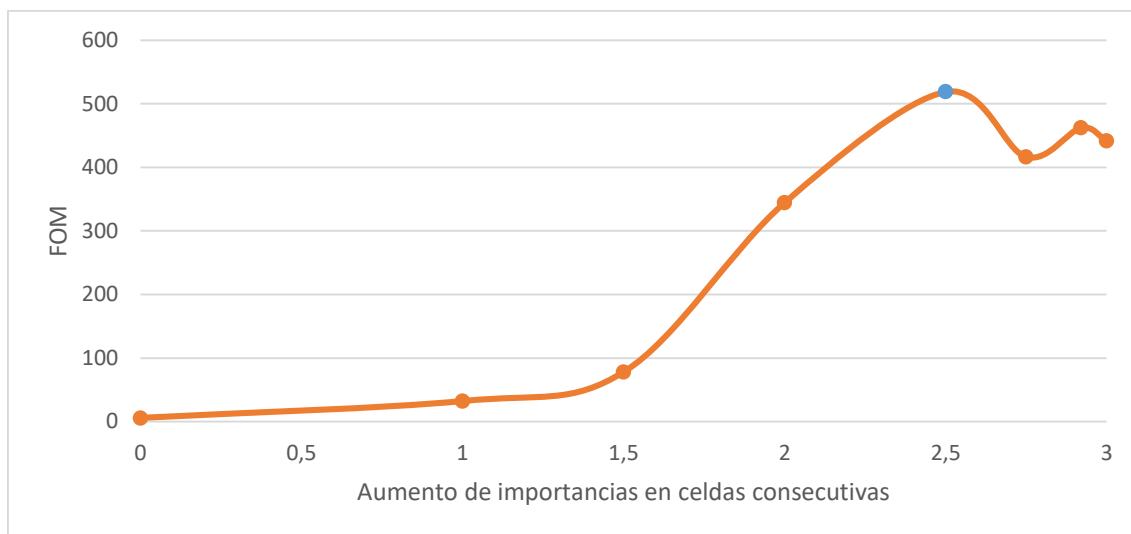


Figura 4.3 FOM en función de la relación de importancias entre celdas consecutivas. El valor de relación de importancias para el llamado “esquema óptimo” resulto 2,96.

En la Figura 4.3 se observa un incremento muy importante en el FOM cuando se utiliza algún esquema de importancias respecto del cálculo en el que no se utiliza este método de reducción de varianza. Se puede concluir que la utilización del esquema de importancias permite disminuir drásticamente los tiempos de cálculo necesarios para obtener resultados estadísticamente convergidos.

En el rango entre 2,5 y 3 de saltos de importancias, la variación del FOM resulta menor al 20%. Además, la utilización del “esquema óptimo” (relación de importancias de 2,96) arroja valores de FOM cercanos al valor máximo (10% de diferencia).

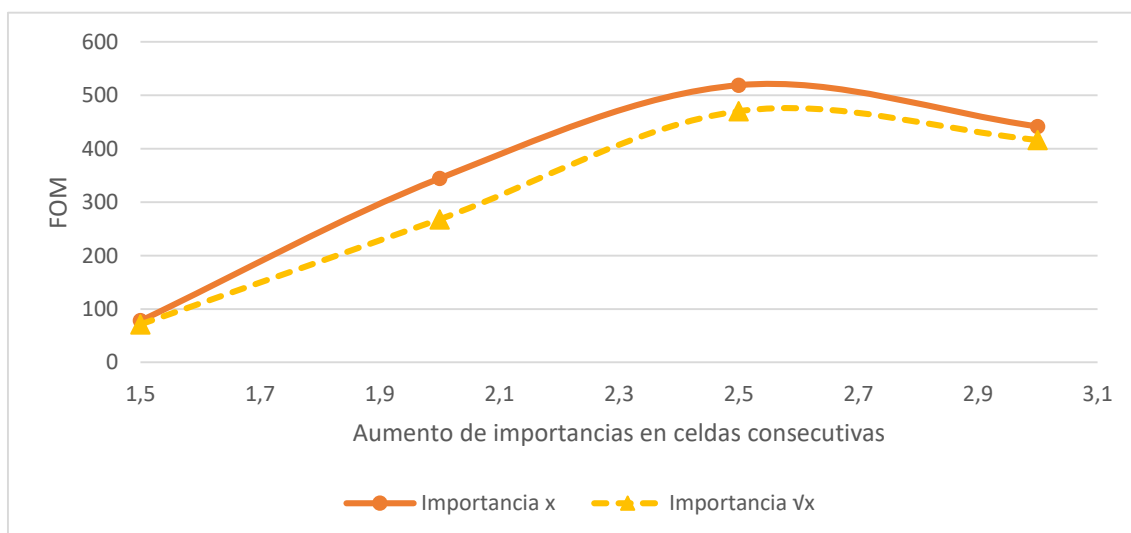


Figura 4.4 FOM en función de la relación entre importancias de celdas vecinas cuando se disminuye el tamaño de las celdas de 10 cm a 5 cm. Para espesores de celda de 5 cm, se utiliza una relación de importancias igual a raíz cuadrada de las relaciones utilizadas para el caso de celdas de 10 cm.

En la Figura 4.4 se presentan los resultados del análisis donde se divide a la pared de 90 cm en segmentos de 5 cm, en lugar de 10 cm, manteniendo la misma relación de importancia. Puede observarse que el comportamiento en la variación del FOM se mantiene, pero se obtienen valores más chicos en el caso de las divisiones de 5 cm. Esto puede explicarse, teniendo en cuenta que al hacer divisiones de menor espesor, aumentan las regiones en las que MCNP debe realizar cálculos (se duplican las celdas), incrementando el tiempo para llegar al resultado y por lo tanto provocando que el FOM disminuya.

Además, mientras que para el caso de divisiones de pared de 10 cm el FOM máximo se obtiene para una relación de importancias de 2,5, para las divisiones de pared de 5 cm esta relación resulta,  $2,5 \cdot 2 = 5$ . Si extrapolamos este resultado para divisiones de la pared en espesores más grandes, obtendríamos que el mayor FOM se encuentra para relaciones de importancia mayores a 2,5. Esto, sumado a la recomendación de MCNP de que la relación de importancias sea menor a 3, impondría un valor máximo al espesor de pared que permita utilizar un esquema de importancia óptimo.

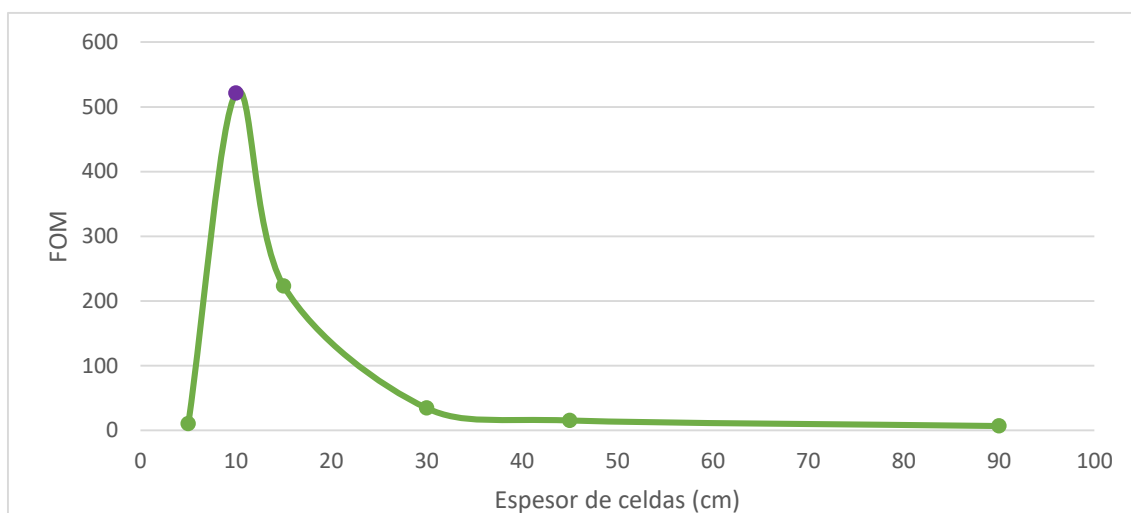


Figura 4.5 FOM en función del espesor de las celdas utilizando el esquema de importancia óptimo encontrado para el modelo con espesor de celda de 10 cm.

En la figura se observa que el esquema de importancia óptimo hallado para los segmentos de 10 cm de espesor, genera FOM menores cuando es utilizado en modelos con espesores de celdas distintos. Resulta importante hacer notar la gran diferencia que se observa en el FOM que se obtiene para celdas de 10 cm en relación a la celda de 15 cm. Esto nos permite concluir que la relación entre importancias de celdas vecinas que resultan en el máximo FOM difiere fuertemente en función del espesor de éstas. Por lo tanto, para cada espesor de celda es necesario determinar el esquema que produce el mayor FOM.

### 4.3. Transformación Exponencial

En la Figura 4.6 se presentan los resultados del análisis del método de reducción exponencial.

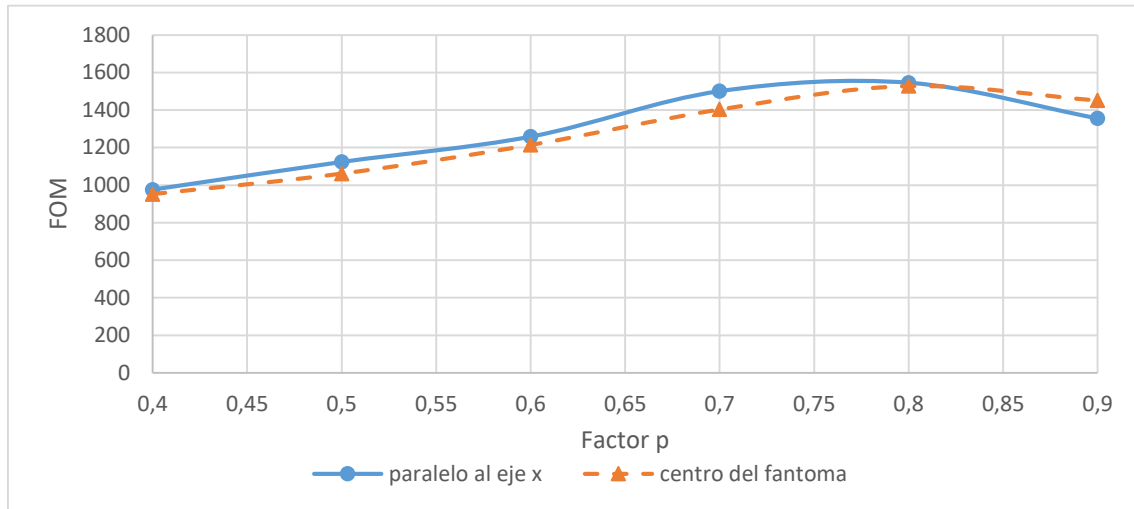


Figura 4.6 FOM en función del factor p

Se observa que para las dos direcciones analizadas se obtienen resultados similares y el mayor FOM se da para un factor p de 0.8, cercano a 0.7 que es el recomendado en el manual de MCNP [12].

Puede concluirse que para este método utilizar el factor p recomendado en el manual de MCNP y en dirección hacia la celda de análisis (sin necesidad de especificar un punto en particular) genera resultados satisfactorios.

#### 4.4. Ventanas de pesos

En la Figura 4.7 se representa la variación del FOM al modificar los parámetros WUPN, WSURVN y MXSPLN de manera simultánea.

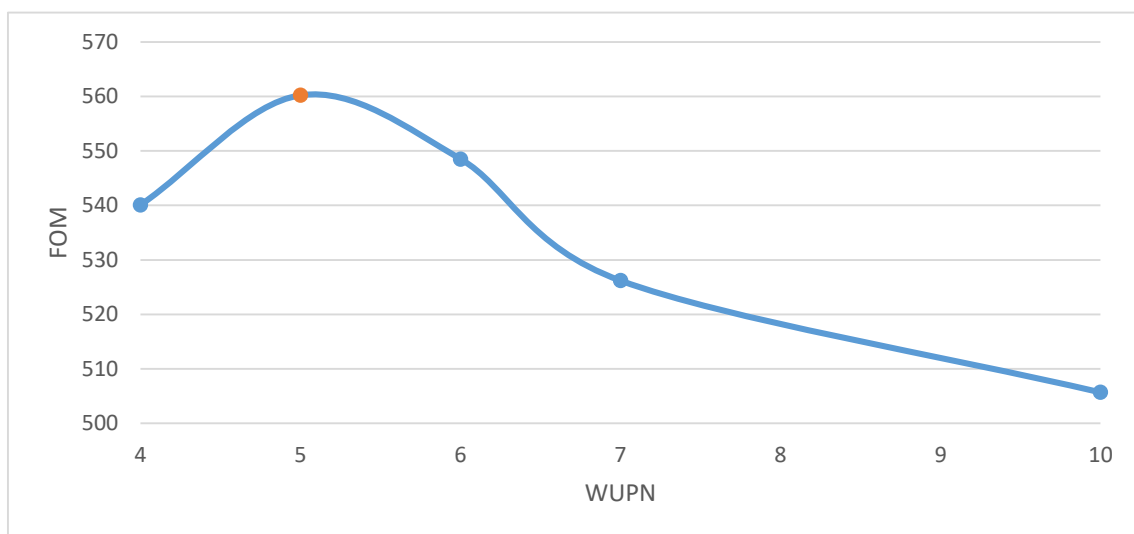


Figura 4.7 FOM en función del valor WUPN, cuando se varía en forma simultánea y proporcional los parámetros WUPN, WSURVN, MXSPLN.

La Figura 4.7 permite identificar el FOM máximo, que se corresponde con los siguientes valores: WUPN = 5, WSURVN = 3, MSXSPLN = 5

Esta configuración se toma como punto de comparación para modificar cada uno de los tres parámetros de análisis de manera individual.

En la Figura 4.8 se representa la variación del FOM, en función del factor WSURVN, el cual determina el peso de una partícula luego de sobrevivir a un sorteo por ruleta rusa. Los parámetros WUPN y MSXSPLN se mantienen constantes en un valor de 5.

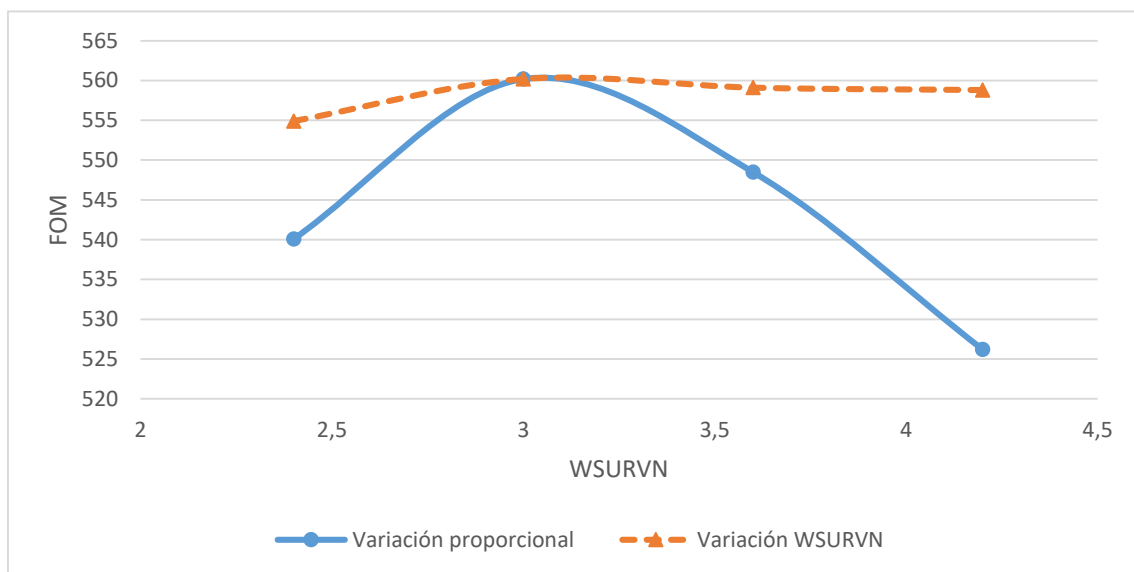


Figura 4.8 FOM en función del valor de WSURVN, cuando se mantienen constantes los valores de WUPN=5 y MSXSPLN=5.

En el gráfico se observa que al modificar el parámetro WSURVN, el FOM no se ve afectado de manera significativa.

La figura 4.9 muestra la variación del FOM al modificar, por separado, los parámetros WUPN y MSXSPLN, que determinan el límite superior de la ventana de peso y el número máximo en que será dividida una partícula respectivamente. El factor WSURVN se mantiene constante en un valor de 3.

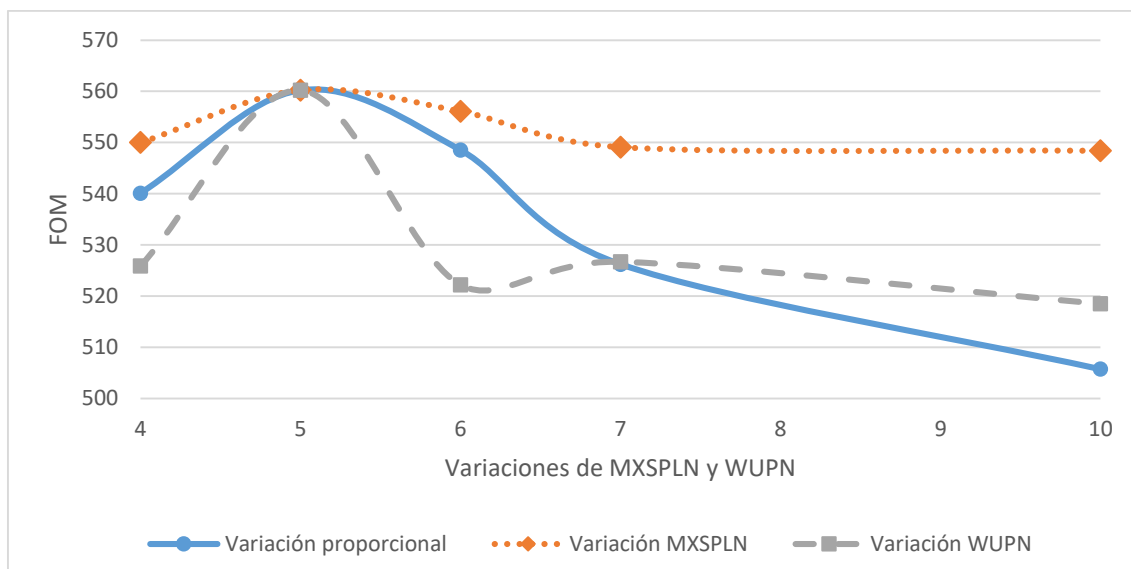


Figura 4.9 Variación del FOM en función del WUPN y del MXSPLN. Cuando se varía WUPN, MXSPLN (5) y WSURVN (3) se mantienen constantes. Cuando se varía MXSPLN, se mantienen constante WUPN (5) y WSURVN (3).

Comparando los resultados obtenidos en ambos gráficos, puede concluirse que el factor WUPN, es el único que afecta de manera significativa los resultados obtenidos con este método de reducción de varianza, pudiendo tomarse para los otros dos parámetros los valores sugeridos en el manual de MCNP.

#### 4.5. Combinación de métodos

La tabla 4.1 muestra los mayores valores de FOM obtenidos para los tres métodos de reducción de varianza estudiados. Asimismo, se presentan los resultados de la combinación de los métodos de esquema de importancias con transformación exponencial, y de ventanas de pesos con transformación exponencial.

Método de reducción de varianza	FOM
Sin método de reducción de varianza	6
Esquema de importancias	519
Ventanas de Pesos	560
Esquema de importancias y Transformación Exponencial	1545
Ventanas de Pesos y Transformación Exponencial	588

Tabla 4.1 Máximos valores de FOM obtenidos para cada método de reducción de varianza estudiado.

A partir de la tabla 4.1 puede verse que todos los métodos implican una mejora muy importante en relación al caso en el que no se aplica ninguno. Por otro lado la combinación del método de transformación exponencial tanto con el de esquema de importancias como con el de ventanas de pesos, resulta en valores mayores de FOM que la utilización de los mismos por separados.

El mayor valor de FOM se obtuvo cuando se combinaron los métodos esquema de importancia y transformación exponencial. En general, MCNP recomienda utilizar a la transformación exponencial junto con ventanas de peso, que en nuestro caso no significó una mejora muy importante respecto de utilizar sólo el método de ventanas de peso. Esto puede deberse a que la simplicidad de la geometría analizada, por lo que debería realizarse un análisis más amplio antes de generalizar los resultados obtenidos.

Sin embargo, es posible concluir que para el cálculo de blindaje dentro de las condiciones estudiadas, usar métodos de reducción de varianza combinados es más conveniente que utilizarlos individualmente.

#### 4.6. Ampliación del análisis: pared de 20 cm de espesor

##### 4.6.1. División de geometrías mediante esquema de importancias

En la Figura 4.10, se muestra la variación del FOM en función de los factores en que aumentan, de manera creciente, las importancias de los segmentos en que es dividida la pared de 20 cm. Se indica el FOM máximo que determina la configuración óptima para aplicar el método en la situación analizada.

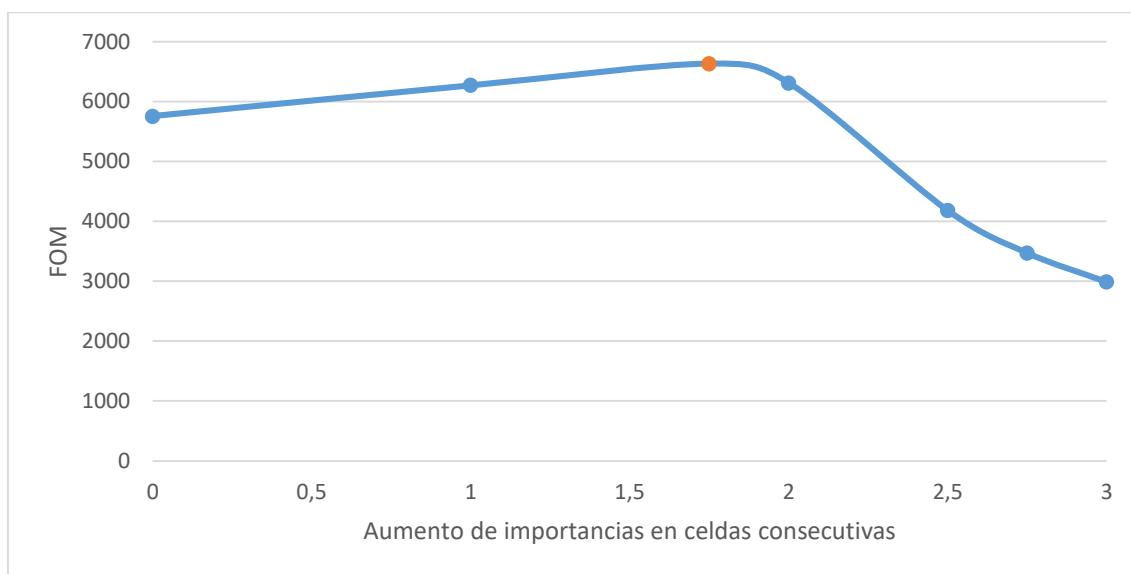


Figura 4.10 FOM en función del aumento de importancia en celdas consecutivas para el modelo con pared de 20 cm.

Puede observarse que el esquema de importancias para el caso de una pared de 20 cm no resulta tan necesario, como en el de 90 cm, ya que el aumento del FOM respecto del caso sin esquema de importancias es mucho menor. Sin embargo, se ve que la utilización del “esquema óptimo” implica una mejora del FOM respecto del resto de los casos.

Por último, se aprecia que para espesores chicos de celdas, utilizar esquemas de importancias con aumentos muy grandes afectan negativamente al FOM, ya que las partículas naturalmente tienden a atravesar la celda sin colisionar, por

lo que se está simulando varias veces a partículas idénticas, aumentando el tiempo de cálculo.

#### 4.6.2. Transformación exponencial

En la Figura 4.11 se presentan los resultados del análisis del método de reducción exponencial para el modelo de pared de 20 cm de espesor.

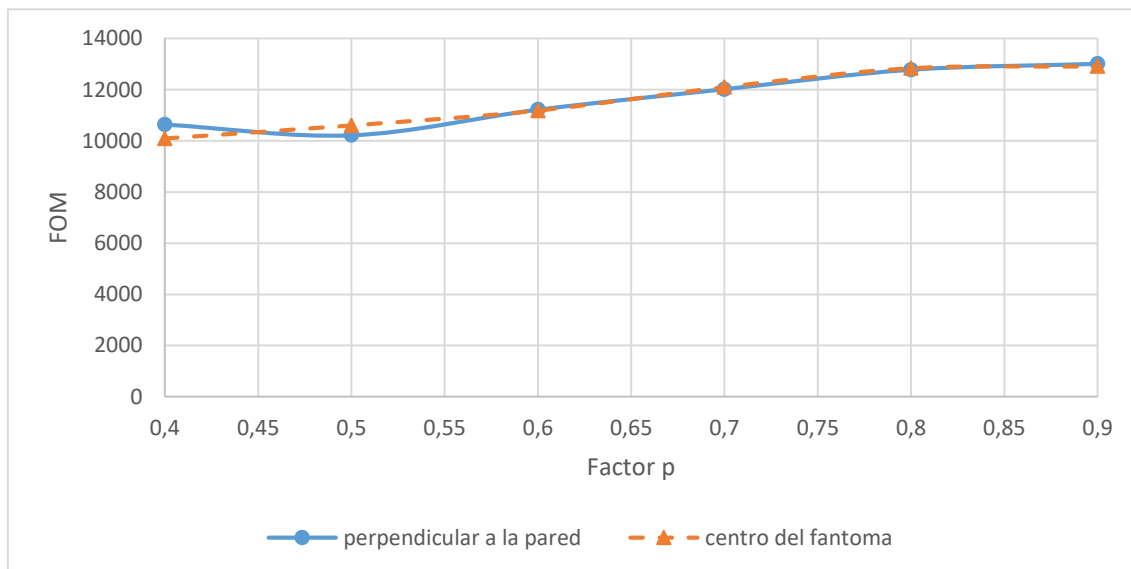


Figura 4.11 FOM en función del factor p

Al igual que en el modelo de pared de 90 cm se observa que para las dos direcciones analizadas se obtienen resultados similares y el FOM mayor se da para un factor p próximo al recomendado en el manual de MCNP.

#### 4.6.3. Ventanas de Pesos

En la Figura 4.12 se representa la variación del FOM al modificar los parámetros WUPN, WSURVN y MXSPLN de manera simultánea.

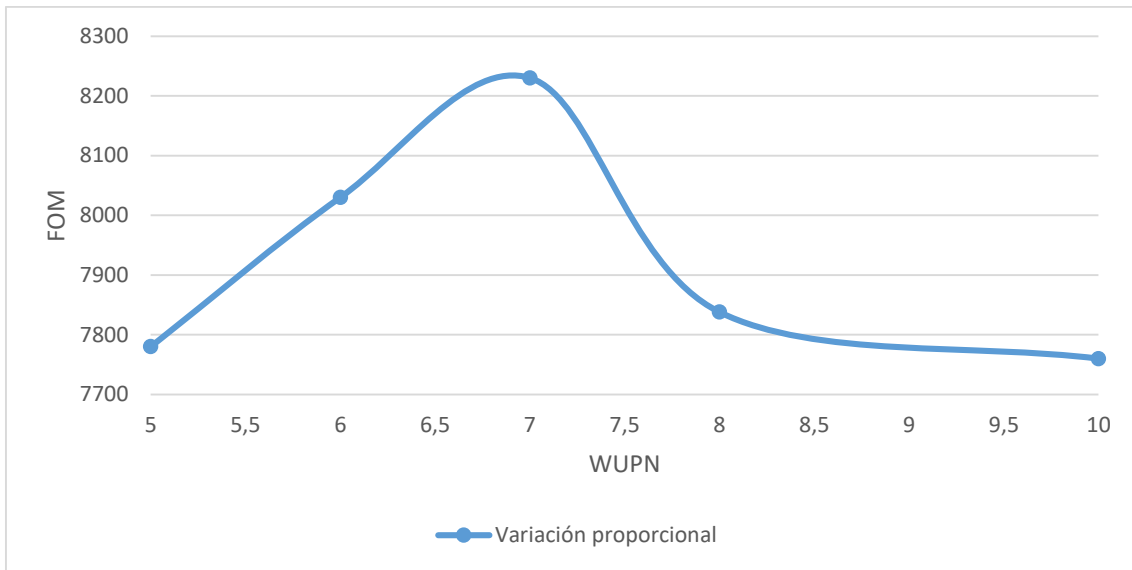


Figura 4.12 FOM en función del valor de WUPN ante la variación simultánea y en la misma proporción de los parámetros WUPN, WSURVN, MXSPLN de las ventanas de peso.

En este caso el FOM máximo se obtiene para los siguientes valores: WUPN = 7, WSURVN = 4.2, MSXSPLN = 7

En la Figura 4.13 se representa la variación del FOM, en función del factor WSURVN. Los parámetros WUPN y MXSPLN se mantienen constantes en un valor de 7.

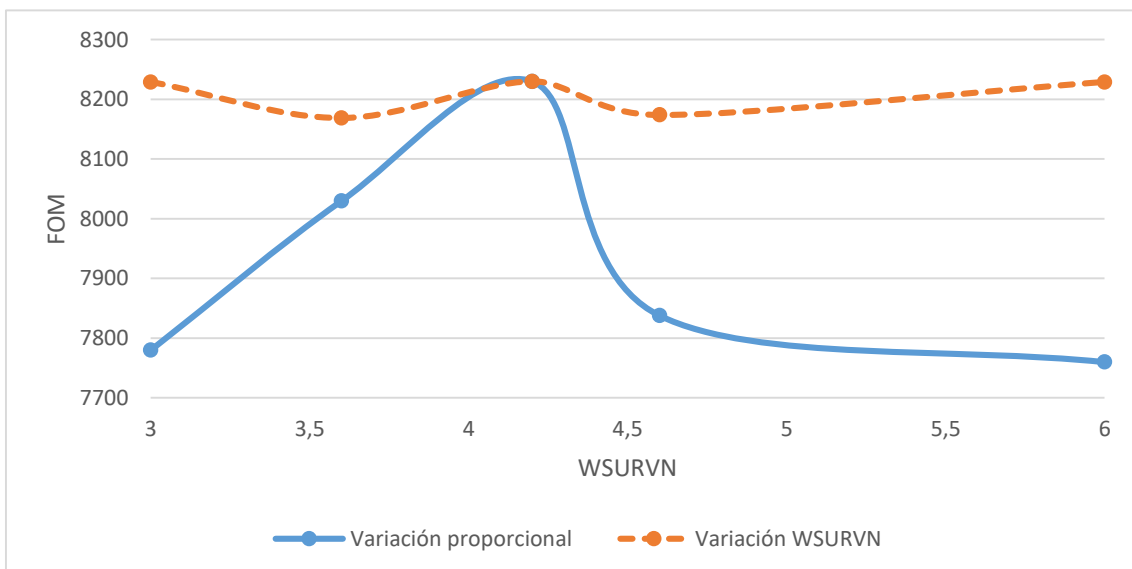


Figura 4.13 FOM en función del valor de WSURVN. Se compara el caso en el que mantienen constantes a WUPN (7) y MXSPLN (7) Con el caso en el que estos parámetros se varían en forma proporcional.

La Figura 4.14 muestra la variación del FOM al modificar, cada uno por separado, los parámetros WUPN y MXSPLN. El factor WSURVN se mantiene constante en un valor de 4,2.

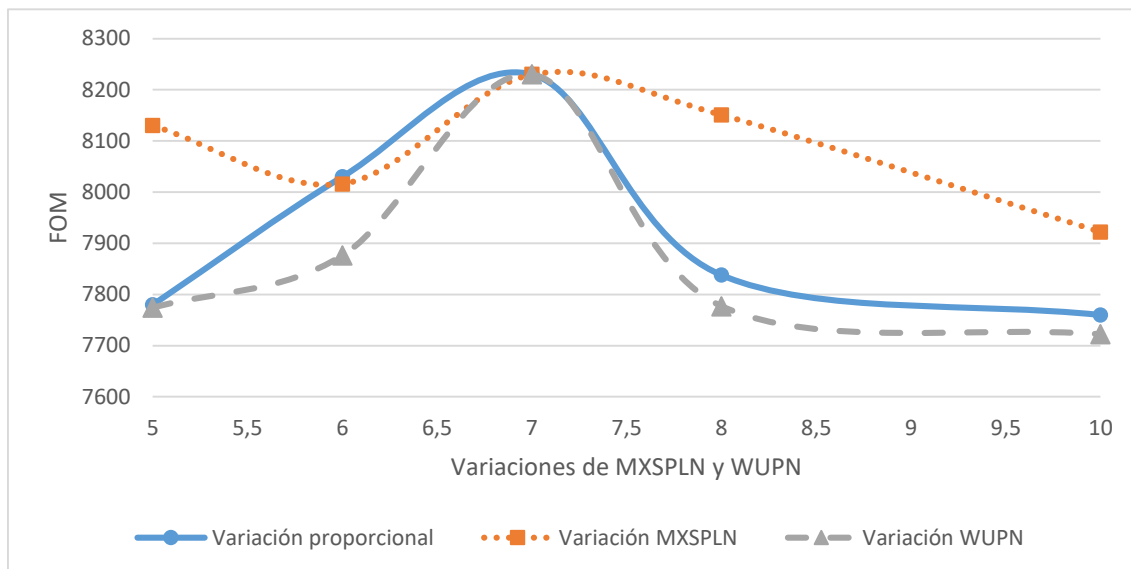


Figura 4.14 Variación del FOM en función del WUPN y del MXSPLN. Se compara el caso en el que mantiene constante a WSURVN (4.2) con el caso en el que estos parámetros se varían en forma proporcional.

Las figuras 4.13 y 4.14 muestran un comportamiento similar al modelo de pared de 90 cm de espesor, donde el factor WUPN, es el único que afecta de manera significativa los resultados obtenidos y por lo tanto podrían considerarse para los otros dos parámetros los valores sugeridos en el manual de MCNP.

Por último, puede observarse que para todos los casos estudiados, los FOM obtenidos con el modelo de pared de 20 cm son mayores que los determinados con el de 90 cm. Esto puede explicarse teniendo en cuenta que al tratarse de un blindaje de menor espesor, mayor cantidad de partículas pueden atravesarlo y alcanzan el fantoma de estudio, requiriéndose menor tiempo para obtener un resultado con error determinado.

## 5. Conclusiones

En la comparación de *tallies* mediante el cálculo de dosis a partir del *tally* F4 con coeficientes de kerma y del *tally* F6, se observa que existen diferencias menores al 5% en el estudio de fotones, resultando un análisis más conservativo utilizar el *tally* F4.

En el estudio de los métodos de reducción de varianza puede verse que existe un gran aumento en la eficiencia del cálculo, al utilizar cualquiera de ellos con respecto al caso en el que no se aplica método alguno. Esto produce una reducción de los tiempos necesarios para alcanzar una buena convergencia estadística de los resultados.

En el análisis de división de geometrías mediante esquema de importancias, puede concluirse que la mejor configuración depende de las subdivisiones que se hacen en las geometrías analizadas. Sin embargo, un esquema de importancia con el que se obtienen altos valores de figura de mérito puede obtenerse a partir de buscar que la población de partículas en cada subdivisión se mantenga constante.

Para los métodos de transformación exponencial y ventanas de pesos utilizar las configuraciones sugeridas en el manual de MCNP es suficiente para obtener resultados aceptables. El valor de la figura de mérito, en el caso en el que se analizó la reducción de varianza por ventanas de peso, resultó ser más sensible con el valor mínimo de peso que se determina para cada ventana que para el resto de los parámetros analizados.

Por último, combinar métodos de reducción de varianza aumenta aún más la eficiencia del cálculo con MCNP, reduciendo los tiempos necesarios o disminuyendo los errores asociados al mismo.

Resulta importante señalar que el alcance de los resultados obtenidos y los análisis realizados pueden no ser válidos en situaciones que se alejen del modelo aquí presentado. Sin embargo, este trabajo puede servir como punto de partida para un análisis más profundo que incorpore otros materiales, geometrías y tipo de radiación.

## 6. Referencias bibliográficas

- [1] “Radiaciones Ionizantes, Utilización y Riesgos – Parte I”, Xavier Ortega Aramburu y Jaume Jorba Bisbal, Ediciones UPS, España (1996).
- [2] “Introduction to radiological physics and radiation dosimetry”. Attix, F.H, John Wiley & Sons inc., New York (1986).
- [3] “Introduction to Nuclear Engineering”, Lamarsh, J. R., Baratta, A. J., Third Edition, Prentice Hall, 2001.
- [4] “Nuclear Reactors Analysis”, Duderstadt, J. J., Hamilton, L. J., Wiley, 1976.
- [5] “Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport”, Bielajew, A. F., University of Michigan, Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences, 2000.
- [6] “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code”, X-5 Monte Carlo Team, Version 5 (LA-UR-03-1987), Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [7] “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code”, Volume I Chapter 2 X-5 Monte Carlo Team, Version 5 (LA-UR-03-1987), Los Alamos National Laboratory, 2003.
- [8] Norma AR 4.1.1. Exposición ocupacional en reactores de investigación. Revisión 0. Autoridad Regulatoria Nuclear.
- [9] Hubbell, J. H., Seltzer, S. M., “Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest”, NISTIR 5632, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (May 1995 – Last Update: July 2004).
- [10] “Importance Determination Method for Geometry Splitting with Russian Roulette in Monte Carlo Calculations of Thick and Complicated Core Shielding Structure”, Murata, I., Shindo, R., Shiozawa, S., Journal of Nuclear Science and Technology (2012).
- [11] BOOTH, T.E., HENDRICKS, S. Importance estimation in forward Monte Carlo calculations, Nucl. Technol. f Fusion, 5, 90 (1984).
- [12] “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code”, Volume II Chapter 3 X-5 Monte Carlo Team, Version 5 (LA-UR-03-1987), Los Alamos National Laboratory, 2003.

## 7. Anexos

### 7.1. Anexo 1 Unidades y medidas [1][2]

- Fluencia de partículas ( $\phi$ ): Es la variación en la cantidad de partículas ( $dN$ ) que emergen o llegan a una superficie de sección transversal ( $da$ ).

$$\phi = \frac{dN}{da} \left[ \frac{1}{m^2} \right]$$

- Tasa de fluencia de partículas ( $\phi$ ): Es la variación en la cantidad de partículas ( $dN$ ) que emergen o llegan por unidad de superficie ( $da$ ) y por unidad de tiempo ( $dt$ ).

$$\phi = \frac{d^2N}{da * dt} \left[ \frac{1}{m^2s} \right]$$

- Fluencia de energía ( $\psi$ ): Es la variación de energía ( $dE$ ) debida a partículas que emergen o llegan a una superficie de sección transversal  $da$ :

$$\psi = \frac{dE}{da} \left[ \frac{J}{m^2} \right]$$

Para el caso de fuentes puntuales isotrópicas electromagnéticas monoenergéticas de actividad conocida, la tasa de fluencia de energía absorbida resultará:

$$\psi = \frac{A}{4 * \pi * r^2} * \epsilon_E * E$$

$\epsilon_E$ : eficiencia de emisión del fotón

- Flujo de energía o tasa de fluencia de energía ( $\Psi$ ): Es la variación de energía  $dE$  debida a las partículas que emergen o llegan a una superficie dada  $da$  y por unidad de tiempo  $dt$ .

$$\Psi = \frac{d^2E}{da * dt} \left[ \frac{J}{m^2s} \right]$$

- Coeficiente de atenuación másico ( $\mu/\rho$ ): Es la fracción de partículas sin carga que experimentan interacciones al atravesar una distancia elemental  $dl$  en un material de densidad  $\rho$ .

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{dN}{N * \rho * dl} \left[ \frac{m^2}{kg} \right]$$

- Energía transferida ( $E_{Tr}$ ): Es la fracción de radiación electromagnética incidente de una determinada energía que interactúa con un dado material, y se transfiere como energía cinética a los electrones del mismo. Los

electrones que potencialmente sean liberados en el proceso estarán sujetos a experimentar todos los mecanismos de interacción con la materia, colisiones elásticas o inelásticas y frenado (Bremsstrahlung).

- Coeficiente de transferencia másico ( $\mu_{Tr}/\rho$ ): Permite cuantificar la energía transferida y está establecido para cada medio y energía del fotón incidente.
- Kerma: Es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas, liberadas por partículas ionizantes sin carga, en una masa  $dm$ .

$$K = \frac{dE_{Tr}}{dm} \left[ \frac{J}{kg} \right] [Gy]$$

Para el caso de radiaciones electromagnéticas:

$$K = \frac{\mu_{Tr}}{\rho} * \Psi$$

- Energía impartida ( $\epsilon$ ): Fracción de la energía transferida como energía cinética a electrones del medio, debida a la radiación electromagnética incidente, que se transmite a otros electrones exclusivamente excitándolos e ionizándolos ya sea por colisiones elásticas o inelásticas, sin considerar la conversión en energía radiante por efectos del frenado (Bremsstrahlung).
- Coeficiente másico de absorción de energía ( $\mu_{en}/\rho$ ): Permite cuantificar la energía impartida y está establecido para cada medio y energía del fotón incidente.
- Dosis absorbida (D): Es el valor medio de la energía impartida, por la radiación ionizante, a la materia por unidad de masa

$$D = \frac{d\epsilon}{dm} \left[ \frac{J}{kg} \right] [Gy]$$

Para las radiaciones electromagnéticas resulta la dosis absorbida como el producto entre el coeficiente de absorción energético másico por la fluencia de energía:

$$D = \frac{\mu_{en}}{\rho} * \Psi$$

De igual forma se puede calcular la tasa de Kerma y la tasa de Dosis absorbida, considerando en lugar de la fluencia de energía, la correspondiente tasa de fluencia de energía.

- Tasa de dosis absorbida en un medio

Para el caso de una fuente electromagnética puntual monoenergética de actividad  $A$ , a la distancia  $r$ , considerando la atenuación que la radiación puede sufrir al atravesar el medio:

$$\dot{D} = \frac{\mu_{en}}{\rho} * \psi = \frac{A}{4 * \pi * r^2} * \frac{\mu_{en}}{\rho} * \varepsilon * E * e^{-r\mu}$$

Para el caso de fuentes polienergéticas:

$$\dot{D} = \frac{\mu_{en}}{\rho} * \psi = \frac{A}{4 * \pi * r^2} * \sum_i \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} * \varepsilon_{Ei} * E_i * e^{-r\mu(E,medio)} \right)$$

- Eficiencia biológica relativa (EBR):

La dosis absorbida no es magnitud suficiente en sí misma para caracterizar un daño. El riesgo de efecto biológico no depende solo de la energía depositada por unidad de masa de tejido irradiado sino también del modo en que esta energía es distribuida.

La EBR sirve para comparar la eficacia de dos tipos de radiaciones para causar daño biológico.

$$EBR = \frac{\text{Dosis de radiación de referencia}}{\text{Dosis de radiación que produce igual efecto}}$$

- Factor de ponderación: Es una medida de los efectos biológicos producidos por las distintas radiaciones, comparados con los producidos por los rayos X y gamma para una dosis absorbida dada, refleja la efectividad biológica relativa de las radiaciones en la producción de efectos estocásticos a bajas dosis.
- Dosis equivalente ( $H_{TR}$ ):

$$H_T = \sum W_R * D_{TR} \left[ \frac{J}{kg} \right] [Sv]$$

$W_R$  es el factor de ponderación de la radiación, que depende del tipo y energía de la radiación, pero no del tejido irradiado y  $D_{TR}$  es la dosis absorbida promediada sobre el tejido  $T$  debida a la radiación  $R$ .

- Dosis efectiva (E): La dosis efectiva es la suma ponderada de las dosis equivalentes medias, recibidas en los distintos órganos o tejidos. El riesgo de la ocurrencia de efectos de carácter estocásticos, no sólo depende del tipo de radiación considerado por medio del factor  $W_R$ , sino que distintos órganos y tejidos muestran diferentes radiosensibilidades para determinados efectos. La consideración de este comportamiento se introduce con otro factor de ponderación por órgano o tejido  $W_T$ , modificante de la dosis equivalente en un dado tejido u órgano.

$$E = \sum W_T * H_T \left[ \frac{J}{kg} \right] [Sv]$$

## 7.2. Anexo 2: Tablas de coeficientes másicos de absorción de energía

Valores de coeficientes másicos de absorción de energía en función de la energía del fotón para hidrógeno y oxígeno, utilizado para el cálculo de factores de kerma.

<b>Hydrogen Z = 1</b>		
<b>Energy (MeV)</b>	<b><math>\mu/\rho</math> (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b><math>\mu_{en}/\rho</math> (cm<sup>2</sup>/g)</b>
1.00000E-03	7.217E+00	6.820E+00
1.50000E-03	2.148E+00	1.752E+00
2.00000E-03	1.059E+00	6.643E-01
3.00000E-03	5.612E-01	1.693E-01
4.00000E-03	4.546E-01	6.549E-02
5.00000E-03	4.193E-01	3.278E-02
6.00000E-03	4.042E-01	1.996E-02
8.00000E-03	3.914E-01	1.160E-02
1.00000E-02	3.854E-01	9.849E-03
1.50000E-02	3.764E-01	1.102E-02
2.00000E-02	3.695E-01	1.355E-02
3.00000E-02	3.570E-01	1.863E-02
4.00000E-02	3.458E-01	2.315E-02
5.00000E-02	3.355E-01	2.709E-02
6.00000E-02	3.260E-01	3.053E-02
8.00000E-02	3.091E-01	3.620E-02
1.00000E-01	2.944E-01	4.063E-02
1.50000E-01	2.651E-01	4.813E-02
2.00000E-01	2.429E-01	5.254E-02
3.00000E-01	2.112E-01	5.695E-02
4.00000E-01	1.893E-01	5.860E-02
5.00000E-01	1.729E-01	5.900E-02
6.00000E-01	1.599E-01	5.875E-02
8.00000E-01	1.405E-01	5.739E-02
1.00000E+00	1.263E-01	5.556E-02
1.25000E+00	1.129E-01	5.311E-02
1.50000E+00	1.027E-01	5.075E-02
2.00000E+00	8.769E-02	4.650E-02
3.00000E+00	6.921E-02	3.992E-02
4.00000E+00	5.806E-02	3.523E-02
5.00000E+00	5.049E-02	3.174E-02

6.00000E+00	4.498E-02	2.905E-02
8.00000E+00	3.746E-02	2.515E-02
1.00000E+01	3.254E-02	2.247E-02
1.50000E+01	2.539E-02	1.837E-02
2.00000E+01	2.153E-02	1.606E-02

**Oxygen**  
**Z = 8**

Energy (MeV)	$\mu/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)	$\mu_{en}/\rho$ (cm <sup>2</sup> /g)
1.00000E-03	4.590E+03	4.576E+03
1.50000E-03	1.549E+03	1.545E+03
2.00000E-03	6.949E+02	6.926E+02
3.00000E-03	2.171E+02	2.158E+02
4.00000E-03	9.315E+01	9.221E+01
5.00000E-03	4.790E+01	4.715E+01
6.00000E-03	2.770E+01	2.708E+01
8.00000E-03	1.163E+01	1.116E+01
1.00000E-02	5.952E+00	5.565E+00
1.50000E-02	1.836E+00	1.545E+00
2.00000E-02	8.651E-01	6.179E-01
3.00000E-02	3.779E-01	1.729E-01
4.00000E-02	2.585E-01	7.530E-02
5.00000E-02	2.132E-01	4.414E-02
6.00000E-02	1.907E-01	3.207E-02
8.00000E-02	1.678E-01	2.468E-02
1.00000E-01	1.551E-01	2.355E-02
1.50000E-01	1.361E-01	2.506E-02
2.00000E-01	1.237E-01	2.679E-02
3.00000E-01	1.070E-01	2.877E-02
4.00000E-01	9.566E-02	2.953E-02
5.00000E-01	8.729E-02	2.971E-02
6.00000E-01	8.070E-02	2.957E-02
8.00000E-01	7.087E-02	2.887E-02
1.00000E+00	6.372E-02	2.794E-02
1.25000E+00	5.697E-02	2.669E-02
1.50000E+00	5.185E-02	2.551E-02
2.00000E+00	4.459E-02	2.350E-02
3.00000E+00	3.597E-02	2.066E-02
4.00000E+00	3.100E-02	1.882E-02

5.00000E+00	2.777E-02	1.757E-02
6.00000E+00	2.552E-02	1.668E-02
8.00000E+00	2.263E-02	1.553E-02
1.00000E+01	2.089E-02	1.483E-02
1.50000E+01	1.866E-02	1.396E-02
2.00000E+01	1.770E-02	1.360E-02

### 7.3. Anexo 3: Entrada de un caso corrido con MCNP

Archivo de entrada usada para determinar el FOM aplicando división de geometrías mediante esquemas de importancia, en un modelo de pared de 90 cm de espesor dividida en 9 segmentos de 10 cm cada uno y utilizando un factor de aumento de importancias de 2,75

Geometria 2 variación de importancia con factor de 2.75

c Celdas

```

1 1 -1 -1 imp:p=3270.85695 $ fantoma de agua
2 1 -1 -2 imp:p=1 $ tubo 1
3 1 -1 -3 imp:p=1 $ tubo 2
4 0 2 3 6 -4 imp:p=1 $ región 1 antes de la pared
5 0 1 6 7 8 9 10 11 12 13 14 -5 imp:p=3270.85695 $ región 2
después de la pared imp
6 0 4 5 imp:p=0 $ vacío
7 3 -3.36 -6 7 imp:p=2.75
8 3 -3.36 -7 8 imp:p=2.5625
9 3 -3.36 -8 9 imp:p=20.796875
10 3 -3.36 -9 10 imp:p=57.1914063
11 3 -3.36 -10 11 imp:p=243
12 3 -3.36 -11 12 imp:p=157.276367
13 3 -3.36 -12 13 imp:p=432.51001
14 3 -3.36 -13 14 imp:p=1189.40253
15 3 -3.36 -14 imp:p=3270.85695

```

c Superficies

```

1 RCC 190 0 0 0 0 175 35 $ fantoma
2 RCC -20 -300 150 0 600 0 5.715 $ tubo 1
3 RCC -40 -300 200 0 600 0 8.4 $ tubo 2
4 RPP -50 0 -300 300 0 300 $ región 1
5 RPP 0 225 -300 300 0 300 $ región 2
c división de pared cada 10 cm espesor de 90 cm
6 RPP 0 10 -300 300 0 300
7 RPP 10 20 -300 300 0 300
8 RPP 20 30 -300 300 0 300
9 RPP 30 40 -300 300 0 300
10 RPP 40 50 -300 300 0 300
11 RPP 50 60 -300 300 0 300
12 RPP 60 70 -300 300 0 300
13 RPP 70 80 -300 300 0 300
14 RPP 80 90 -300 300 0 300

```

C Otros datos

c Agua

m1 1001 2

8016 1

mt1 lwtr.01t

c Hormigón pesado. Rho: 3.36 g/cm<sup>3</sup>

m3 1001.70 -0.001549597 \$ H-1

1002.70 -0.000000465 \$ H-2

6000.70 -0.001

8016.70 -0.320345608 \$ O-16

8017.70 -0.000812636 \$ O-17

12024.70 -0.00174608 \$ Mg-24

12025.70 -0.000230272 \$ Mg-25

12026.70 -0.000263648 \$ Mg-26

14028.70 -0.038402914 \$ Si-28

14029.70 -0.002019776 \$ Si-29

14030.70 -0.00137731 \$ Si-30

16032.70 -0.002558115 \$ S-32

16033.70 -0.000020817 \$ S-33

16034.70 -0.00012042 \$ S-34

16036.70 -0.000000594 \$ S-36

17035.70 -0.0000911767 \$ Cl-35

17037.70 -0.00003082208 \$ Cl-37

20040.70 -0.076652173 \$ Ca-40

20042.70 -0.000536861 \$ Ca-42

20043.70 -0.000114985 \$ Ca-43

20044.70 -0.001817556 \$ Ca-44

20046.70 -0.000003965 \$ Ca-46

20048.70 -0.000177632 \$ Ca-48

22046.70 -0.0000604296 \$ Ti-46

22047.70 -0.00005568374 \$ Ti-47

22048.70 -0.00056343735 \$ Ti-48

22049.70 -0.00004220916 \$ Ti-49

22050.70 -0.00004124015 \$ Ti-50

25055.70 -0.00155 \$ Mn-55

26054.70 -0.0291734466 \$ Fe-54

26056.70 -0.4748668242 \$ Fe-56

26057.70 -0.011160936 \$ Fe-57

26058.70 -0.0015139603 \$ Fe-58

29063.70 -0.000753489 \$ Cu-63

29065.70 -0.0003465 \$ Cu-65

30000.70 -0.012701143

53127.70 -0.0162 \$ I-127

82204.70 -0.0000146757 \$ Pb-204

82206.70 -0.00025514205 \$ Pb-206

82207.70 -0.0002351094 \$ Pb-207

82208.70 -0.0005601474 \$ Pb-208

mt3 lwtr.10t

c Aire. Rho: 0.00121 g/cm<sup>3</sup>

m4 7014.70 -0.777867 \$ N-14

8016.70 -0.222133 \$ O-16

c Especificaciones de fuente



```

mode p
SDEF AXS 0 1 0 POS d4 EXT d1 RAD fpos d2 ERG d3 wgt 2.518e11
si1 0 600          $ distribución histograma en longitud de tubos
sp1 0 1           $ probabilidad homogénea en la longitud
ds2 S 5 6         $ función para sortear los tubos
si5 0 5.715       $ distribución histograma en radio de tubo 1
sp5 -21 1         $ probabilidad de distribución en radio
si6 0 8.4
sp6 -21 1
si3 L 6.12863 7.11515      $ energías discretas de los fotones
sp3 0.67 0.049            $ rendimiento de las energías
si4 L -20 -300 150 -40 -300 200 $ distribución de la POS
sp4 61564.95 133002.466    $ volúmenes de los tubos 1 y 2
nps 1e7
c Tally
F6:P 1
E6 0.5 2 5 8
F14:P 1
E14 0.5 2 5 8
c factores de conversión de flujo a dosis para fotones -----
c referencia:Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and
Mass Energy-Absorption
c Coefficients from 1 keV to 20 MeV NISTIR 5632, National
Institute of Standards and Technology
fm14 3.6e03 $ multiplicador para convertir pGy a uGy y seg a
hr
c Energía en MeV
de14 1.0E-03 1.50E-03 2.0E-03 3.0E-03 4.0E-03 5.0E-03 6.0E-03
8.0E-03 1.0E-02 &
1.50E-02 2.0E-02 3.0E-02 4.0E-02 5.0E-02 6.0E-02 8.0E-02
1.0E-01 1.50E-01 &
2.0E-01 3.0E-01 4.0E-01 5.0E-01 6.0E-01 8.0E-01 1.0E+00
1.25E+00 1.50E+00 &
2 3 4 5 6 8 10 15 20
c Valores en dosis (uGy cm2) correspondientes a la entrada
anterior
df14 6.52E-04 3.30E-04 1.97E-04 9.22E-05 5.25E-05 3.36E-05
2.31E-05 &
1.27E-05 7.93E-06 3.30E-06 1.76E-06 7.49E-07 4.45E-07
3.38E-07 &
3.07E-07 3.33E-07 4.08E-07 6.64E-07 9.50E-07 1.53E-06
2.10E-06 &
2.64E-06 3.15E-06 4.11E-06 4.97E-06 5.93E-06 6.80E-06
8.35E-06 &
1.10E-05 1.32E-05 1.53E-05 1.74E-05 2.13E-05 2.51E-05
3.47E-05 &
4.45E-05
print 110

```