

PROYECTO INTEGRADOR INGENIERÍA NUCLEAR

IMPLEMENTACIÓN DE UNA LÍNEA DE CÁLCULO BASADA EN EL CÓDIGO TRIPOLI A PROBLEMAS DE BLINDAJE DEL REACTOR RA-10

Jonathan Emanuel Ayala

Mgter. Ariel Aníbal Márquez

Director

Dr. José Ignacio Márquez Damián

Co-director

Miembros del Jurado

Ing. Aníbal Blanco (Instituto Balseiro)

Ing. Daniel Hergenreder (INVAP S.E.)

Junio 2019

Departamento de Física de Reactores y Radiaciones

Instituto Balseiro

Universidad Nacional de Cuyo

Comisión Nacional de Energía Atómica

Argentina

A todo el cabello que se me cayó en el proceso.

Índice de contenidos

Índice de contenidos	v
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
1. Introducción	1
1.1. Reactor RA-10	1
1.2. Motivación y objetivos	2
1.2.1. TRIPOLI	3
1.2.2. Mc-Stas	4
1.2.3. SALOME - McCAD	5
2. Estudios de factibilidad	7
2.1. TRIPOLI: primeros pasos	7
2.2. Técnicas de reducción de varianza	8
2.2.1. Volume Splitting	9
2.2.2. Optical Biasing	9
2.2.3. Ruleta Rusa	9
2.2.4. Módulo INIPOND: Transformación Exponencial	9
2.3. Fuente externa	10
2.4. Paralelización	11
3. Primeros resultados	13
3.1. Problema inicial en TRIPOLI	13
3.1.1. Reducción de Varianza	14
3.1.2. Paralelización	18
3.1.3. Tallies	18

3.2. Karlsruhe Iron Sphere Benchmark Experiment	19
3.2.1. Descripción del experimento	19
3.2.2. Fuente de neutrones	19
3.2.3. Modelo de TRIPOLI	20
3.2.4. Resultados obtenidos	21
4. Programación de fuentes de distribuciones para su uso en TRIPOLI	23
4.1. Fuente de TRACKS y Distribuciones	23
4.2. Análisis fuente de TRACKS	25
4.3. Fuente de Distribuciones	29
4.3.1. Benchmark TRIPOLI-McStas	32
4.3.2. Discretizaciones utilizadas y resultados integrales obtenidos . . .	33
4.3.3. Cálculo de Dosis equivalente ambiental	34
5. Estudio conceptual de un blindaje de radiación	35
5.1. Criterio de diseño	35
5.2. Modelo de cálculo	35
5.3. Resultados preliminares	36
5.4. Traslado de Fuente de Distribuciones	37
5.5. Caracterización de la nueva fuente de distribuciones	38
5.6. Generación del nuevo modelo de cálculo	38
5.7. Resultados en reactor-face	39
6. Conclusiones	59
A. Actividades de formación y desarrollo	61
A.1. Práctica Profesional Supervisada (PPS).	61
A.2. Proyecto y Diseño (P&D).	61
Bibliografía	63
Agradecimientos	65

Índice de figuras

1.1. Esquema de pileta del Reactor RA-10.	2
3.1. Esquemas de iso-importancia para los diferentes grupos de energía. . .	15
3.2. Mapa de colisiones.	15
3.3. Incerteza del cálculo en función del número de historias simuladas, ambos en escala logarítmica.	16
3.4. Tiempo de cálculo en función del número de historias simuladas, ambos en escala logarítmica.	17
3.5. Incerteza del cálculo en función del tiempo total de cálculo, ambos en escala logarítmica.	17
3.6. Relación entre tiempo de simulación y cantidad de procesadores utilizados para los casos con y sin reducción de varianza.	18
3.7. Descripción del arreglo experimental.	20
3.8. Modelo de cálculo en TRIPOLI.	21
3.9. Espectros de fuga normalizados. Detector 1. [0.06-0.8]MeV	21
3.10. Espectros de fuga normalizados. Detector 2. [0.3-2.4]MeV	22
3.11. Espectros de fuga normalizados. Detector 3. [0.8-5.4]MeV	22
4.1. Modelo del núcleo y pileta del RA-10 para MCNP.	26
4.2. Trazado de rayos plano zx.	27
4.3. Distribución espacial de la corriente para neutrones y fotones.	28
4.4. Espectro para neutrones y fotones.	28
4.5. Distribución en θ integral de las fuentes de neutrones y fotones.	29
4.6. Distribución en φ integral de las fuentes de neutrones y fotones.	29
4.7. Esquema de discretizaciones utilizadas para las variables.	31
4.8. Distribución espacial de la corriente para neutrones y fotones.	34
5.1. Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI.	36
5.2. Tasa de dosis total en $[\frac{\mu Sv}{h}]$. La fuente se encuentra en la superficie P1.	37
5.3. Distribución espacial de la corriente para neutrones y fotones.	38
5.4. Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI.	39

5.5. Distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental en $\frac{\mu Sv}{h}$. .	43
5.6. Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI, incluyendo el beam catcher.	44
5.7. Distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental en $\frac{\mu Sv}{h}$. .	48
5.8. Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI, incluyendo el beam catcher y recubrimiento de 5 cm de espesor en la paredes de B_4C . En negro se observa el recubrimiento de B_4C	49
5.9. Distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental en $\frac{\mu Sv}{h}$. .	53
5.10. Curvas de igual tasa de dosis con 10^7 historias. En azul hasta $3 \frac{\mu Sv}{h}$, en cyan hasta $200 \frac{\mu Sv}{h}$ y en marrón hasta $500 \frac{\mu Sv}{h}$	54
5.11. Curvas de igual tasa de dosis con 10^8 historias. En azul hasta $3 \frac{\mu Sv}{h}$, en cyan hasta $200 \frac{\mu Sv}{h}$ y en marrón hasta $500 \frac{\mu Sv}{h}$	55
5.12. Curvas de igual tasa de dosis con 10^9 historias. En azul hasta $3 \frac{\mu Sv}{h}$, en cyan hasta $200 \frac{\mu Sv}{h}$ y en marrón hasta $500 \frac{\mu Sv}{h}$	56

Índice de tablas

3.1. Valores de Flujo Escalar y Tasa de Dosis en el detector de la derecha. .	19
4.1. Caracterización de las fuentes de TRACKS utilizadas.	25
4.2. Corrientes integrales para ambas fuentes de tracks.	26
4.3. Corrientes calculadas con fuentes de distribuciones para TRIPOLI y McStas.	32
4.4. Discretizaciones utilizadas para las diferentes variables que determinan la fuente de distribuciones.	33
4.5. Valores de corrientes de neutrones a la salida de GT3, para fuente de tracks y de distribuciones.	33
4.6. Valores de corrientes de fotones a la salida de GT3, para fuente de tracks y de distribuciones.	33

Resumen

El presente trabajo se basa en la implementación de una línea de cálculo de radiaciones en blindajes del Reactor RA-10 utilizando el código de Monte Carlo TRIPOLI.

Se realizó un estudio de factibilidad del uso del código TRIPOLI para la ingeniería de blindajes, estudiando casos *benchmark* así como también las diversas bondades del código. Entre estas, su capacidad de correr en *clusters* de cálculo, la herramienta INIPOND que permite implementar automáticamente un esquema de reducción de varianza y la opción *external source* que permite al usuario programar fuentes de radiación totalmente generales en el lenguaje C. Sobre esta última se centró la mayor parte del trabajo, logrando desarrollar un programa que automatiza la generación de fuentes de neutrones y de fotones a partir de archivos de trazas provenientes de simulaciones previas de Monte Carlo.

Como caso de aplicación de esta línea de cálculo, se estudió a nivel conceptual el blindaje de una de las facilidades experimentales en la cara del reactor. Para ello, se utilizó el código desarrollado para trasladar la fuente hasta la cara del reactor, permitiendo el cálculo de blindaje con buena estadística en posiciones lejanas al núcleo. Se obtuvieron mapas y perfiles de tasa de dosis, así como también una caracterización completa del espacio de fases de las radiaciones provistas por el haz GT-3 del reactor.

Palabras clave: MONTE CARLO, TRIPOLI, BLINDAJES, RA-10

Abstract

The present work is based on the implementation of a shielding radiation calculation line for the RA-10 Reactor using the Monte Carlo code TRIPOLI.

The feasibility of using the code for RA-10 shielding calculations was assessed not only by contrasting TRIPOLI against benchmark cases but also by implementing some of its most useful features. Among them, we tested the INIPOND tool which automatically applies a variance reduction scheme, as well as the *external source* option which allows the user to code general radiation sources. Our study was mainly focused on this latter, developing a C program that generates distributional neutron and photon sources using particle track files resulting from previous Monte Carlo simulations.

As an application case we studied a conceptual-level shielding design surrounding one of the experimental facilities to be mounted at the reactor face. For that purpose, we used the code programmed *ad-hoc* to generate radiation sources at the reactor face window, which permitted to perform the transport calculations with satisfactory statistics. We obtained dose rates and profiles as well as a detailed characterization of the phase-space radiation field arising from the GT-3 thermal beam.

Keywords: MONTE CARLO, TRIPOLI, RADIATION SHIELDING, RA-10

Capítulo 1

Introducción

1.1. Reactor RA-10

El Reactor RA-10 se trata de un reactor multipropósito de diseño 100 % argentino emplazado en las instalaciones del Centro Atómico Ezeiza. Inició en el año 2010 producto de un esfuerzo de la Comisión Nacional de Energía Atómica con el objetivo principal de posicionarse a nivel regional y global como productor de radioisótopos para uso medicinal pero también desarrollar capacidad científica y de investigación en materia de tecnología nuclear.

Se trata de un reactor tipo pileta abierta de 30MW de potencia, emplea combustibles tipo placa, cuenta con caudal ascendente de refrigeración y con un ciclo continuo de operación de 29,5 días. Utiliza agua liviana como refrigerante y moderador y agua pesada como reflector de neutrones. Prevee una producción semanal mayor a 2000Ci de Mo99, uno de los radiofármacos más utilizados.

El Reactor RA-10 cuenta con una variedad de facilidades, entre las que se pueden mencionar:

- Producción de Molibdeno y otros radioisótopos para uso medicinal.
- Dopaje de Silicio para uso industrial.
- Loop de irradiación de combustibles de centrales nucleares de potencia.
- Fuente térmica y fuente fría de neutrones.
- Haces de neutrones.
- Análisis por activación neutrónica.
- Neutrografía.

El objetivo principal del trabajo es el desarrollo de un algoritmo de muestro de fuente de radiación que sirva de entrada al código TRIPOLI y de esta manera determinar las magnitudes físicas antes mencionadas.

La línea de cálculo involucra varios códigos que acoplados permiten cumplir el objetivo propuesto por el trabajo. El proceso involucra desde la descripción de la fuente de radiación, la generación del algoritmo de muestro de la fuente según las distribuciones encontradas y por último el cálculo de las magnitudes de interés. En las secciones subsiguientes se presenta cada uno de ellos.

1.2.1. TRIPOLI

TRIPOLI [1] es un código de transporte de radiación desarrollado por el SERMA (Service d'Études des Réacteurs et de Mathématiques Appliquées) de CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) en Francia desde la mitad del siglo pasado. Es un código destinado al estudio de blindajes de radiación, estudio de la criticidad de sistemas y diseño de instrumentos. Está desarrollado principalmente en C++ y permite la simulación de varios tipos de partículas como ser: neutrones, fotones, electrones y positrones de manera acoplada. TRIPOLI utiliza secciones eficaces en formato ENDF. Su biblioteca de secciones eficaces revisada es CEAV5.1.1 basada en la evaluación europea de JEFF-3.1.1.



Resulta de interés desarrollar herramientas de cálculo utilizando este código ya que la Argentina al formar parte desde el año 2017 de NEA (Nuclear Energy Agency), agencia internacional para el desarrollo y cooperación entre países con alto grado de conocimiento en tecnología nuclear, cuenta con acceso a la licencia de uso del mismo. De esta manera también cuenta con acceso a otros códigos y base datos de experimentos del repositorio de NEA. Por otro lado, TRIPOLI se trata de un código versátil y con muchas capacidades que lo diferencian de otras alternativas, como ser: cálculo acoplado de neutrones y fotones, implementación de esquemas de reducción de varianza de manera automática, acople de algoritmos propios de muestreo de fuentes sin necesidad de recompilar el código fuente y posibilidad de paralelización de la simulación en

clústeres de cálculo.

En este trabajo, se implementaron algoritmos propios de muestreo de fuente de radiación y se calcularon magnitudes físicas de interés.

1.2.2. Mc-Stas

Mc-Stas [2] es un código de simulación de instrumentos neutrónicos que utiliza el método Monte Carlo, desarrollado colaborativamente entre DTU Physics, European Spallation Source, Universidad de Copenhague y los Institutos Paul Scherrer y Laue-Langevin. Se trata de una herramienta de código abierto que permite reproducir diferentes instrumentos que forman parte de todo tipo de experimentos.

El código interpreta un lenguaje de alto nivel donde se eligen y configuran los componentes y parámetros que rigen la simulación y lo compila en un programa en lenguaje C que realiza la simulación Monte Carlo de manera rápida y eficiente.

Presenta gran versatilidad para el desarrollo de nuevos componentes y posibilidad de modificar y adaptar los existentes. Está diseñado principalmente para la simulación de neutrones. Existe además conocimiento de la herramienta dentro del departamento.

En este trabajo, Mc-Stas representa por un lado una herramienta de pre-procesamiento para la generación de las fuentes de radiación para TRIPOLI. Se utilizaron componentes predeterminados del código como también se desarrollaron nuevos cuando fue requerido.



1.2.3. SALOME - McCAD

SALOME es una plataforma de software libre, difundida como herramienta de pre y pos procesamiento en simulaciones numéricas multifísica. A través de un complemento McCAD, desarrollado por el KIT (Karlsruhe Institute of Technology), es posible partir desde un modelo CAD-3D y transformarlo en una representación por superficies utilizada en los códigos de cálculo Monte Carlo, en este caso TRIPOLI. Esto permite la reproducción de manera más rápida de geometrías complicadas de los problemas a resolver.



Capítulo 2

Estudios de factibilidad

En primer lugar se procedió a estudiar el código TRIPOLI, para verificar sus capacidades y fortalezas a la hora de llevar a cabo el presente trabajo.

2.1. TRIPOLI: primeros pasos

Como primera aproximación al código de cálculo TRIPOLI, se introducen problemas sencillos cuya física es conocida con el objeto de entender los resultados que arroja la simulación como también descubrir de qué manera se estructura un archivo de entrada típico para este código.

Un INPUT típico de TRIPOLI [1] se compone de diferentes apartados que explicitan información referente al problema que se busca resolver. A continuación se presenta la estructura de un INPUT de TRIPOLI con sus principales apartados:

```
GEOMETRY
...
END_GEOMETRY

COMPOSITION
...
END_COMPOSITION

GEOCOMP
...
END_GEOCOMP

SOURCES_LIST
...
END_SOURCES_LIST

GRID_LIST
...
END_GRID_LIST

RESPONSES
...
END_RESPONSES

SCORE
...
END_SCORE

VARIANCE_REDUCTION
...
END_VARIANCE_REDUCTION

SIMULATION
...
END_SIMULATION
```

Código 2.1: INPUT típico TRIPOLI

Entre GEOMETRY y END_GEOMETRY se define la geometría del problema, la misma puede construirse a partir de la definición de las superficies que lo componen, utilizando combinaciones de formas conocidas o bien a través de repeticiones de volúmenes definidos de las maneras antes mencionadas. La representación de la geometría se mejora utilizando la herramienta McCAD.

Entre COMPOSITION y END_COMPOSITION se definen los materiales que componen el problema físico, pueden incluirse definiendo su densidad másica como también con la densidad numérica de los isótopos que lo componen.

Entre GEOCOMP y END_GEOCOMP se realiza la asignación de cada material definido anteriormente a su volumen correspondiente. Todos los volúmenes deben tener un material definido.

Entre SOURCES_LIST y END_SOURCES_LIST se definen las fuentes de partículas que forman parte del problema, debe explicitarse la distribución de cada una de las variables que la componen. En este apartado se incluye también la sentencia que incorpora una fuente externa programada ad-hoc.

Entre GRID_LIST y END_GRID_LIST se definen las estructuras de grupos de energía que se utilizarán para las diferentes magnitudes que se buscan calcular.

Entre RESPONSES y END_RESPONSES se definen las magnitudes físicas que se buscan calcular para el problema.

Entre SCORE y END_SCORE se definen la forma en la que se calculan las magnitudes físicas antes mencionadas y en que región del problema son buscadas.

Entre VARIANCE_REDUCTION y END_VARIANCE_REDUCTION se definen los parámetros que permiten especificar alguna técnica particular de reducción de varianza y cómo se implementa en cada problema en particular.

Entre SIMULATION y END_SIMULATION se definen los parámetros que gobiernan la simulación, como por ejemplo el tipo de partículas y la cantidad de historias totales a simular.

2.2. Técnicas de reducción de varianza

La incerteza en el cálculo de las magnitudes físicas en este tipo de simulaciones tienen un comportamiento netamente probabilístico. Por lo general, la incerteza sigue la forma que se muestra en la Ecuación 2.1.

$$I \propto \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2.1)$$

De este modo, disminuir la incerteza se consigue aumentando el número de historias de la simulación o bien estableciendo alguna técnica que disminuya σ . Aumentar N penaliza al tiempo de cálculo, es por esto que se estudia además la implementación de

técnicas de reducción de varianza que bien empleadas pueden reducir la incerteza para el mismo tiempo de simulación. Existen diferentes técnicas para conseguir reducir la varianza en la simulación [3] y el código TRIPOLI implementa algunas de ellas, las cuales se enumeran a continuación.

2.2.1. Volume Splitting

Cada partícula en cuestión al atravesar una superficie dada se transforma en un *set* de nuevas partículas cada una con un peso que es fracción idéntica del peso de la partícula inicial, de este modo, se logra transportar más partículas pero de menor peso.

2.2.2. Optical Biasing

La sección eficaz total de interacción de las partículas con los materiales es alterada por un factor constante, y de esta manera se puede favorecer el transporte de las partículas en los diferentes volúmenes.

2.2.3. Ruleta Rusa

Este caso es opuesto al de volume splitting y determina la probabilidad de una partícula de seguir en la simulación o quedar fuera una vez que alcanzó un peso por debajo de un umbral determinado. Si se determina que debe seguir participando de la simulación, el peso de esta partícula es incrementado en algún valor.

2.2.4. Módulo INIPOND: Transformación Exponencial

En este caso, se utiliza un esquema de importancias calculado a partir del método de *Transformación Exponencial*. A través de esta, se favorece el transporte de partículas en direcciones de interés, definidos por puntos particulares de la geometría del problema. La sección eficaz total de interacción de los materiales es modificada por una función que depende de la posición, la energía, la dirección y el tiempo, la *función importancia*. Cuando se utiliza este método en TRIPOLI, se implementan al mismo tiempo esquemas de splitting y ruleta rusa.

TRIPOLI realiza el cálculo automático de la función importancia, lo que permite una abstracción a un entendimiento de más alto nivel de la técnica pero igualmente funcional.

La importancia se define como la inversa del peso y su expresión se indica en la Ecuación 2.2.

$$\begin{aligned}\Pi(\mathbf{r}, \Omega, E, t) &= \Pi_1(\mathbf{r}) \cdot \Pi_2(\Omega) \cdot \Pi_3(E) \cdot \Pi_4(t) \\ I_1(\mathbf{r}) &= \frac{1}{\Pi_1(\mathbf{r})} = I_g \cdot e^{-\min_{(P_i)} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} k[C(i,j)] \cdot d(i,j)}\end{aligned}\quad (2.2)$$

donde, P_i es una de las posibles trayectorias entre un punto cualquiera \mathbf{r} y el punto donde se encuentra el detector \mathbf{r}_0 , n_i es la cantidad de materiales que son atravesadas por la trayectoria P_i , $C(i, j)$ es el j -ésimo material atravesado por la trayectoria P_i , $d(i, j)$ es la distancia recorrida en la composición $C(i, j)$ por la trayectoria P_i y por último, el valor de I_g se calcula como el límite cercano al detector y su expresión se indica en la Ecuación 2.3.

$$I_g = \frac{1}{\beta + 1} \frac{E_{g+1}^{\beta+1} - E_g^{\beta+1}}{E_{g+1} - E_g} \quad (2.3)$$

donde E_g corresponde al g -ésimo grupo de energía en el que es dividido la función importancia y β es una constante que indica el grado de atracción que impone el detector en el punto \mathbf{r}_0 .

2.3. Fuente externa

El código TRIPOLI admite la posibilidad de utilizar algoritmos de muestro de fuentes personalizadas por el usuario. El algoritmo se enlaza dinámicamente con el código al inicio de la ejecución una vez compilado. Puede programarse en el lenguaje *C* o *Fortran*.

A continuación se muestra el prototipo de la función que debe respetarse para la confección del algoritmo de muestreo. Como argumentos de la función se tiene el tipo de partícula *ipt* y correspondientemente la posición (x, y, z) , los cosenos directores (u, v, w) , la energía E , el peso estadístico p y por último un arreglo con parámetros que pueden servir dentro del algoritmo. La función debe calcular y modificar estas variables que dan identidad a las partículas.

```
void source(int *ipt, double *x, double *y, double *z,
double *u, double *v, double *w, double *e, double *we,
double *param){}
```

Código 2.2: Prototipo para definir una función como fuente de muestreo.

La llamada a la fuente externa se explicita dentro de el apartado SOURCES_LIST. Resulta de vital importancia comprender y testear su funcionamiento, ya que facilitará la implementación de la fuente de distribuciones. Por otro lado, la vinculación en tiempo de ejecución se hace a través del mecanismo de *dynamic loading* que permite al código

TRIPOLI cargar librerías o ejecutables en memoria en ese momento.

2.4. Paralelización

El código TRIPOLI admite correr las simulaciones en múltiples procesadores iguales e inclusive en clústeres de cálculo heterogéneos. El código gestiona automáticamente la simulación, usando un procesador como monitor y colector de los datos de los demás procesadores, mientras que los otros se encargan del trabajo de la simulación en sí misma. Utiliza como protocolo de comunicación entre máquinas el *BSD* (Bit Serial Data).

Capítulo 3

Primeros resultados

3.1. Problema inicial en TRIPOLI

Se plantea el problema de una caja de agua de $20\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ con una fuente de neutrones puntual, monoenergética de 1 MeV, isotrópica, de intensidad unitaria y estacionaria ubicada en el centro de la misma. Equidistantes a la fuente a 5cm en la dirección x , se ubican dos detectores volumétricos de $0,5\text{cm} \times 0,5\text{cm} \times 0,5\text{cm}$ donde se calculan las magnitudes físicas de interés. Se selecciona este problema sencillo, con el objeto de entender y testear las funcionalidades mencionadas en el Capítulo 2 del código TRIPOLI. Se analizaron diferentes cantidades físicas, como ser flujos, corrientes y dosis equivalente ambiental. También se consiguió correr la simulación en paralelo caracterizando la performance del código para diferentes cantidades de partículas y procesadores. Asimismo se logró implementar un esquema de reducción de varianza para disminuir las incertezas del cálculo.

Cabe destacar que los resultados enunciados son dependientes del problema, sin embargo, las tendencias generales se conservan y ponen en evidencia las capacidades del código.

3.1.1. Reducción de Varianza

Se implementó un esquema de reducción de varianza haciendo uso de la funcionalidad destacada del código. A continuación se muestra el apartado donde se indica exactamente cómo se lleva a cabo la implementación de la reducción en el INPUT. Todas las simulaciones fueron realizadas en paralelo corriendo en 32 procesadores simultáneamente. Como magnitud física de estudio se utilizó el flujo escalar.

```
VARIANCE_REDUCTION
  NEUTRON
  GRID 4
    20.0 1.0 1E-6 1E-11
  DETECTOR 1
    5 0 0
    0.9
  MESH
    60 30 30
    0.34 0.34 0.34
    3
  FRAME CARTESIAN
    -10.1 -5.1 -5.1
    1 0 0
    0 1 0
    0 0 1
  END_MESH
  INIPOND
    AUTO
  END_INIPOND
  STORE_IN_FILE ASCII
END_VARIANCE_REDUCTION
```

Se ubica un detector puntual en el detector volumétrico del problema de las coordenadas positivas. El módulo INIPOND calcula de manera automática el mapa de importancias que se utiliza durante la simulación para los 3 grupos de energía de este caso particular. Los mapas de importancia se muestran en la Figura 3.1.

Por otra parte, el código permite visualizar las posiciones donde las partículas tienen interacciones con los materiales, lo que facilita la interpretación gráfica de la implementación de esta herramienta. Una comparación entre los casos con y sin reducción de varianza de muestran en la Figura 3.2. En el caso de no utilizar reducción de varianza, la distribución espacial de eventos es bastante uniforme en concordancia con la naturaleza de la fuente y el medio utilizado, mientras que en el caso de utilizar reducción de varianza, se observa una distribución espacial de interacciones desplazada hacia la derecha que es la posición del detector puntual evidenciando el efecto buscado.

Se realiza un análisis referido a la performance del código utilizando esta técnica. En primer lugar se observa en la Figura 3.3 la dependencia entre el número de historias simuladas y la magnitud de la incerteza de la magnitud física. Para la misma cantidad de historias simuladas, la simulación con reducción de varianza arroja una incerteza del orden del 35 % menor.

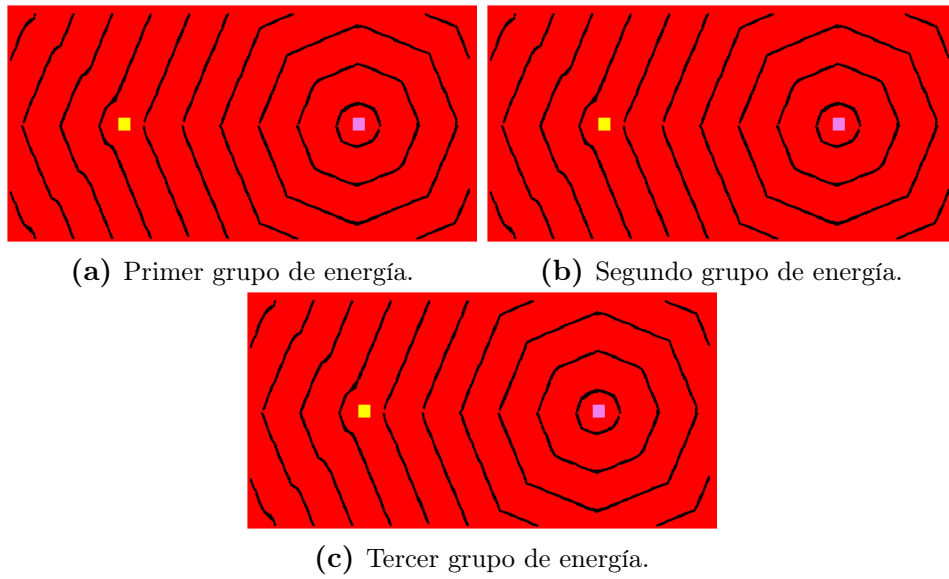


Figura 3.1: Esquemas de iso-importancia para los diferentes grupos de energía.

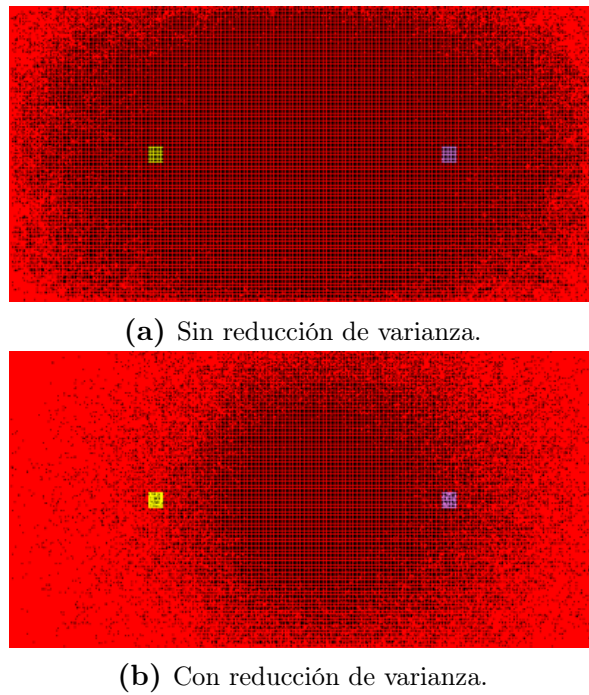


Figura 3.2: Mapa de colisiones.

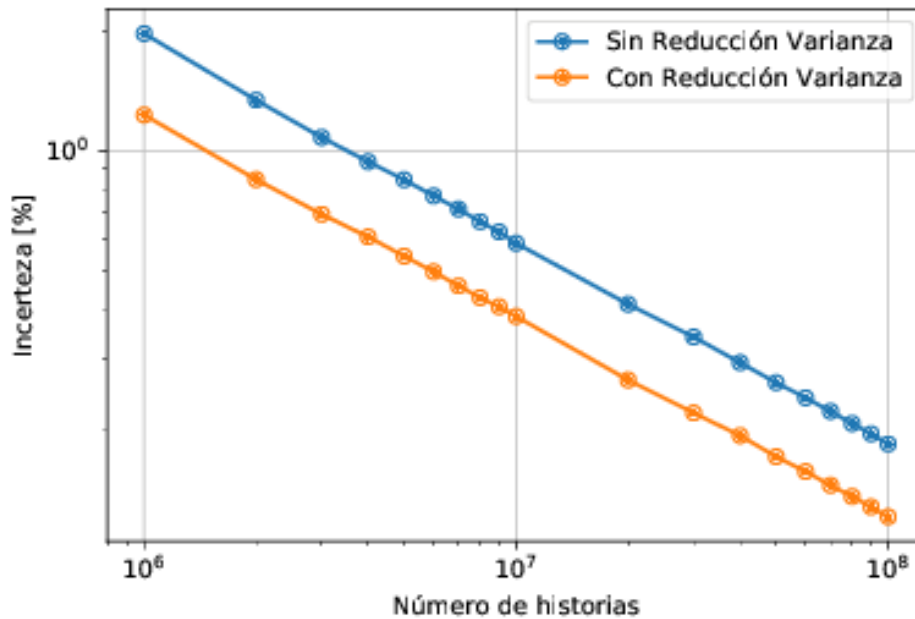


Figura 3.3: Incerteza del cálculo en función del número de historias simuladas, ambos en escala logarítmica.

Por otra parte, como se observa en la Figura 3.4 la dependencia entre el tiempo de simulación y la cantidad de historias simuladas, el caso donde se implementa un esquema de reducción de varianza indica un mayor tiempo de cálculo para el mismo número de historias simuladas frente al caso sin reducción de varianza. El aumento en el tiempo de cálculo es del orden del 77 %.

Sin embargo, la ventaja al emplear un esquema de reducción de varianza radica en la relación entre la incerteza del cálculo y el tiempo de simulación. Esto supone una optimización temporal, ya que como puede observarse en la Figura 3.5, utilizando un esquema de reducción de varianza puede alcanzarse el mismo nivel de incerteza con una reducción de hasta un 10 % del tiempo de cálculo.

El módulo INIPOND muestra resultados favorables, resaltando su capacidad y funcionalidad sin mayores esfuerzos en su implementación. De todos modos, puede personalizarse parámetros del módulo en caso de que el problema así lo requiera.

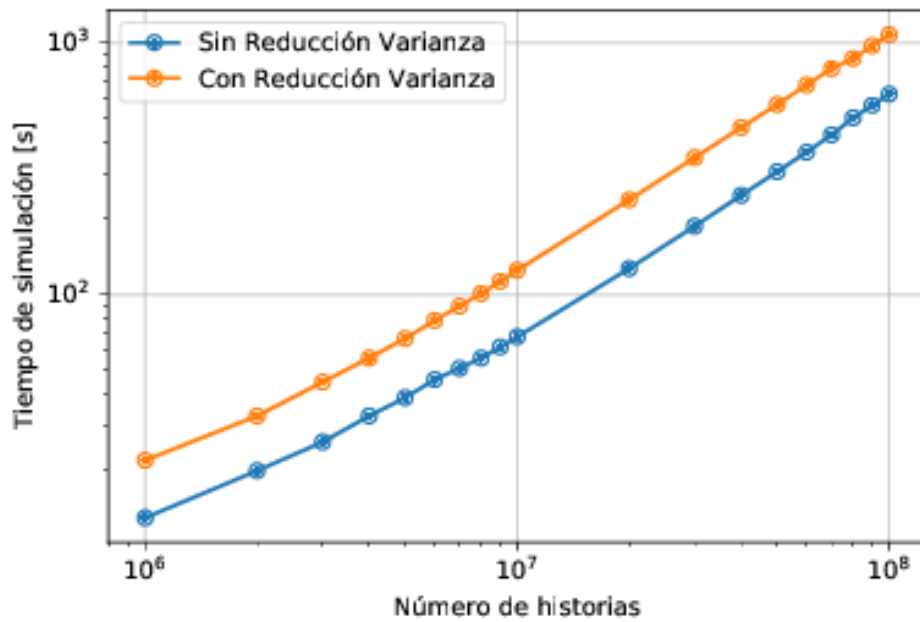


Figura 3.4: Tiempo de cálculo en función del número de historias simuladas, ambos en escala logarítmica.

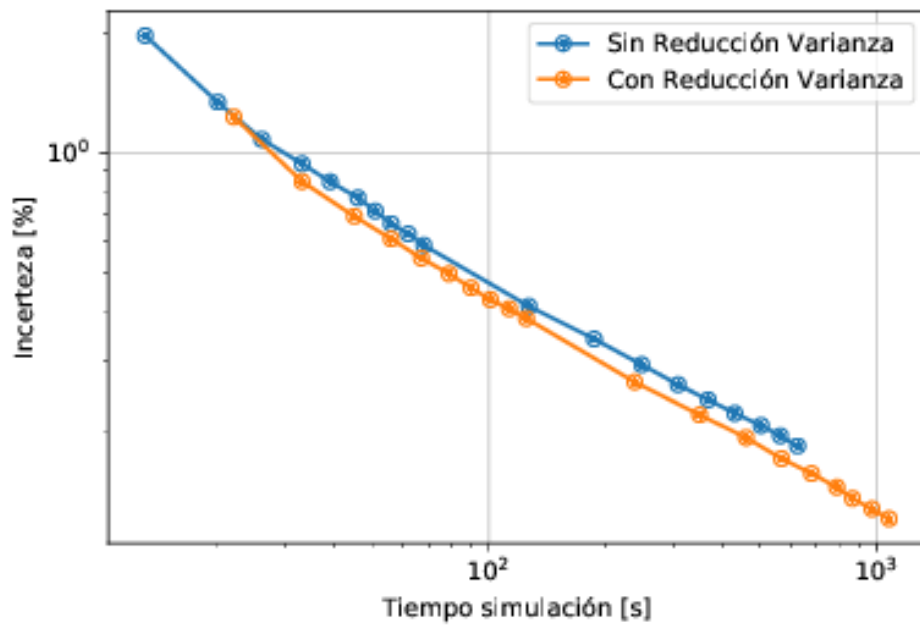


Figura 3.5: Incerteza del cálculo en función del tiempo total de cálculo, ambos en escala logarítmica.

3.1.2. Paralelización

Se exploraron las capacidades del código referentes a la paralelización de la simulación. A medida que aumenta la cantidad de procesadores utilizados el tiempo de simulación decrece, como era de esperarse. Sin embargo, como se observa en la Figura 3.6, a partir de 40 procesadores la mejora en el tiempo de cálculo no resulta significativa. Además, se observa el mismo comportamiento se utilice o no un esquema de reducción de varianza.

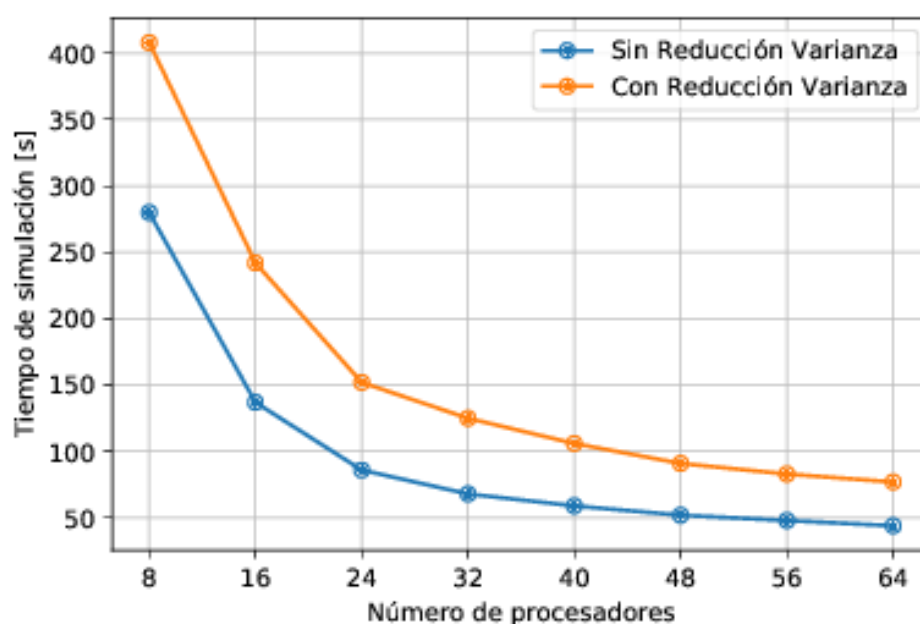


Figura 3.6: Relación entre tiempo de simulación y cantidad de procesadores utilizados para los casos con y sin reducción de varianza.

3.1.3. Tallies

Se calcularon diferentes magnitudes físicas de interés como ser flujo escalar, y tasa de dosis equivalentes ambiental en el detector volumétrico de la derecha. Se observan los resultados obtenidos en la Tabla 3.1 para un total de 10^7 historias simuladas utilizando 32 procesadores en paralelo, para los casos con y sin reducción de varianza. En ambos casos, los casos con reducción de varianza arrojan resultados coherentes con lo expuesto en secciones anteriores.

	Flujo		Tasa de dosis	
	Valor [$\frac{n}{cm^2 s}$]	Incerteza [%]	Valor [$\frac{\mu Sv}{h}$]	Incerteza [%]
Sin Reducción de Varianza	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$5,85 \cdot 10^{-1}$	$3,02 \cdot 10^{-3}$	1.13
Con Reducción de Varianza	$1,32 \cdot 10^{-3}$	$3,83 \cdot 10^{-1}$	$3,01 \cdot 10^{-3}$	$6,68 \cdot 10^{-1}$

Tabla 3.1: Valores de Flujo Escalar y Tasa de Dosis en el detector de la derecha.

3.2. Karlsruhe Iron Sphere Benchmark Experiment

Una vez exploradas las funcionalidades del código, se accedió a la base de datos SINBAD (Shielding Integral Benchmark Archive and Database) gracias al convenio de cooperación antes mencionado con NEA, con el objeto de probar el código frente a un problema conocido y bien determinado de blindajes. En este caso, se realizó el benchmark del *Karlsruhe Iron Sphere Benchmark Experiment* [4].

3.2.1. Descripción del experimento

Se pretende determinar el espectro de fuga de neutrones de un conjunto de esferas de hierro de diámetros de 15, 20, 25, 30, 35 y 40 cm con una fuente de Cf-252 de neutrones en el centro.

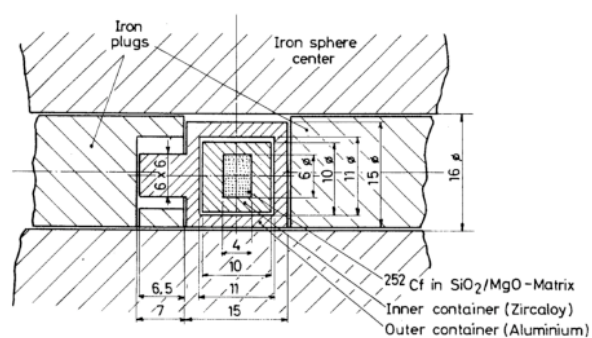
La fuente de neutrones consiste en unos $30\mu g$ de Cf-252 correspondientes a una intensidad de $7 \cdot 10^7 \frac{n}{s}$. La fuente está contenida en una cápsula cilíndrica de doble pared y ubicada en el centro de la esfera de hierro a través de un canal pasante, el cual luego se rellena con un tapón del mismo material. Las esferas se colocan en una habitación suspendidas 2m del suelo y a más de 3m de cualquier pared para reducir la contribución por scattering de neutrones en otras superficies. El espectro de fuga de neutrones fue medido utilizando detectores cilíndricos de neutrones por retroceso de protones.

En la Figura 3.7a se observa un esquema de la esfera con la fuente en su interior y en la Figura 3.7b se observa un esquema de la configuración experimental general. La fuente de neutrones se encuentra inmersa en una matriz de SiO_2/MgO , esta a su vez se encuentra dentro de dos contenedores cilíndricos de *Zircaloy* y de $AlMg_3$ respectivamente. Por otra parte, son 3 los detectores utilizados para medir el espectro de fuga de los neutrones calibrados cada uno para un rango de energía diferente.

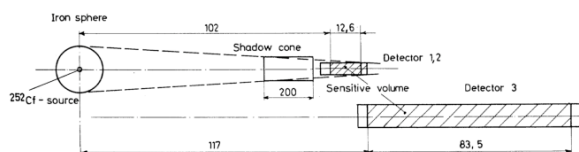
En el desarrollo del experimento se midieron los espectros para 6 diámetros de esferas diferentes.

3.2.2. Fuente de neutrones

Para la simulación de la fuente de neutrones se ajustó un espectro de Maxwell con $kT = 2,1 MeV$ correspondiente a una fuente típica de Cf-252. La misma se encuentra



(a) Detalle de la fuente, medidas expresadas en mm.



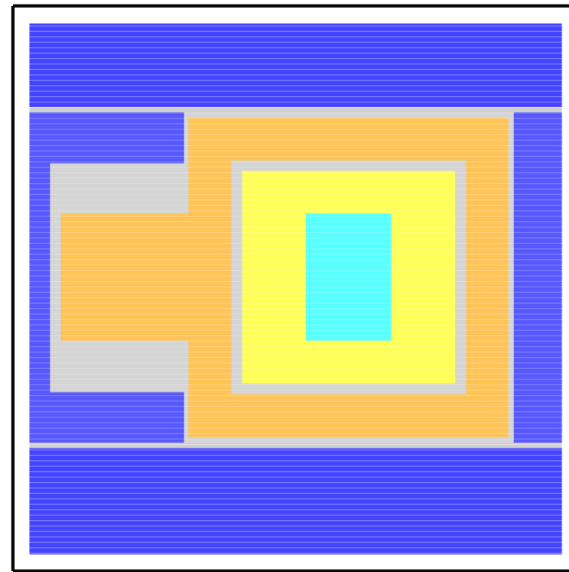
(b) Layout general, medidas expresadas en cm.

Figura 3.7: Descripción del arreglo experimental.

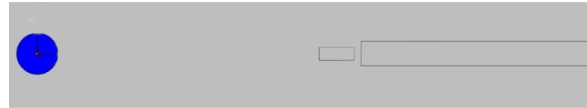
distribuida uniformemente en el volumen del cilindro contenedor y con una distribución angular isotrópica.

3.2.3. Modelo de TRIPOLI

En TRIPOLI, se modelaron la geometría y los materiales correspondientes a las esferas de 15 y 20 cm. Se observa en la Figura 3.8 el modelo implementado. Se modelaron también los detectores de diferentes tamaños y se establecieron tallies volumétricos de flujo en los respectivos detectores.



(a) Detalle de la fuente.

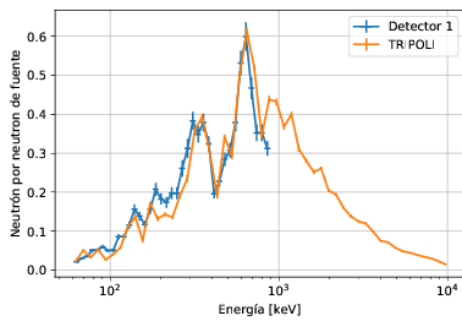
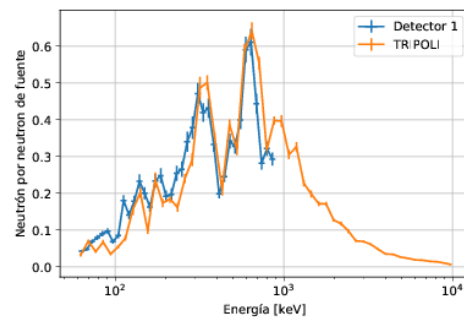


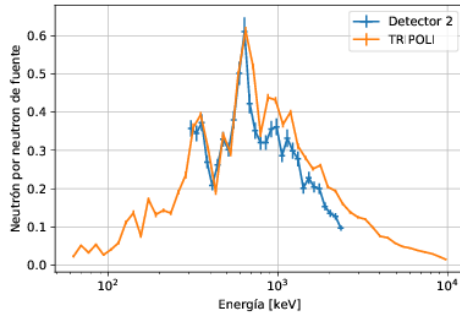
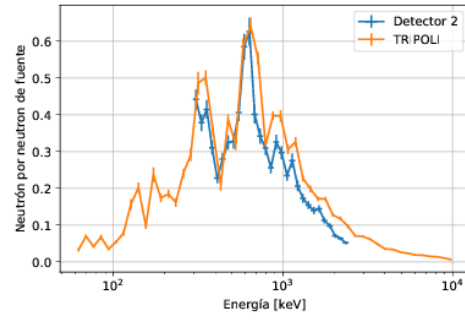
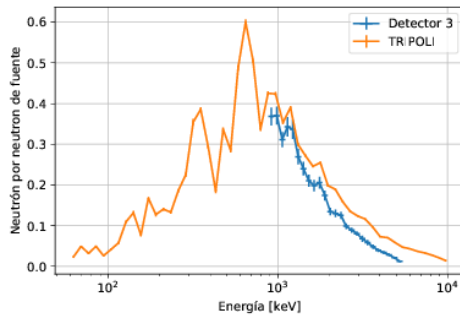
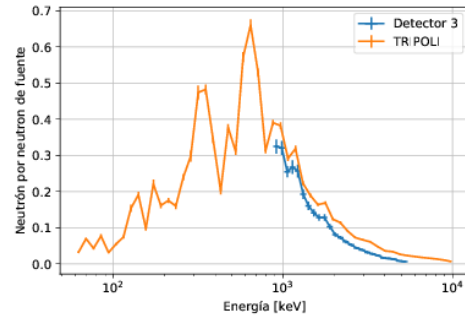
(b) Layout general.

Figura 3.8: Modelo de cálculo en TRIPOLI.

3.2.4. Resultados obtenidos

Se establecieron tallies de flujo en los detectores utilizados y se compararon los espectros de fuga normalizados por neutrón de fuente. En las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11 se ilustran los resultados obtenidos para las esferas de 15 y 20 cm de radio, para cada detector que comprende un rango de energía distintos.

(a) Esfera $r=15\text{cm}$.(b) Esfera $r=20\text{cm}$.**Figura 3.9:** Espectros de fuga normalizados. Detector 1. [0.06-0.8]MeV

(a) Esfera $r=15\text{cm}$.(b) Esfera $r=20\text{cm}$.**Figura 3.10:** Espectros de fuga normalizados. Detector 2. $[0.3-2.4]\text{MeV}$ (a) Esfera $r=15\text{cm}$.(b) Esfera $r=20\text{cm}$.**Figura 3.11:** Espectros de fuga normalizados. Detector 3. $[0.8-5.4]\text{MeV}$

Se consigue un buen ajuste del espectro entre la simulación numérica y los resultados experimentales, con una discrepancia máxima de a lo sumo 20% para altas energías, aproximadamente desde 1 MeV , esta incerteza resulta del orden usual para una simulación de este tipo. Sin embargo, se atribuye esta mayor discrepancia al espectro elegido para la fuente en la simulación que se apartaba del espectro original para altas energías ya que en la documentación del benchmark se encontraba incompleto.

Capítulo 4

Programación de fuentes de distribuciones para su uso en TRIPOLI

En este capítulo se presenta el análisis realizado para la confección de la fuente de distribuciones propiamente dicha y su implementación en TRIPOLI, partiendo de los archivos iniciales y atravesando cada una de las interfaces de la línea de cálculo desarrollada.

4.1. Fuente de TRACKS y Distribuciones

Partiendo de una simulación Monte Carlo es posible almacenar el valor de las variables que caracterizan una partícula al atravesar cierta superficie. De esta manera, se puede conseguir una larga lista con la información de los neutrones y fotones que atravesaron una superficie, esto se conoce como **Fuente de TRACKS**, la información almacenada corresponde a la posición, dirección, energía y peso estadístico de la partícula en cuestión. En la mayoría de los códigos este archivo puede luego ser utilizado para iniciar una nueva simulación partiendo de esa superficie como fuente. En este caso, se lo transforma al formato PTRAC para ser utilizado en Mc-Stas. En este trabajo, las fuentes de tracks tanto de neutrones como de fotones provienen de una simulación de MCNP de la etapa de Ingeniería de Detalle del núcleo y facilidades del Proyecto RA-10.

Iniciar la simulación desde la superficie grabada limita la cantidad de partículas de la simulación al máximo almacenado en ese archivo. De este modo, la incerteza en la determinación de alguna magnitud queda ligada a la cantidad de historias simuladas en la primera simulación. Esto se debe a la imposibilidad de simular una cantidad de partículas mayor a las almacenadas en la fuente de TRACKS.

Es por esto que se desarrolla el concepto de **Fuente de Distribuciones** [5] donde se busca conseguir un algoritmo propio de muestro de fuente partiendo del conocimiento de las distribuciones espaciales, angulares y energéticas de las partículas. Las distribuciones de las diferentes variables se obtienen en este caso, a partir de una fuente de TRACKS. Se deben estudiar entonces las correlaciones entre las variables que identifican a las partículas intervinientes y proponer modelos que ajusten las distribuciones de las variables. En este trabajo se utilizan discretizaciones en variables de posición (x, y) , energía (E) y angulares, (μ, φ) . La implementación de una fuente de distribuciones permite de este modo mejorar las incertezas de los cálculos ya que tiene lugar una simulación Monte Carlo independiente donde pueden correrse la cantidad de historias que se necesiten, sin limitación, a fin de alcanzarse el nivel de incerteza pretendido.

En consecuencia, se utilizan dos tipos de discretizaciones para cada variable: una gruesa o de correlación llamada *macro* y una fina llamada *micro*. Cada una de las variables: posición, angulares y la energía se divide en una discretización fina, sin embargo, debido a que las posibles correlaciones entre las variables, esta discretización micro se encuadra dentro de una discretización macro de las demás variables. Para cada variable se utiliza el esquema de discretizaciones siguiente:

- φ : Incluye una discretización de macro E , una discretización macro (x, y) y una distribución macro de θ .
- μ : Incluye una discretización de macro E y una discretización de macro (x, y) .
- (x, y) : Incluye una discretización de macro E .
- E : Incluye una discretización de macro θ .

De esta manera, cada neutrón o fotón incidente a una superficie donde desea calcularse una fuente de distribuciones se clasifica según esas discretizaciones, como se explicará en secciones posteriores. Resta extraer las distribuciones de cada variable a partir de la información obtenida después de la discretización y de esa manera mostrar partículas con esa distribución.

Determinar las distribuciones puede realizarse, por ejemplo, construyendo un histograma de intensidad de los pesos de todas las partículas que caen dentro de esa discretización particular. Cabe destacar que la cantidad de cortes macro y micro para cada variable debe elegirse cuidadosamente de forma tal de que exista una cantidad suficiente de partículas que califiquen dentro de discretización, conseguir esto representa poder aproximar correctamente la distribución continua que tiene cada una de las variables a una distribución discreta. Luego, esta distribución es normalizada de manera tal que se pueda entender como una *función de probabilidad*, como se indica en la Ecuación (4.1).

$$\begin{cases} P(x_i) = p_i \geq 0 & \forall i \\ \sum_{i=1}^N P(x_i) = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Se construye entonces la *función acumulada de probabilidad*, que se define según la Ecuación (4.2).

$$F(x) = \sum_{x_i \leq x} P(x_i) \quad (4.2)$$

A partir de aquí, se puede muestrear valores de variables que sigan esa distribución utilizando el *Método Inverso* [3], donde sorteando un número aleatorio $\gamma \in [0, 1]$ a través de la función acumulada de probabilidad se determina a que bin del histograma de la variable se asocia ese valor de γ y luego de sortea uniformemente un valor de la variable entre los extremos del bin. Esto se repite para cada variable que establece la identidad de la partícula. En este caso, que se tienen simulaciones acopladas de neutrones y fotones, o se debe elegir para cada historia qué tipo de partícula se va a muestrear siempre manteniéndose la proporción original en la fuente entre partículas.

Como figura de mérito utilizada para estimar la capacidad de la fuente de distribuciones de reproducir las magnitudes integrales obtenidas por la fuente de TRACKS, se define el factor de mérito F , como el cociente de dos corrientes integrales calculadas en el mismo lugar para la fuente de distribuciones y de TRACKS respectivamente, como por ejemplo corrientes de neutrones o fotones. Esto se indica en la Ecuación (4.3).

$$F = \frac{J_{Dist}^+}{J_{Tracks}^+} \quad (4.3)$$

4.2. Análisis fuente de TRACKS

Partiendo de una simulación de MCNP se obtuvo la fuente de TRACKS para el conducto GT3, como se indica en la Figura 4.1, en rojo. La superficie se trata de un círculo de 25,4cm de radio. Estrictamente se tienen dos fuentes diferentes de TRACKS una para neutrones y otra para fotones. En la Tabla 4.1 se encuentran las especificaciones de las fuentes de TRACKS utilizadas, donde NPS son la cantidad de historias simuladas en MCNP y N son las cantidad de partículas grabadas en la fuente de TRACKS.

Tipo	Tamaño [GB]	N	NPS
Neutrones	73,9	354624042	41988876920
Fotones	14,9	69991695	

Tabla 4.1: Caracterización de las fuentes de TRACKS utilizadas.

Se analizó cada una de las fuentes por separado basado en dos criterios: determinar la discretización de cada una de las variables de manera tal de obtener una distribución

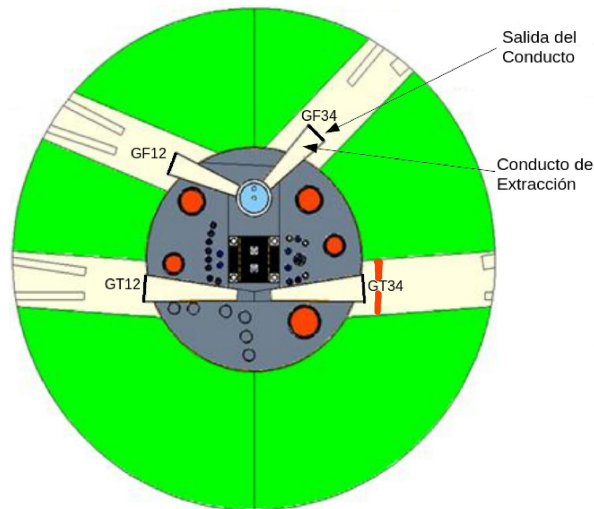


Figura 4.1: Modelo del núcleo y piletas del RA-10 para MCNP.

suave como así también obtener un valor del factor de mérito F mayor a 0,95 a la salida de GT3. Es por esto, que una correcta elección de la discretización para las variables de la fuente de TRACKS reviste de vital importancia para la generación de las fuentes de distribuciones.

Utilizando Mc-Stas se modeló la geometría simplificada del problema partiendo desde la posición donde fue grabada la fuente de TRACKS hasta la salida del haz GT3. De esta manera, se pueden transportar los neutrones, utilizando la componente *Ptrac_source_difra* programada en el departamento, desde la fuente hasta la salida del haz. En la Tabla 4.2, se muestra el valor de la corriente total de la fuente de tracks de neutrones y fotones, calculada con la componente *PSD_Monitor*.

	Neutrones $\left[\frac{n}{cm^2 s}\right]$	Fotones $\left[\frac{f}{cm^2 s}\right]$
Corriente	$6,07 \cdot 10^{12}$	$2,98 \cdot 10^{12}$

Tabla 4.2: Corrientes integrales para ambas fuentes de tracks.

En la Figura 4.3 se observa la distribución espacial de la corriente en la superficie de las fuentes de TRACKS, tanto para neutrones como para fotones, calculada con la componente *PSD_Monitor*. Se observa que para el caso de los neutrones, la distribución espacial es mas bien uniforme y centrada, con una mayor intensidad hacia el centro de la superficie, mientras que en el caso de los fotones, se tiene un corrimiento hacia la izquierda. Esto se explica a través del trazado de ángulos que se observa en la Figura 4.2, donde debido al decaimiento exponencial de la intensidad de los fotones a medida que se aleja del núcleo, en la superficie se observarán fotones de vuelo que se encuentran más cercanos al núcleo, rayo rojo indica el camino directo de fotones del núcleo con alta intensidad a través de la guía, de este modo la intensidad será mayor hacia la izquierda. En el caso de los neutrones, no se observa el mismo efecto debido a que la intensidad del flujo no decae tan rápidamente al alejarse del núcleo.

En la Figura 4.4 se muestra el espectro de energía de la fuente en la superficie de la fuente de TRACKS tanto para neutrones como para fotones, calculada con la componente $E_monitor$. Para el caso de los neutrones se trata de un espectro mayormente térmico mientras que para el caso de los fotones el espectro es mas bien rápido que comprende energía entre 1 keV y 10 MeV.

En la Figura 4.5 se presenta la distribución de la variable angular θ de la fuente de TRACKS tanto para neutrones como para fotones, se la obtiene mediante la componente $Mu_monitor$, que clasifica a cada partícula que atraviesa la superficie según su valor de θ dentro de bins de igual ancho en el intervalo $[0 - \frac{\pi}{2}]$, componente que fue construida y agregada a la biblioteca del programa. La distribución en esta variable es similar para los dos tipos de partículas.

En la Figura 4.6 se indica la distribución en la variable angular φ de la fuente de TRACKS tanto para neutrones como para fotones, se la obtiene mediante la componente $Phi_monitor$, que clasifica a cada partícula que atraviesa la superficie según su valor de φ dentro de bins de igual ancho en el intervalo $[0 - 2\pi]$, componente que fue construida y agregada a la biblioteca del programa. Para el caso de los neutrones se observan dos direcciones preponderantes que corresponden aproximadamente a $\varphi = 100^\circ$ y $\varphi = 270^\circ$ mientras que para el caso de los fotones se tiene solo una dirección preponderante correspondiente a $\varphi = 180^\circ$. Para el caso de los fotones esto se apoya en también en la Figura 4.2 donde necesariamente los fotones dado que alcanzan mayormente el sector izquierdo central de la superficie, su dirección azimutal se ve influenciada en ese modo, en consecuencia se tendrá mayor intensidad en el entorno de $\varphi = 180^\circ$. Por otra parte, a diferencia de los fotones, para los neutrones en este caso la mayor intensidad se alcanza hacia el centro de la superficie y de manera bastante uniforme, por lo que los neutrones deben orientarse para conseguir alcanzar la zona central, de este modo se encuentran dos direcciones preponderantes que tendería a ubicarse en $\varphi = 90^\circ$ y $\varphi = 270^\circ$.

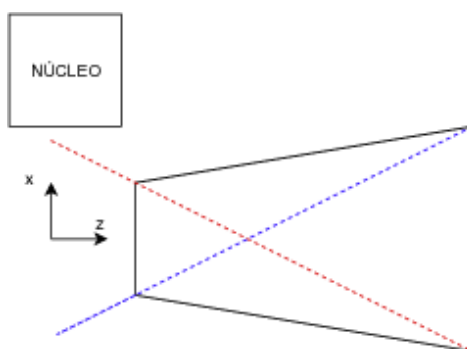
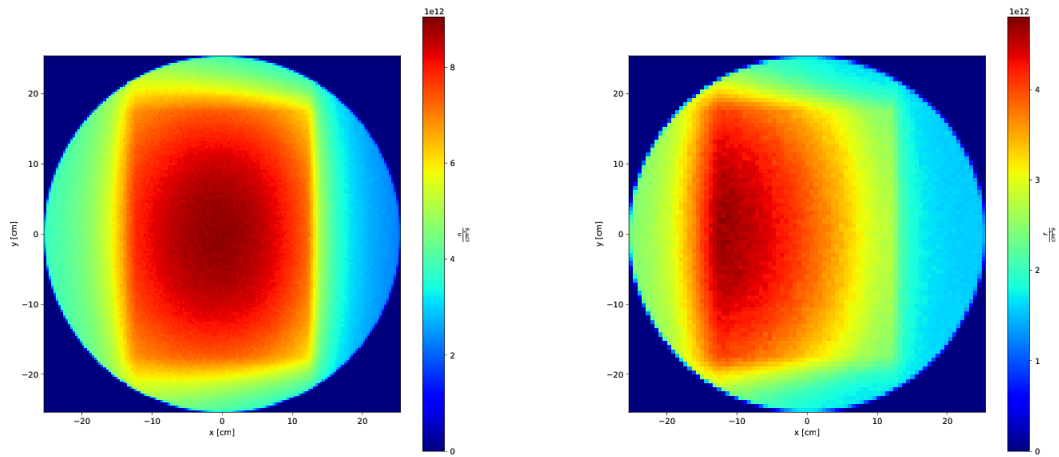
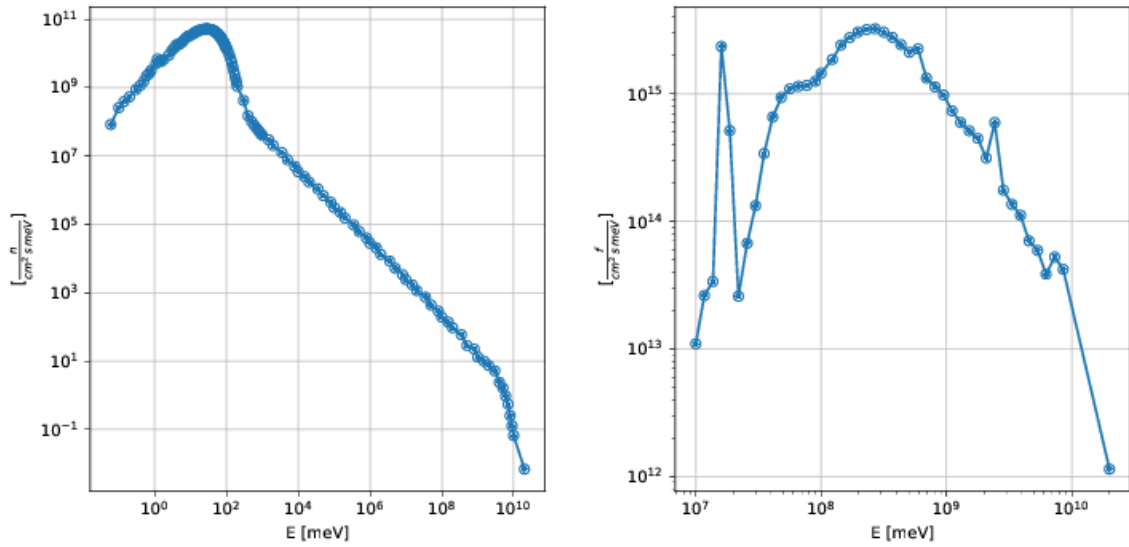


Figura 4.2: Trazado de rayos plano zx.



(a) Corriente de neutrones.

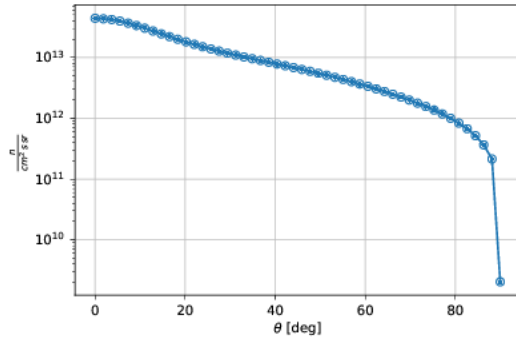
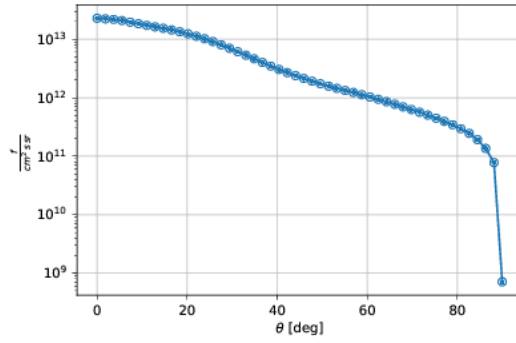
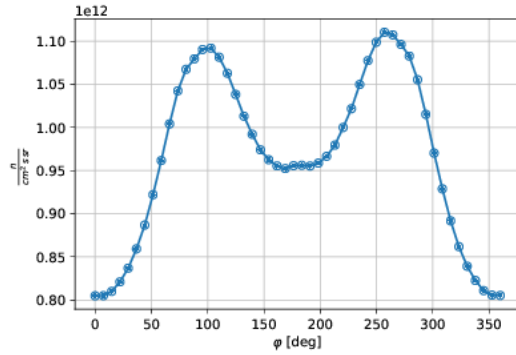
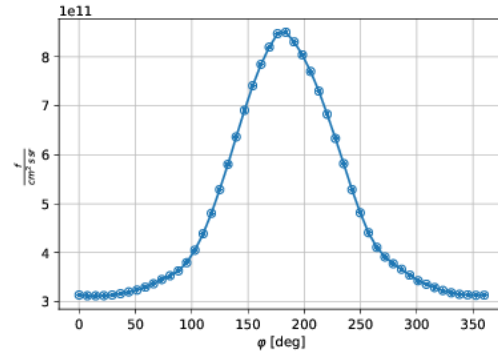
(b) Corriente de fotones.

Figura 4.3: Distribución espacial de la corriente para neutrones y fotones.

(a) Espectro de neutrones.

(b) Espectro de fotones.

Figura 4.4: Espectro para neutrones y fotones.

(a) Distribución en θ para neutrones.(b) Distribución en θ para fotones.**Figura 4.5:** Distribución en θ integral de las fuentes de neutrones y fotones.(a) Distribución en φ para neutrones.(b) Distribución en φ para fotones.**Figura 4.6:** Distribución en φ integral de las fuentes de neutrones y fotones.

4.3. Fuente de Distribuciones

Se implementó una fuente de distribuciones mixta de neutrones y fotones para TRI-POLI, pudiendo utilizarse para la determinación de magnitudes dosimétricas de interés. Como punto de partida, dentro del Departamento producto de trabajos anteriores, se logró desarrollar Fuentes de Distribuciones en McStas para neutrones partiendo también de una Fuente de TRACKS de MCNP pero en ese caso con una menor cantidad de partículas y grabada en una superficie diferente. Cabe aclarar que la experiencia previa en el uso de McStas está enfocado en el desarrollo de nuevos instrumentos ópticos y no al diseño u optimización de blindajes, ya que el código no simula interacción de los neutrones con materiales.

Se utiliza McStas principalmente por la versatilidad que brinda para la generación de componentes específicos y a medida. Pueden desarrollarse detectores especiales y algoritmos de muestreo que tengan en cuenta la distribución de los neutrones en su variable azimutal a diferencia de MCNP que la supone uniforme. En este trabajo se

extendió la funcionalidad de la herramienta antes desarrollada para poder incluir el transporte de fotones. Se utilizó la componente *EPA_DETECTOR* que recibe como argumentos las dimensiones de la superficie donde quiere determinarse la fuente de distribuciones (ancho y alto), la cantidad de cortes en la variable φ (pg), los archivos *Emacro.txt*, *Emicro.txt*, *Umacro.txt*, *Emicro.txt* y *XY.txt*, donde pg divide a la variable φ en intervalos iguales, y los otros archivos describen los cortes en cada una de las variables tanto para discretizaciones macro como micro de energía, θ y posición, y devuelve un set de 4 archivos que reflejan los histogramas para cada variable micro discretizada: φ , θ , (x, y) y E .

Esta componente entonces ubica a cada partícula que la atraviesa dentro de una discretización fina de cada una de las variables, teniendo en cuenta su correlación con las demás variables. Por ejemplo, para una partícula que atraviesa este componente o es seleccionada por su energía (E) dentro de una discretización gruesa, luego según la posición en la superficie (x, y) en una discretización gruesa, también según su colatitud (θ) en una discretización gruesa y por último según su valor de coordenada azimutal (φ) en una discretización fina, de este modo puede lograrse una descripción de la variable φ guardando una correlación las demás variables. Del mismo modo, con la misma discretización gruesa en energía y posición, se describe la variable θ dentro de una discretización fina. También, con la misma discretización gruesa en energía se obtiene una descripción de las variables espaciales (x, y) dentro de una discretización fina y por último, Dada la discretización gruesa en energía y en θ se describe la la variable energética dentro de una discretización fina. Nótese la gran cantidad de discretizaciones involucradas debido al número de variables que son necesarias para describir la identidad de una partícula, esto supone una limitación en la cantidad de partículas mínimas necesarias para describir adecuadamente la distribución que sigue cada variable. La descripción en cada variable dentro de una discretización fina se obtienen en archivos separados *EPA1i.txt* $i \in 1, 2, 3, 4$. En la Figura 4.7 se muestra esquemáticamente lo expresado anteriormente.

La implementación en TRIPOLI precisa un preprocesamiento de estos archivos, con este objetivo, se desarrolló un código en lenguaje Python que toma como input los archivos resultantes del componente *EPA_Detector* y los mismos archivos de discretizaciones micro y macro de variables antes mencionados, donde computa los histogramas para cada variable, construye las funciones de probabilidad y subsecuentes funciones de probabilidad acumulada donde finalmente tras una normalización se obtiene la descripción de cada variable y son escritos como archivos de salida un archivo por cada variable con las funciones acumuladas de probabilidad. A partir de aquí, se programó un algoritmo de muestreo en lenguaje C, *source_n_p.c*, siguiendo el prototipo de función para una fuente externa de TRIPOLI. La fuente externa realiza el muestreo de la fuente tanto de fotones y de neutrones según la relación neutrón-fotón de las fuentes de

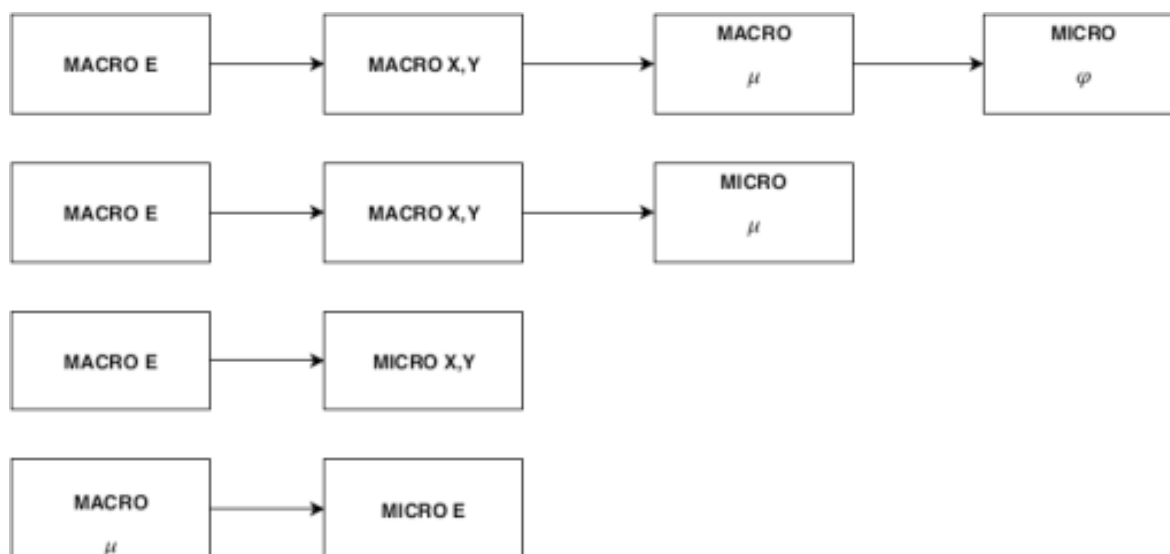


Figura 4.7: Esquema de discretizaciones utilizadas para las variables.

tracks y las distribuciones normalizadas de cada variable utilizando el método inverso.

Descripción detallada del algoritmo de muestreo

En lugar se inicializa un contador que almacena la cantidad total de veces que es demandada una partícula de fuente. Luego se cargan en memoria, por única vez, la información referente a las discretizaciones de cada una de las variables y las funciones acumuladas de probabilidad tanto para fotones como para los neutrones. Se genera un número aleatorio uniformemente distribuido entre 0 y 1 que se compara con la razón entre intensidad de neutrones y la intensidad de fotones de la fuente de TRACKS para determinar en la instancia qué tipo de partícula se va a simular.

Luego generando otro número aleatorio, se determina a qué macro grupo de energía pertenecerá el neutrón o fotón de fuente. Una vez conocido el macro grupo de energía, utilizando dos números aleatorios se determina a qué micro grupo de x y a qué micro grupo de y pertenecerá la partícula, determinado los micro grupos se puede determinar a qué macro grupo de x e y pertenece respectivamente.

Con la ayuda de otro número aleatorio se calcula a qué micro μ pertenecerá el neutrón o fotón de la fuente. Una vez conocido el micro grupo μ se determina a qué macro μ pertenece.

Por último dada la información de macro μ anterior, con un último número aleatorio es posible determinar qué micro E tendrá la partícula siempre que se mantenga la correlación con el macro grupo de energía determinado inicialmente.

Finalmente, el contador inicial se incrementa en una unidad luego de sortear todas las variables y una vez alcanzada la cantidad de historias simuladas, se libera la memoria reservada para cargar las funciones de probabilidad.

La fuente se compila con *gcc* utilizando la bandera *-shared* que genera el ejecutable

como la librería compartida que se enlaza dinámicamente a TRIPOLI:

```
gcc source_n_p.c -shared -o source.so
```

Código 4.1: Compilación de la fuente.

Dada que se busca reproducir la geometría de McStas, la fuente recibe en el puntero *param* la posición en z de la fuente y la cantidad de partículas que se correrán en la simulación de TRIPOLI. A continuación se indica cómo queda configurado el apartado en el INPUT de TRIPOLI que define la fuente externa:

```
SOURCES_LIST
1
SOURCE
  INTENSITY 1
  ALL_PARTICLE
    EXTERNAL source.so
    NO_GEOMSOURCE_WARNING
    SOBOLE_POINTS 1
    PARAM 2
      z N
  END_SOURCES
END_SOURCES_LIST
```

Código 4.2: Definición de fuente externa en INPUT de TRIPOLI.

Donde z y N , son la posición en la coordenada z de la superficie donde se ubica la fuente de distribuciones y N es el número total de historias de la simulación.

4.3.1. Benchmark TRIPOLI-McStas

Con el objeto de asegurar la capacidad de la fuente externa de TRIPOLI frente a McStas que ya se encuentra validado, se realizó a modo de verificación un cálculo utilizando una geometría sencilla que consistía en la fuente de distribuciones y a $1m$ de distancia un detector de las dimensiones de la guía ($7cm \times 15cm$). La simulación se llevó a cabo con ambos códigos únicamente para una fuente de distribuciones de neutrones únicamente. Se obtuvo una diferencia menor al 1 % en las corrientes totales calculadas en el detector, comprobando de esta manera el correcto funcionamiento de la fuente de distribuciones de TRIPOLI. En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos con ambos códigos. La diferencia puede atribuirse a que McStas transporta los neutrones en vacío total mientras que en TRIPOLI debe utilizarse un material de muy baja densidad.

	TRIPOLI	McStas	Diferencia
Corriente en detector $\left[\frac{n}{cm^2 s}\right]$	$3,276 \cdot 10^{11}$	$3,272 \cdot 10^{11}$	0,12 %

Tabla 4.3: Corrientes calculadas con fuentes de distribuciones para TRIPOLI y McStas.

4.3.2. Discretizaciones utilizadas y resultados integrales obtenidos

Para cada variable en la fuente de tracks, la discretización utilizada para la generación de la fuente de distribuciones para neutrones y fotones se muestra en la Tabla 4.4. Cada discretización macro o micro espacial se elige para cada macro grupo de energía. El proceso de selección de la cantidad y los cortes de las discretizaciones se realizó de manera iterativa hasta cumplir los requerimientos de cálculo.

	Variables								
	E		X		Y		μ		φ
	Macro	Micro	Macro	Micro	Macro	Micro	Macro	Micro	Micro
Neutrones	3	139	(30,30,24)	(150,100,70)	(30,30,24)	(150,100,70)	9	34	20
Fotones	3	67	(17,15,13)	(85,55,43)	(17,15,13)	(85,55,43)	3	34	16

Tabla 4.4: Discretizaciones utilizadas para las diferentes variables que determinan la fuente de distribuciones.

Se calcularon con McStas las corrientes a la salida del haz GT3, con fuentes de TRACKS y fuente de distribuciones. Los valores se muestran en la Tabla 4.5 para neutrones y en la Tabla 4.6 para fotones.

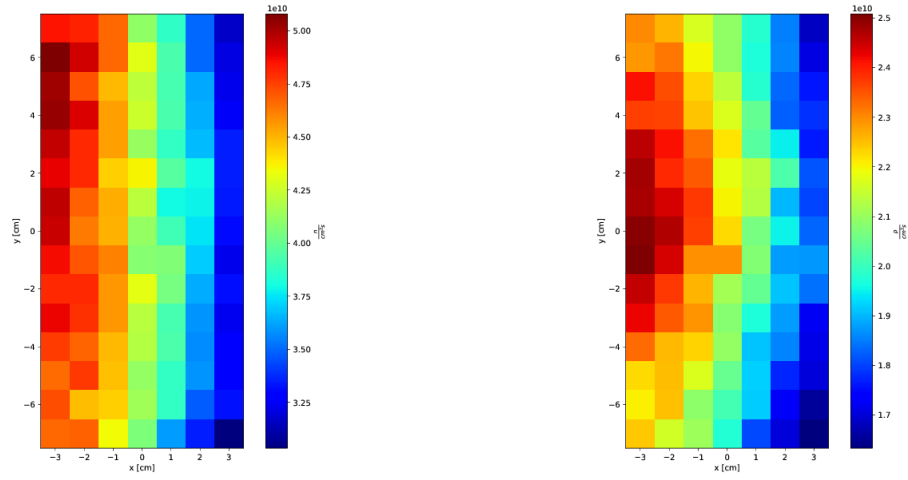
	Corriente $\left[\frac{n}{cm^2 s}\right]$		
	$[0 - 100]meV$	$[0 - 300]meV$	Total
Tracks	$2,36 \cdot 10^{10}$	$2,83 \cdot 10^{10}$	$4,25 \cdot 10^{10}$
Distribuciones	$2,33 \cdot 10^{10}$	$2,77 \cdot 10^{10}$	$4,19 \cdot 10^{10}$
F	0,9887	0,9777	0,9873

Tabla 4.5: Valores de corrientes de neutrones a la salida de GT3, para fuente de tracks y de distribuciones.

	Corriente total $\left[\frac{f}{cm^2 s}\right]$
Tracks	$2,10 \cdot 10^{10}$
Distribuciones	$2,06 \cdot 10^{10}$
F	0.9799

Tabla 4.6: Valores de corrientes de fotones a la salida de GT3, para fuente de tracks y de distribuciones.

En la Figura 4.8 se muestra la distribución espacial de las corrientes de neutrones y fotones, obtenida con la Fuente de distribuciones, a la salida del haz GT3.



(a) Corriente de neutrones.

(b) Corriente de fotones.

Figura 4.8: Distribución espacial de la corriente para neutrones y fotones.

4.3.3. Cálculo de Dosis equivalente ambiental

En línea con el objetivo del trabajo, una vez testado la funcionalidad de la fuente de distribuciones en TRIPOLI, se busca asegurar el correcto cálculo de las magnitudes dosimétricas involucradas.

Se estudió en consecuencia, un caso sencillo de una fuente puntual monoenergética e isotrópica de fotones en un medio vacío, ya que la relación entre flujo escalar y dosis es lineal para esta partícula. De este modo, la intensidad del flujo es conocida $\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi r^2}$.

Calculando el flujo escalar con el código y utilizando los factores de conversión a dosis equivalente se obtienen resultados que son consistentes con el score propio para dosis equivalente que incorpora el código.

Se probó lo mismo para el caso de la fuente de distribuciones de fotones y neutrones, en el caso de vacío y se obtuvieron resultados análogos.

Capítulo 5

Estudio conceptual de un blindaje de radiación

Se utilizó la herramienta desarrollada anteriormente para la determinación y análisis de los niveles de tasa de dosis equivalente ambiental en inmediaciones del haz GT3. Se analizan diferentes configuraciones a nivel conceptual, es decir sin precisión geométrica, para extraer conclusiones referidas al desempeño de la línea de cálculo como también de los niveles estimativos de tasa de dosis para esta instalación particular.

5.1. Criterio de diseño

La elección de los materiales y el diseño de las instalaciones deben ser tal de cumplir con los requerimientos internos del proyecto. Se establece que la tasa de dosis equivalente ambiental en facilidades donde los trabajadores tienen libre acceso debe ser menor a $3 \frac{\mu Sv}{h}$ y si, este valor es excedido, deben establecerse medidas protectivas adicionales. Por otro lado, si la tasa de dosis equivalente ambiental supera los $200 \frac{\mu Sv}{h}$, el acceso a la instalación debe ser prevenida por una barrera física. Debe optimizarse por otra parte, la capacidad constructiva y la valuación económica del diseño.

5.2. Modelo de cálculo

Para llevar a cabo la simulación en TRIPOLI, se realizó el modelo 3D de forma simplificada del conducto de extracción GT3, desde la misma superficie donde fue grabada la fuente de TRACKS hasta fuera del reactor, tal como se indica en la Figura 5.1. El primer conducto de extracción, en marrón, se consideró relleno de He, e inmerso en H_2O , en cyan. El haz, en rojo, análogamente se consideró relleno de He e inmerso en un blindaje de Hormigón pesado, en gris. La parte exterior al haz, en verde, se supone vacío y los blindajes, en azul, son del mismo material, hormigón pesado.

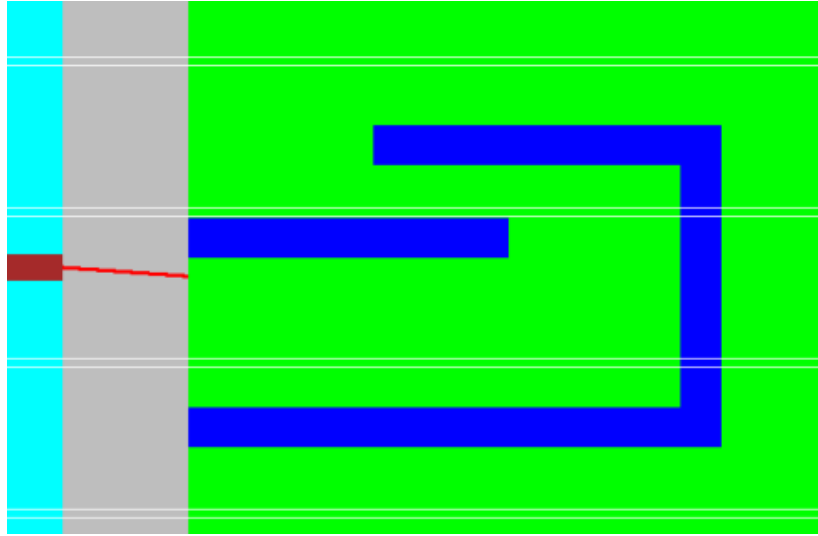


Figura 5.1: Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI.

5.3. Resultados preliminares

Se simularon inicialmente 10^7 partículas de fuente. La distribución de tasa de dosis en $\frac{\mu Sv}{h}$ se muestra en la Figura 5.2. La fuente se encuentra indicada como la superficie P1.

Como se observa también en la Figura 5.2, resulta difícil calcular la tasa de dosis fuera del blindaje por la baja estadística que se tiene. Es muy pequeña la fracción de partículas que llegan a salir por el haz, el cociente entre las corrientes a la salida del haz y la fuente es de $6,97 \cdot 10^{-3}$. Deberían entonces simularse alrededor de 3 órdenes de magnitud más de historias para conseguir aproximadamente 10^7 historias afuera. Como el objetivo es obtener una descripción en la región exterior al haz se propone trasladar la fuente de distribuciones hasta la salida del colimador de GT3, es decir, la superficie P2.

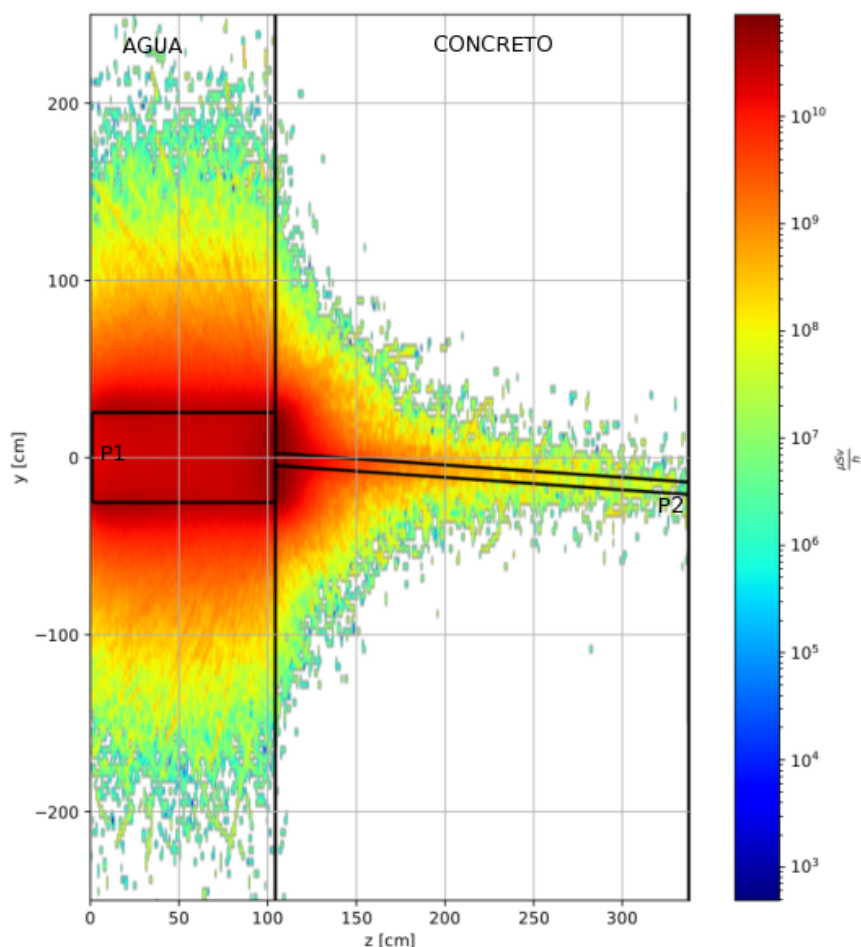


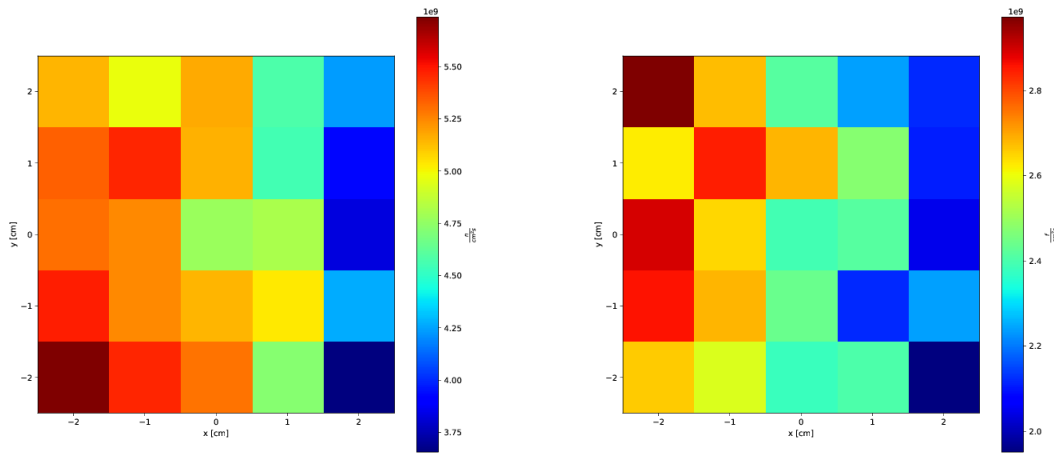
Figura 5.2: Tasa de dosis total en $[\frac{\mu Sv}{h}]$. La fuente se encuentra en la superficie P1.

5.4. Traslado de Fuente de Distribuciones

Una vez puesta a prueba la línea de cálculo desarrollada, dado que con la configuración original resulta muy difícil obtener una mejor descripción de la distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental en regiones exteriores al conducto de extracción GT3, se propone generar una nueva fuente de distribuciones a la salida del haz GT3 e iniciar una nueva simulación con TRIPOLI desde allí, utilizando la primera fuente de distribuciones generada. Esto representa una técnica de reducción de varianza ya que con la misma cantidad de historias simuladas se podrá obtener una descripción mucho más clara de la distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental.

5.5. Caracterización de la nueva fuente de distribuciones

En la nueva posición de la fuente de distribuciones, se puede estudiar la calidad de las partículas que llegaron ya que esto condiciona cómo será el algoritmo de muestreo. De esta manera en la Figura 5.3 se muestra a modo de ejemplo, la distribución espacial en la superficie de interés tanto para neutrones como para fotones.



(a) Corriente de neutrones.

(b) Corriente de fotones.

Figura 5.3: Distribución espacial de la corriente para neutrones y fotones.

Se puede observar un corrimiento hacia la izquierda la distribución de neutrones y fotones, evidenciando el mismo efecto desarrollado en secciones anteriores.

5.6. Generación del nuevo modelo de cálculo

Se colocó un colimador de sección cuadrada de $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ a salida del haz y esta geometría fue necesaria construirla en McStas para la generación de la nueva fuente de distribuciones. Debido al traslado de la fuente de distribuciones, se requiere volver a construir el modelo de cálculo de TRIPOLI, trasladando el origen de la geometría de manera tal que coincida con la fuente. El modelo inicial se muestra en la Figura 5.4, donde se respetan los mismos colores para los materiales indicados en el modelo anterior.

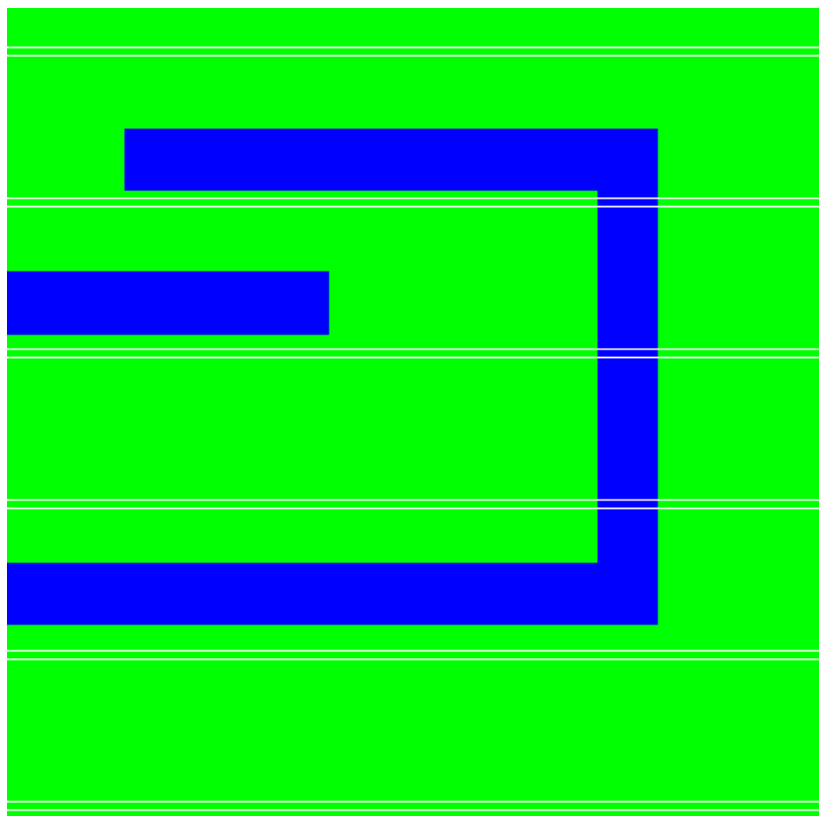
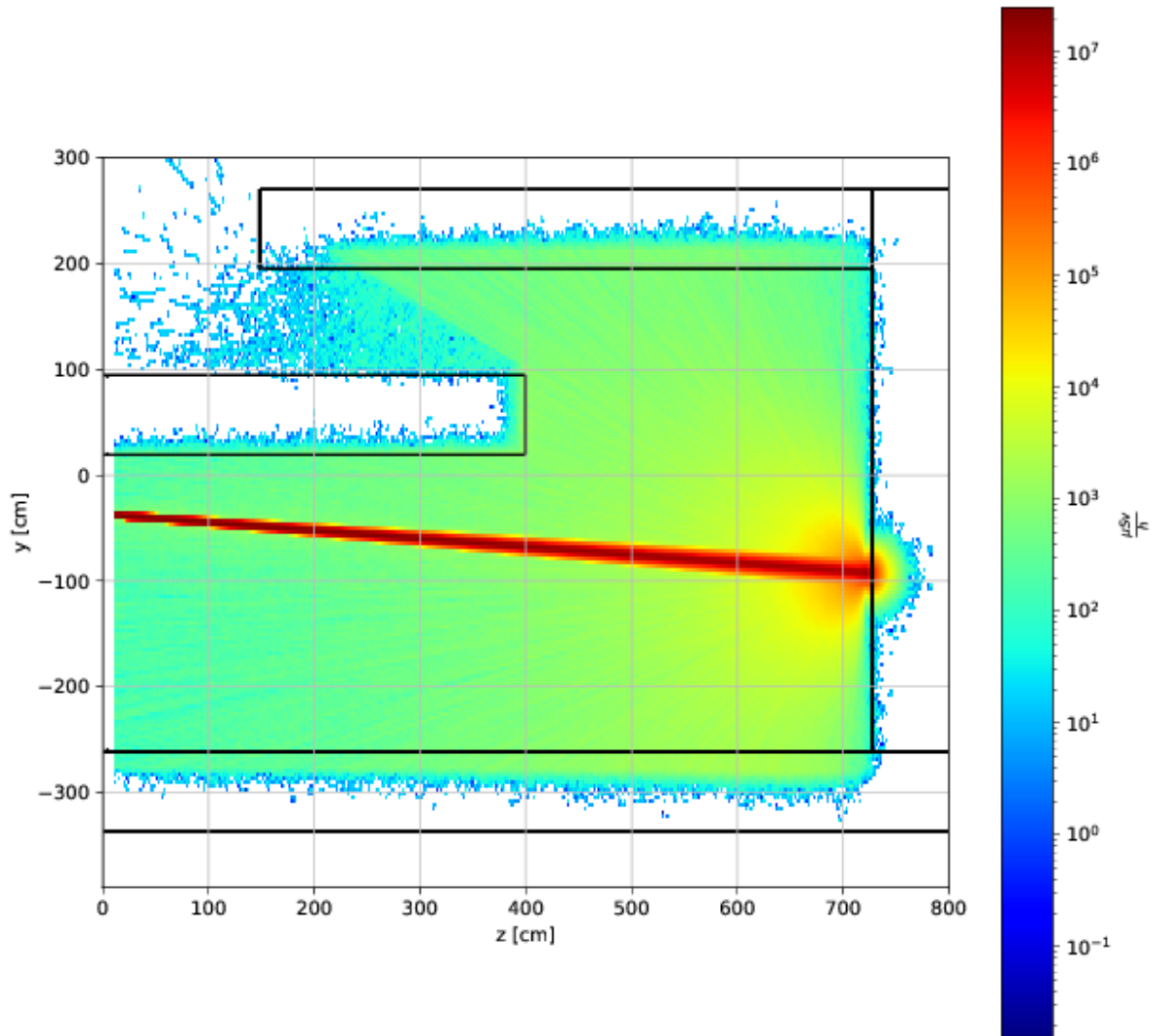


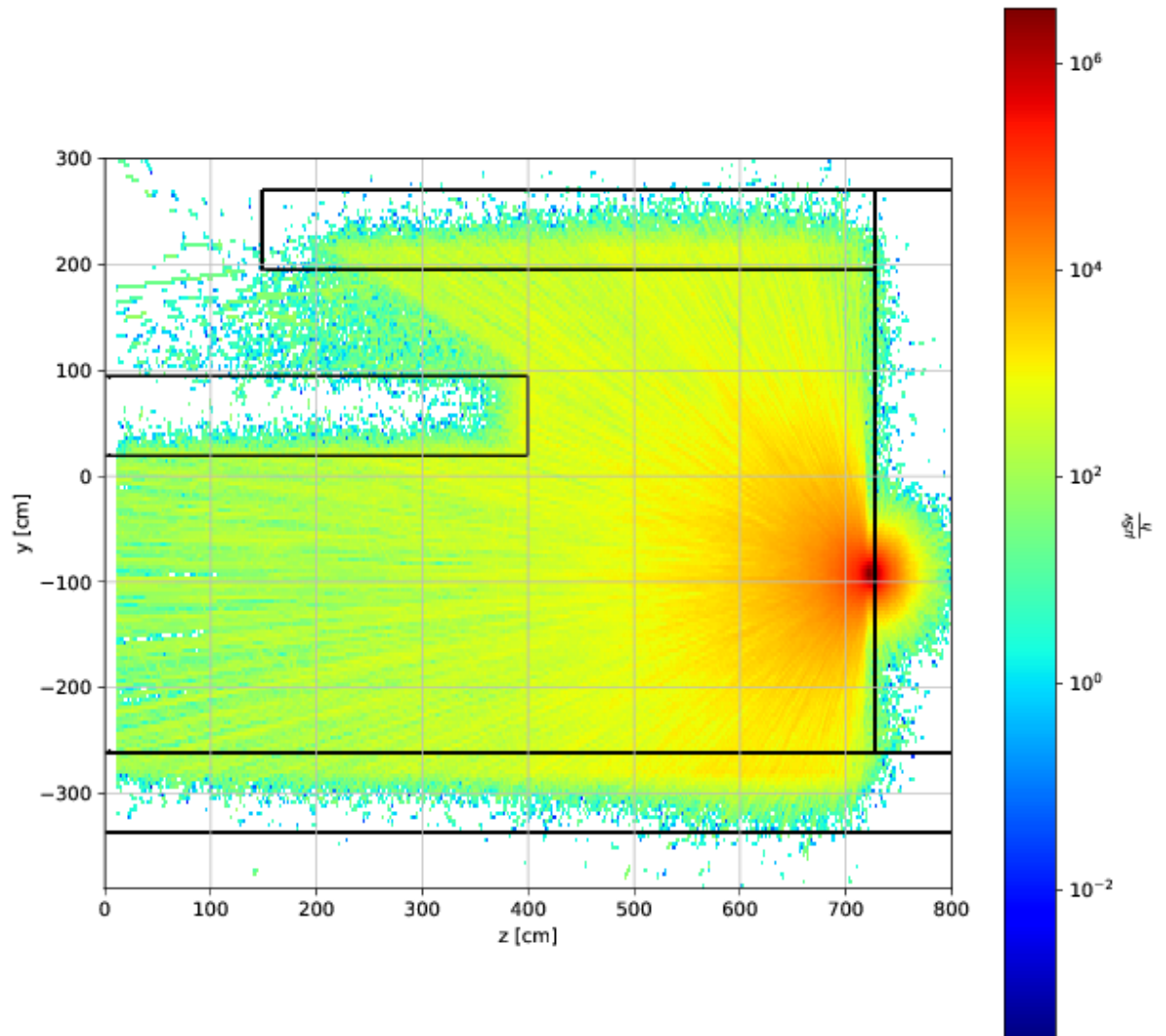
Figura 5.4: Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI.

5.7. Resultados en reactor-face

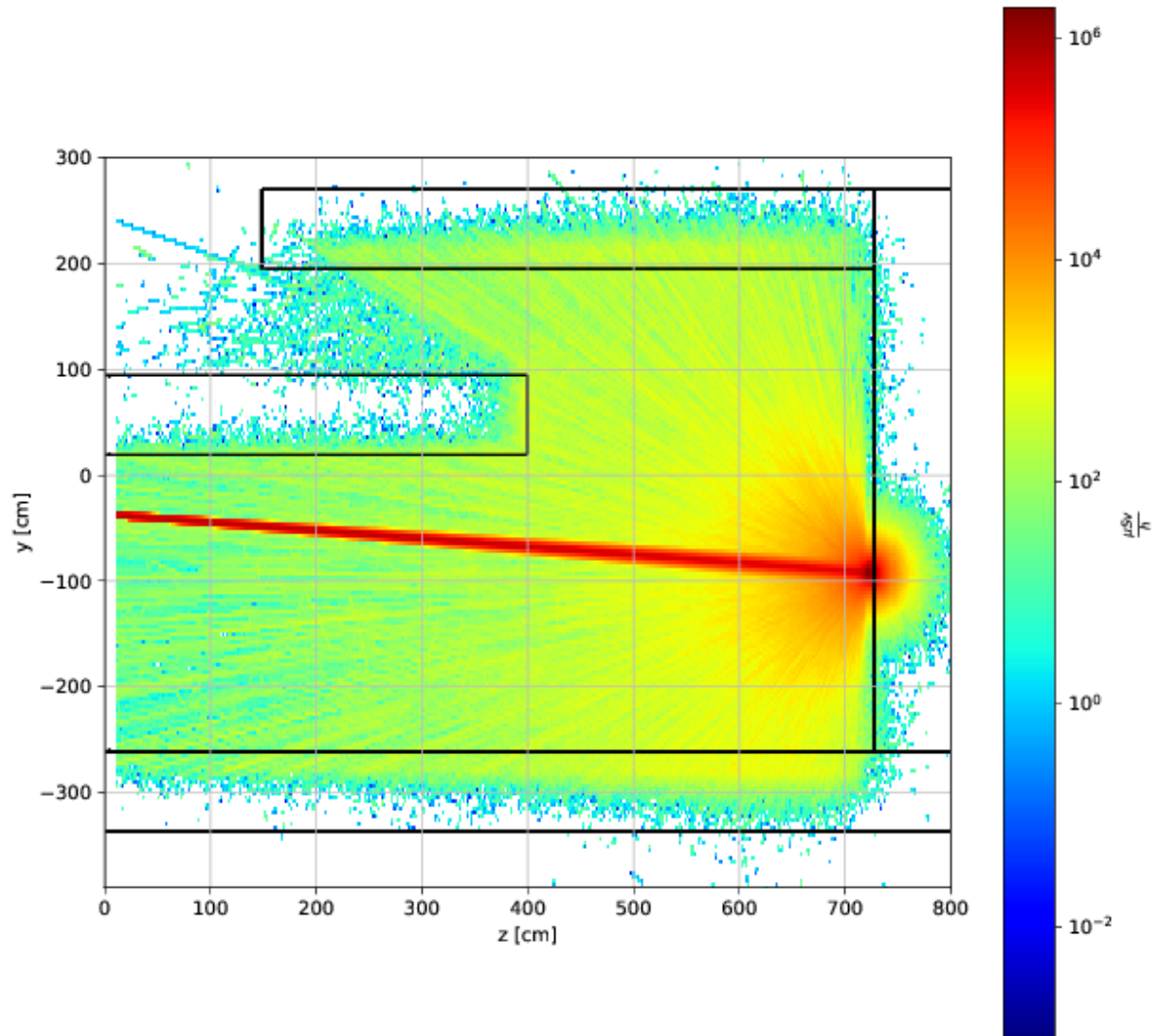
A partir de esta nueva configuración, se corrió una nueva simulación también con 10^7 partículas. Las distribuciones de las diferentes tasas de dosis en $\frac{\mu Sv}{h}$ se muestran en la Figura 5.5. En la Figura 5.5a se observa la distribución de la tasa de dosis debida únicamente a neutrones. En la Figura 5.5b se observa la distribución de la tasa de dosis debida únicamente a fotones secundarios. En la Figura 5.5c se observa la distribución de tasa de dosis debida a fotones tanto de fuente como secundarios y por último en la Figura 5.5d se muestra la distribución de tasa de dosis producida por neutrones y fotones de fuente como también fotones secundarios.



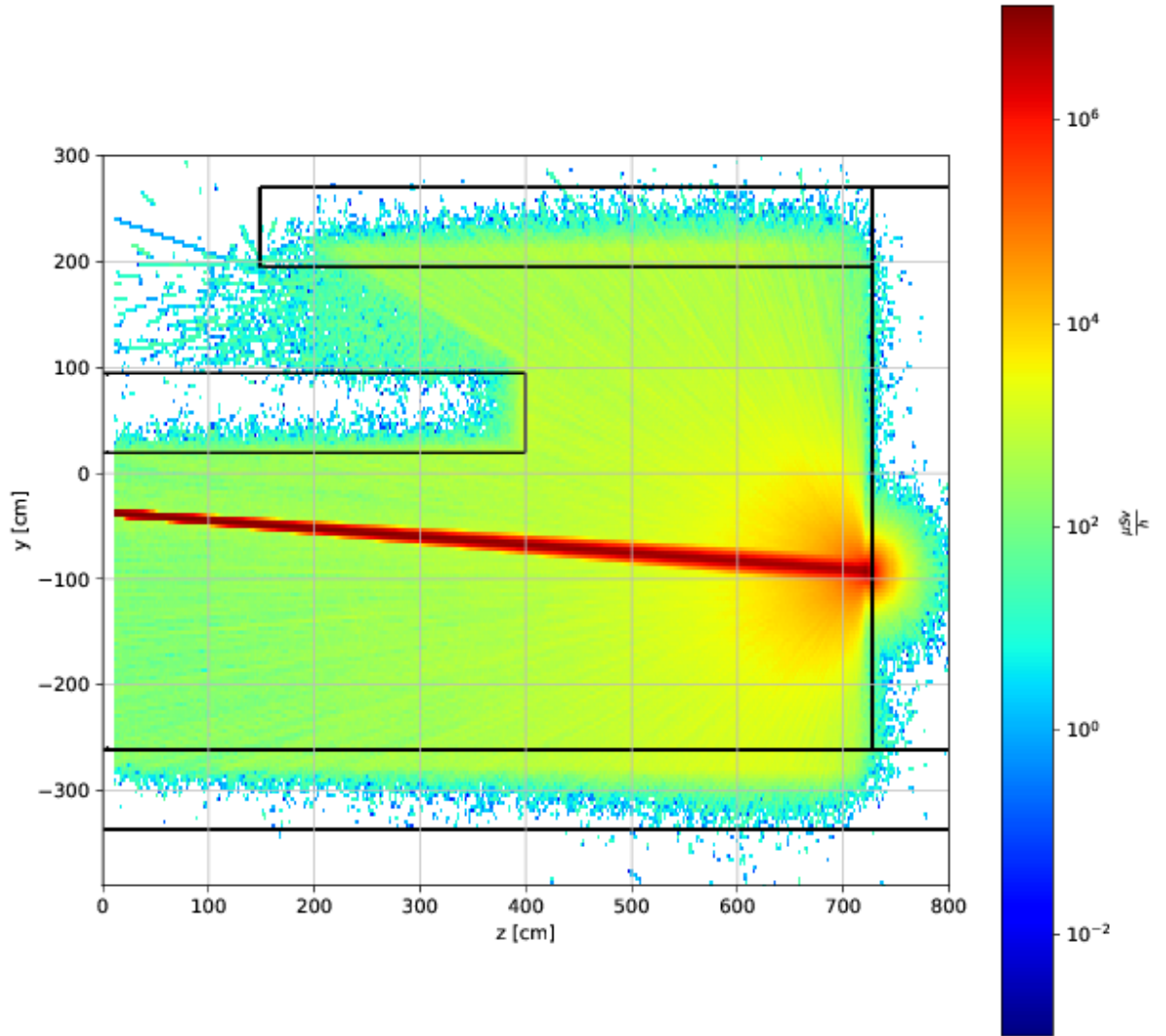
(a) Tasa de dosis debida a neutrones en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(b) Tasa de dosis debida a fotones secundarios en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(c) Tasa de dosis debida a fotones de fuente y secundarios en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(d) Tasa de dosis debida a neutrones y fotones en $\frac{\mu Sv}{h}$.

Figura 5.5: Distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental en $\frac{\mu Sv}{h}$.

Dado que la dosis equivalente ambiental continua siendo alta más allá de la pared del blindaje, se propone realizar una nueva simulación con un beam-catcher, también de hormigón pesado alineado con la dirección del haz para disminuir ese efecto. El modelo de cálculo propuesto se muestra en la Figura 5.6.

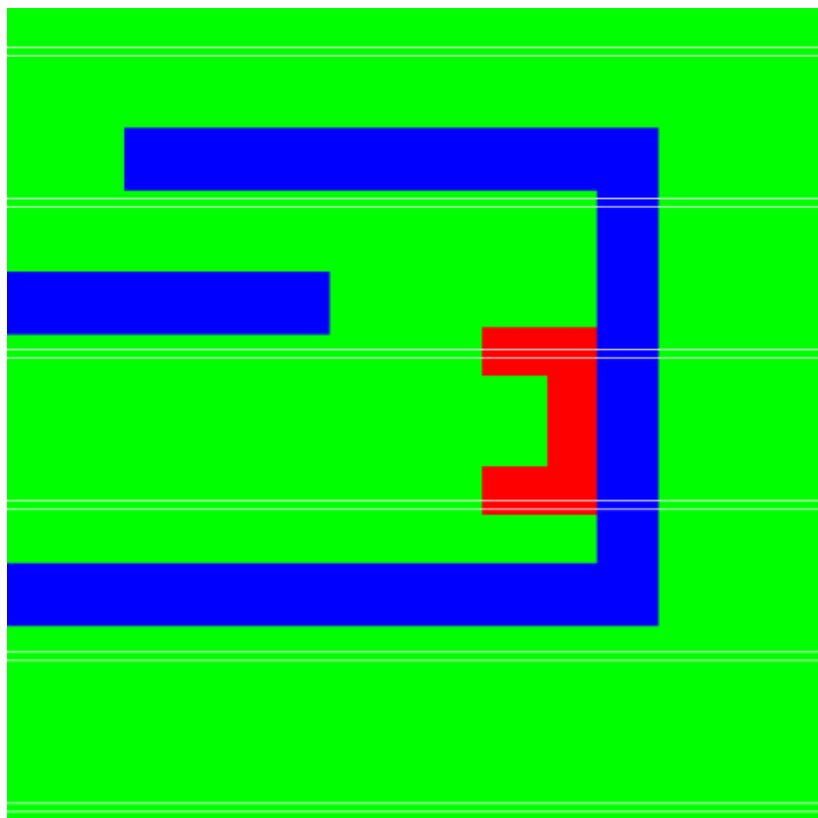
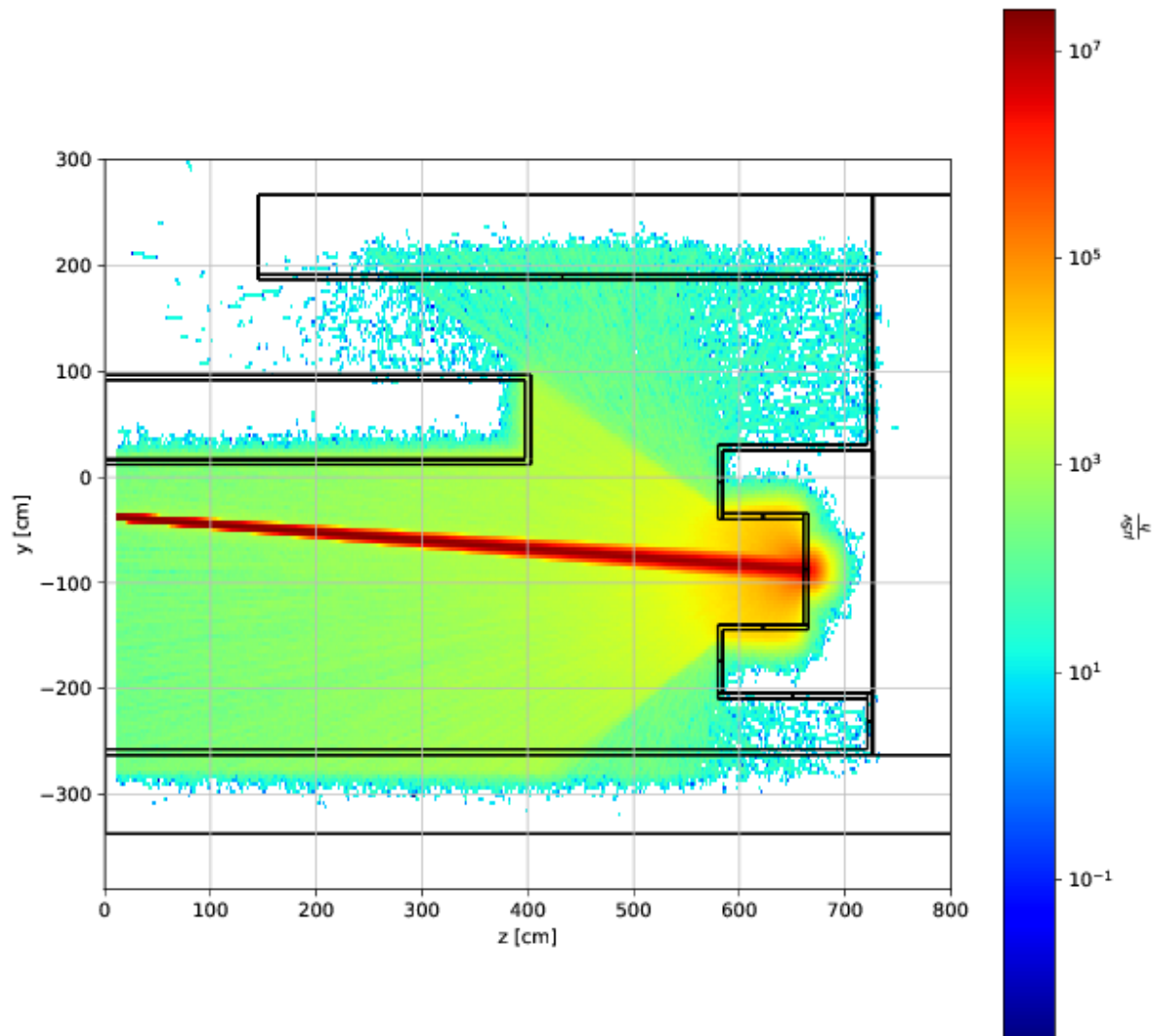
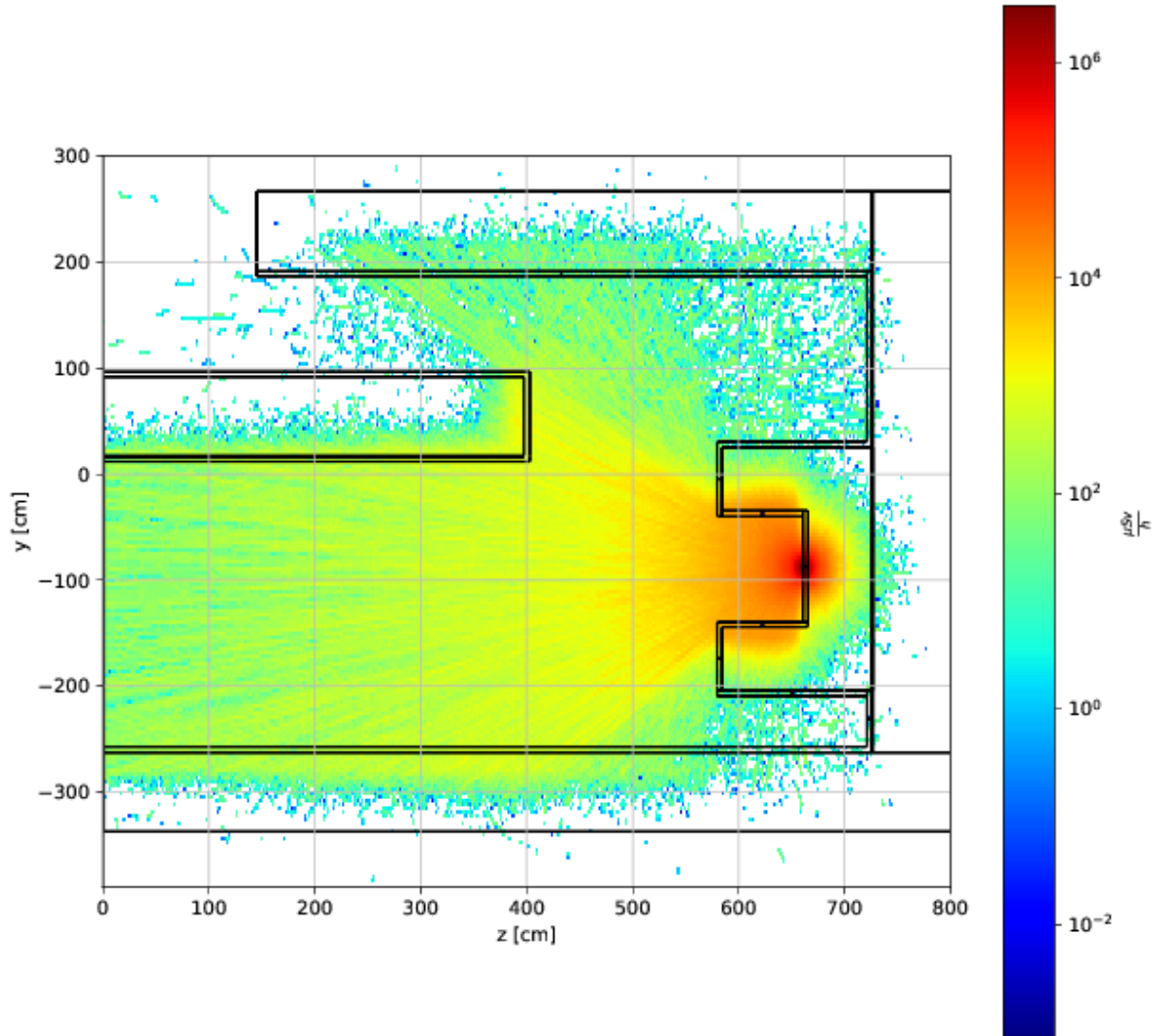


Figura 5.6: Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI, incluyendo el beam catcher.

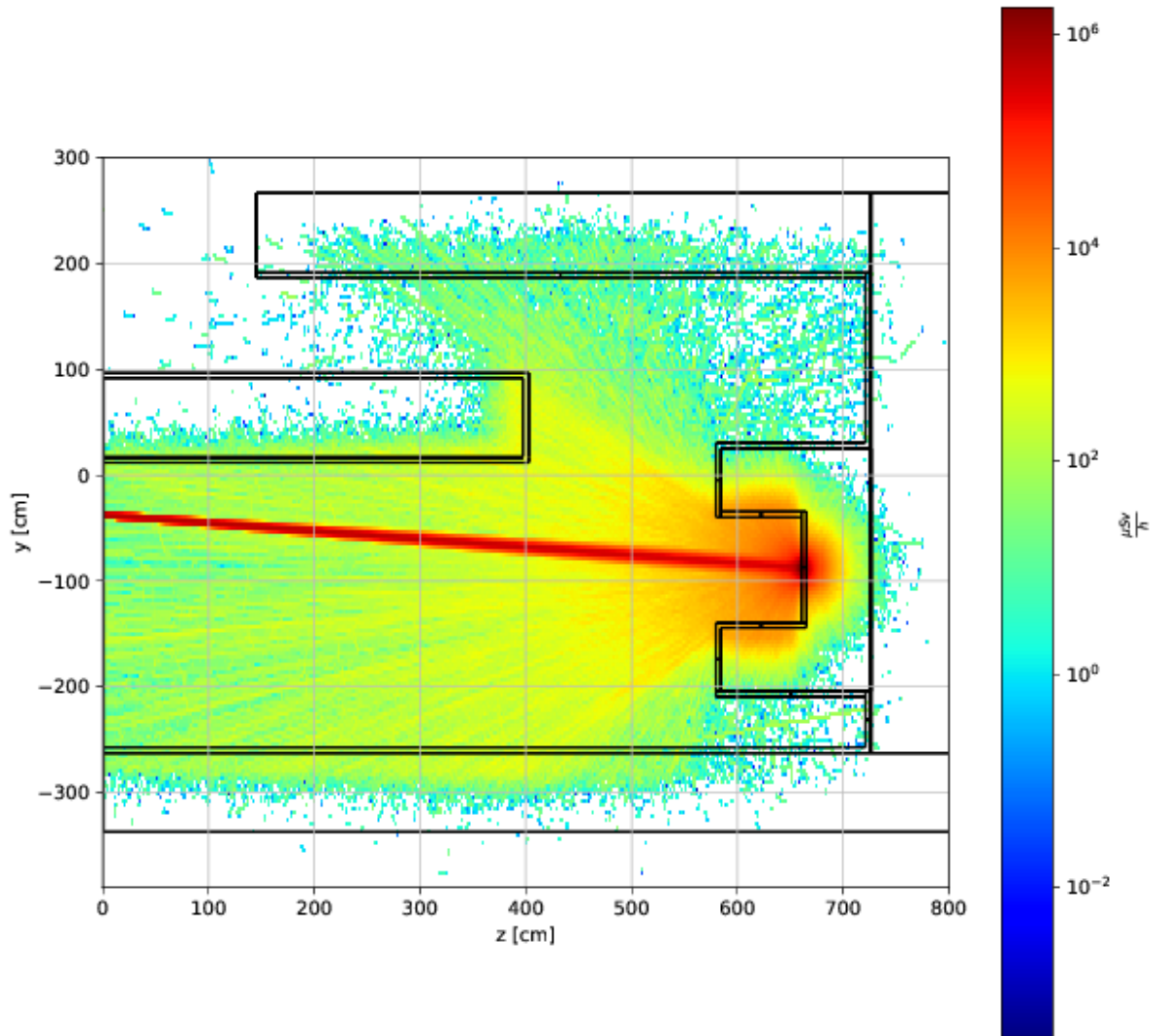
Con esta configuración se realizó una nueva simulación, constatándose el efecto buscado con su implementación. Las diferentes distribuciones de tasas de dosis en $\frac{\mu Sv}{h}$ se muestran en la Figura 5.7. En la Figura 5.7a se observa la distribución de tasa de dosis debida únicamente a neutrones. En la Figura 5.7b se observa la distribución de tasa de dosis debida únicamente a fotones secundarios. En la Figura 5.7c se observa la distribución de tasa de dosis debida a fotones tanto de fuente como secundarios y por último en la Figura 5.7d se muestra la distribución de tasa de dosis producida por neutrones y fotones de fuente como también fotones secundarios.



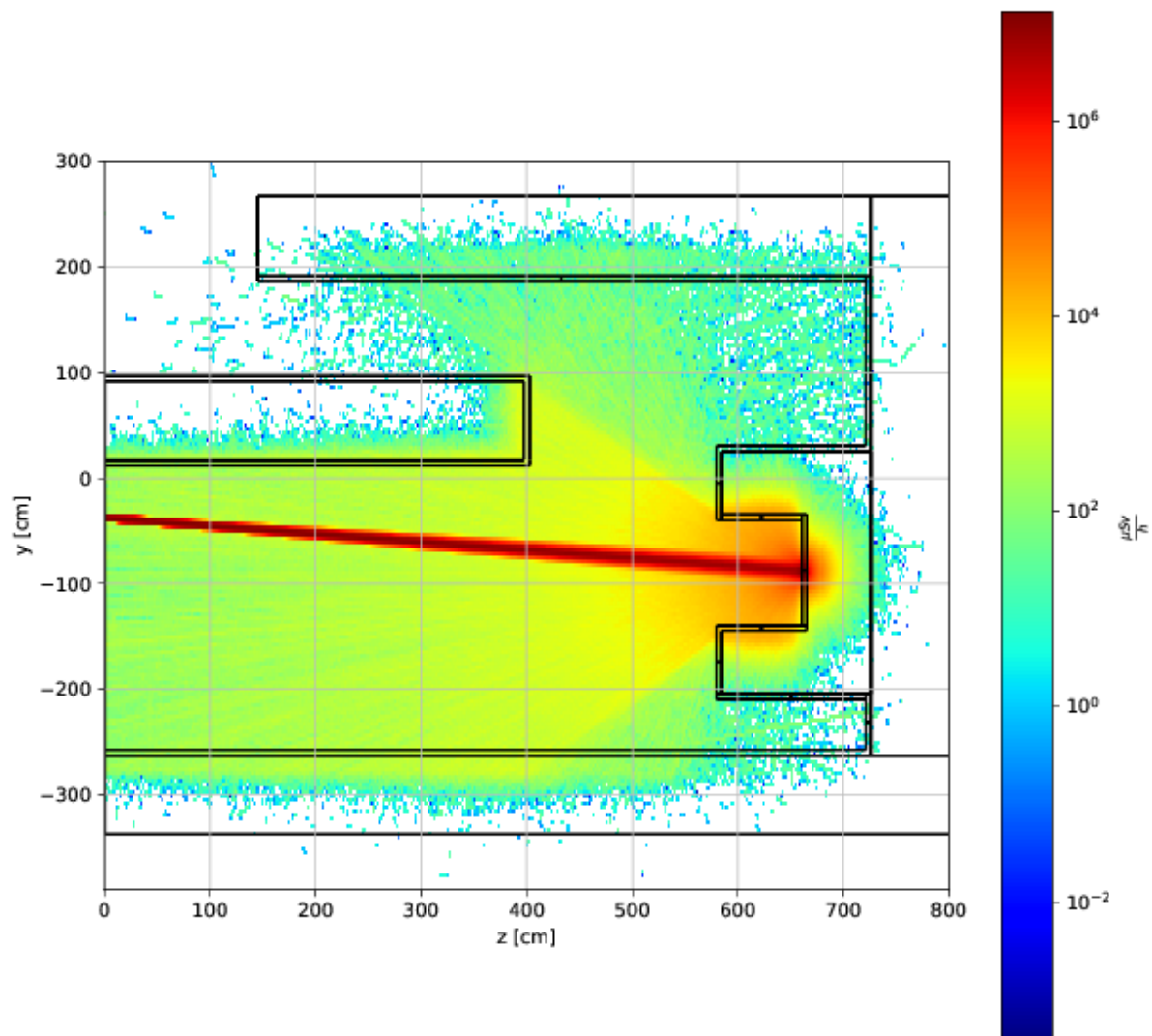
(a) Tasa de dosis debida a neutrones en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(b) Tasa de dosis debida a fotones secundarios en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(c) Tasa de dosis debida a fotones de fuente y secundarios en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(d) Tasa de dosis debida a neutrones y fotones en $\frac{\mu Sv}{h}$.

Figura 5.7: Distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental en $\frac{\mu Sv}{h}$.

Analizando la componente debida únicamente a las reacciones que generan gammas secundarios, el nivel de tasa de dosis no es despreciable. Por este motivo, se estudia el caso donde se ubica sobre las paredes un recubrimiento de un material absorbente de neutrones y cuyas reacciones (n, γ) produzcan radiación gamma de menor energía, en este caso se analizó un recubrimiento de 5 cm de espesor de B_4C . El modelo de cálculo de este nuevo problema se muestra en la Figura 5.8.

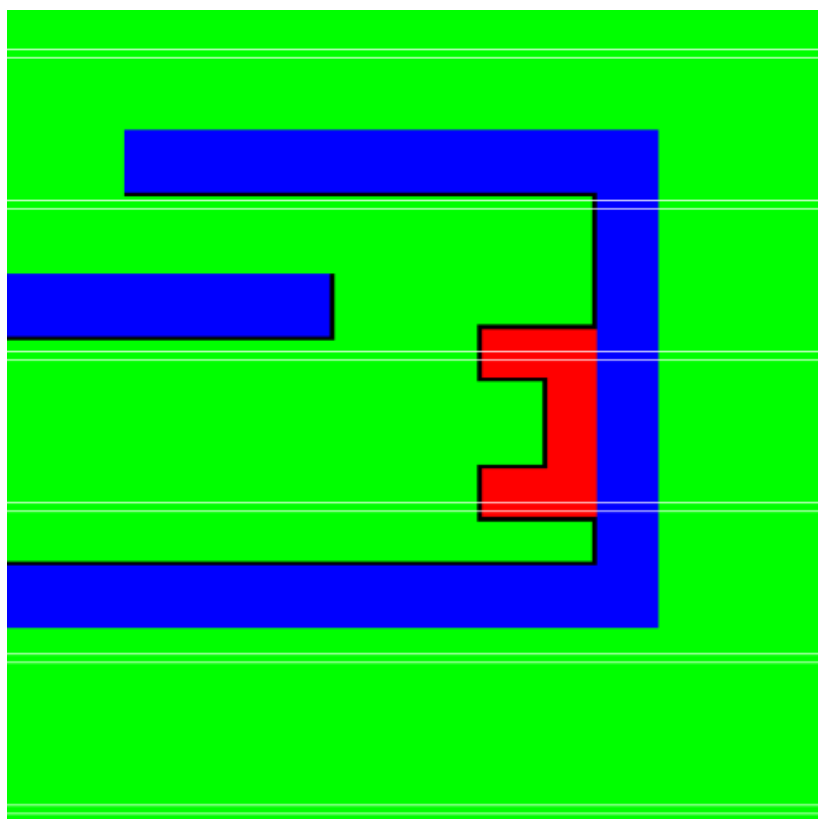
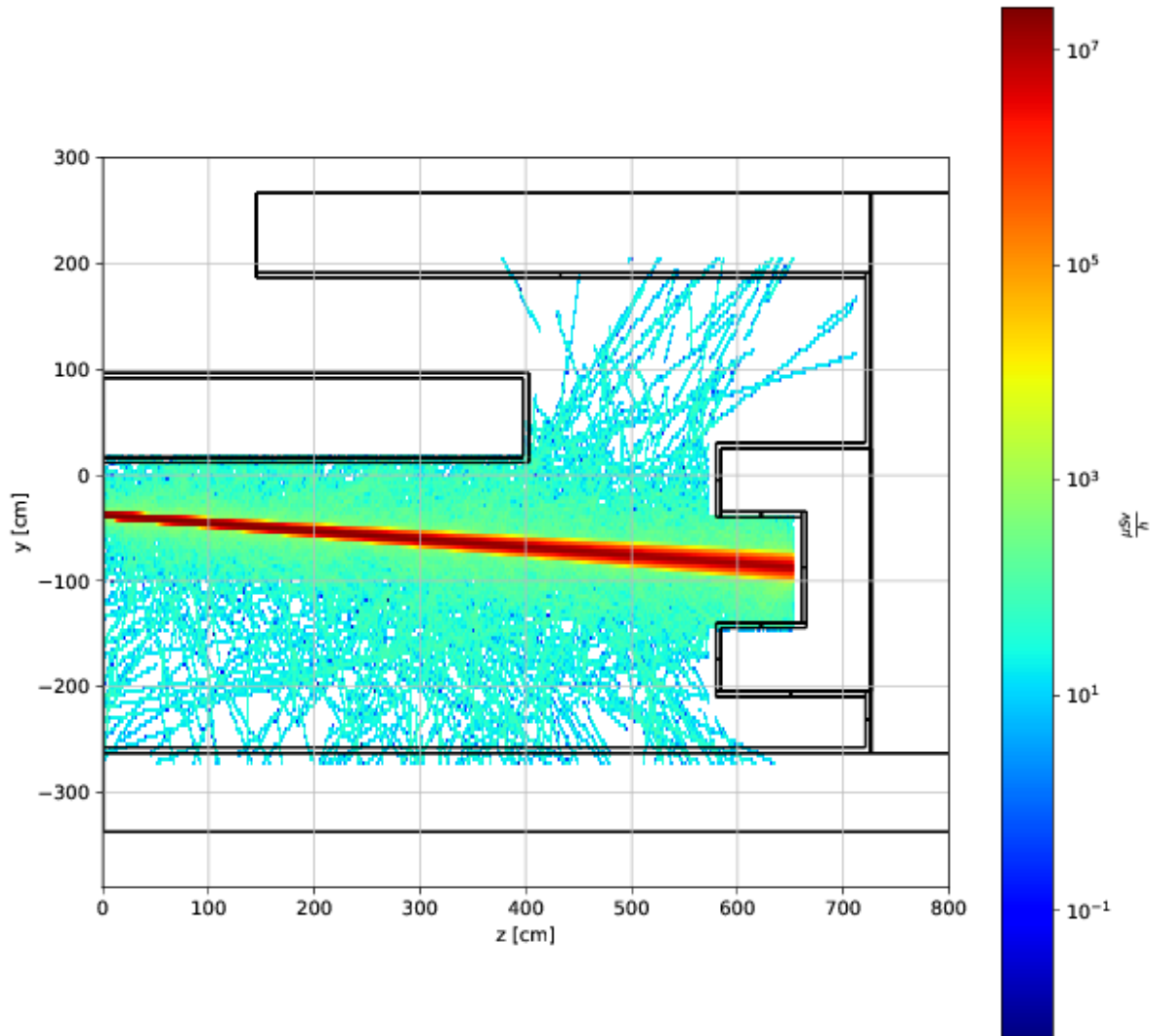
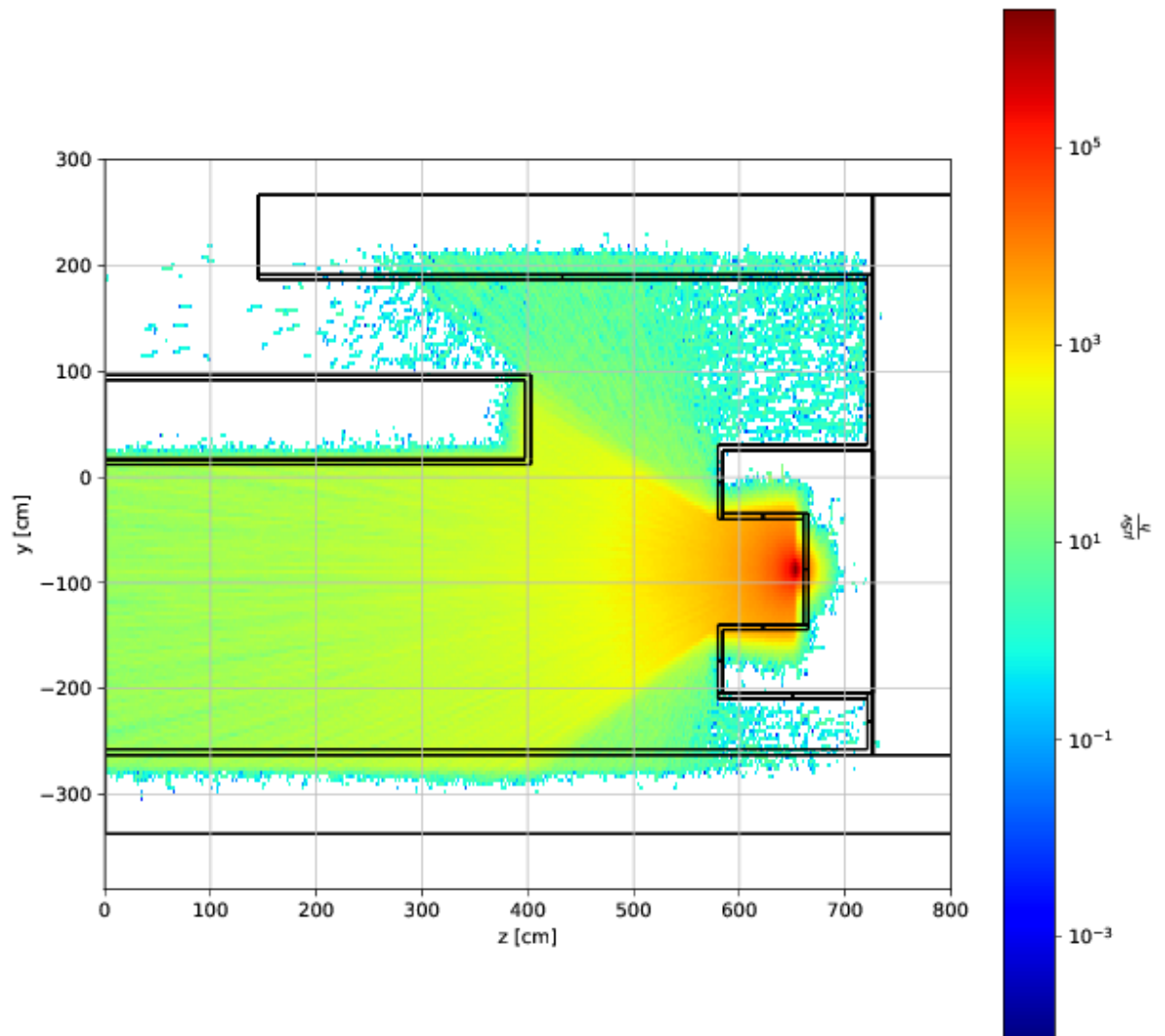


Figura 5.8: Modelo de cálculo utilizado para TRIPOLI, incluyendo el beam catcher y recubrimiento de 5 cm de espesor en la paredes de B_4C . En negro se observa el recubrimiento de B_4C .

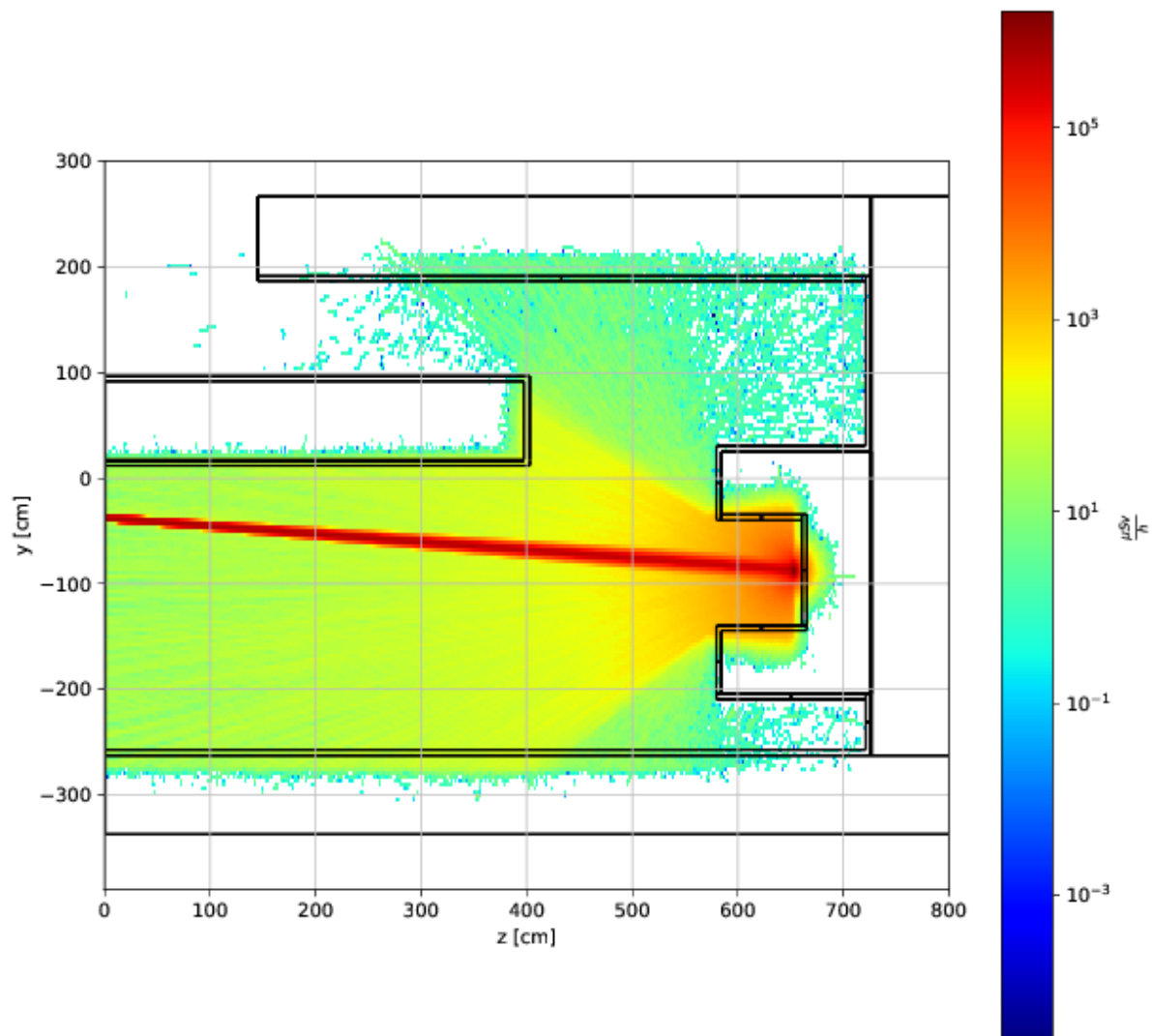
Por último se realizó una nueva simulación con este modelo de cálculo. Las diferentes distribuciones de tasas de dosis obtenidas, en $\frac{\mu Sv}{h}$, se muestran en la Figura 5.9. En la Figura 5.9a se observa la distribución de tasa de dosis debida únicamente a neutrones. En la Figura 5.9b se observa la distribución de tasa de dosis debida únicamente a fotones secundarios. En la Figura 5.9c se observa la distribución de tasa de dosis debida a fotones tanto de fuente como secundarios y por último en la Figura 5.9d se muestra la distribución de tasa de dosis producida por neutrones y fotones de fuente como también fotones secundarios.



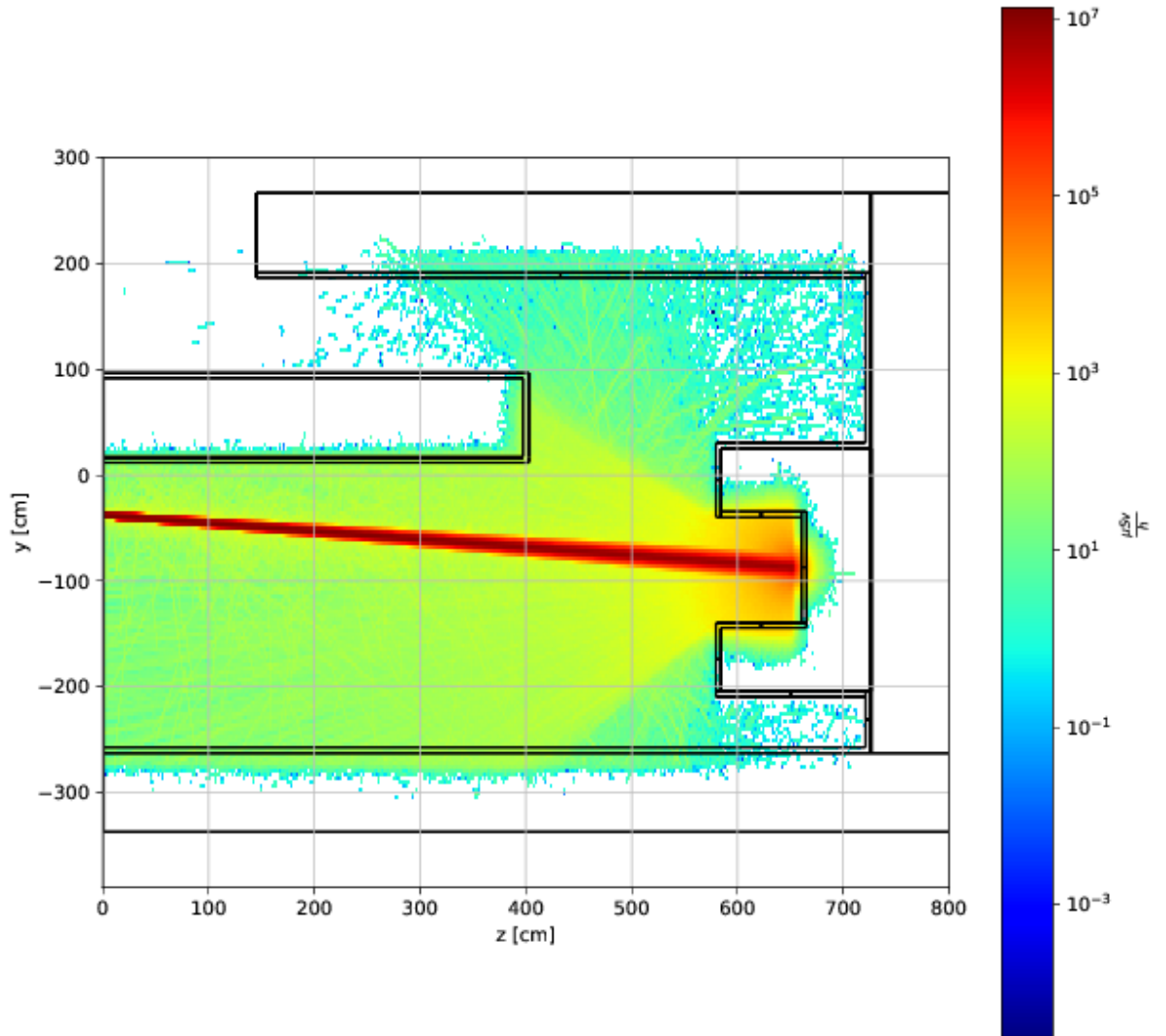
(a) Tasa de dosis debida a neutrones en $\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$.



(b) Tasa de dosis debida a fotones secundarios en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(c) Tasa de dosis debida a fotones de fuente y secundarios en $\frac{\mu Sv}{h}$.



(d) Tasa de dosis debida a neutrones y fotones en $\frac{\mu Sv}{h}$.

Figura 5.9: Distribución espacial de la tasa de dosis equivalente ambiental en $\frac{\mu Sv}{h}$.

Progresivamente se observa el cambio en la intensidad de la tasa de dosis, siempre más intenso en la dirección del haz. El recubrimiento de carburo de boro provee una disminución en un orden de magnitud para la tasa de dosis proveniente de fotones secundarios.

Por otra parte, resulta importante analizar las curvas de igual tasa de dosis equivalente ambiental o isodoses. Éstas delimitan diferentes regiones que realimentan las etapas de diseño y optimización de los blindajes. Los niveles elegidos son 3, 200 y $500 \frac{\mu Sv}{h}$, que corresponden a límites característicos de los criterios regulatorios.

En la Figura 5.10 se observan las líneas de igual tasa de dosis equivalente ambiental y la distribución espacial de la tasa de dosis debida tanto a neutrones y fotones, de fuente y secundarios, para un total de 10^7 partículas simuladas.

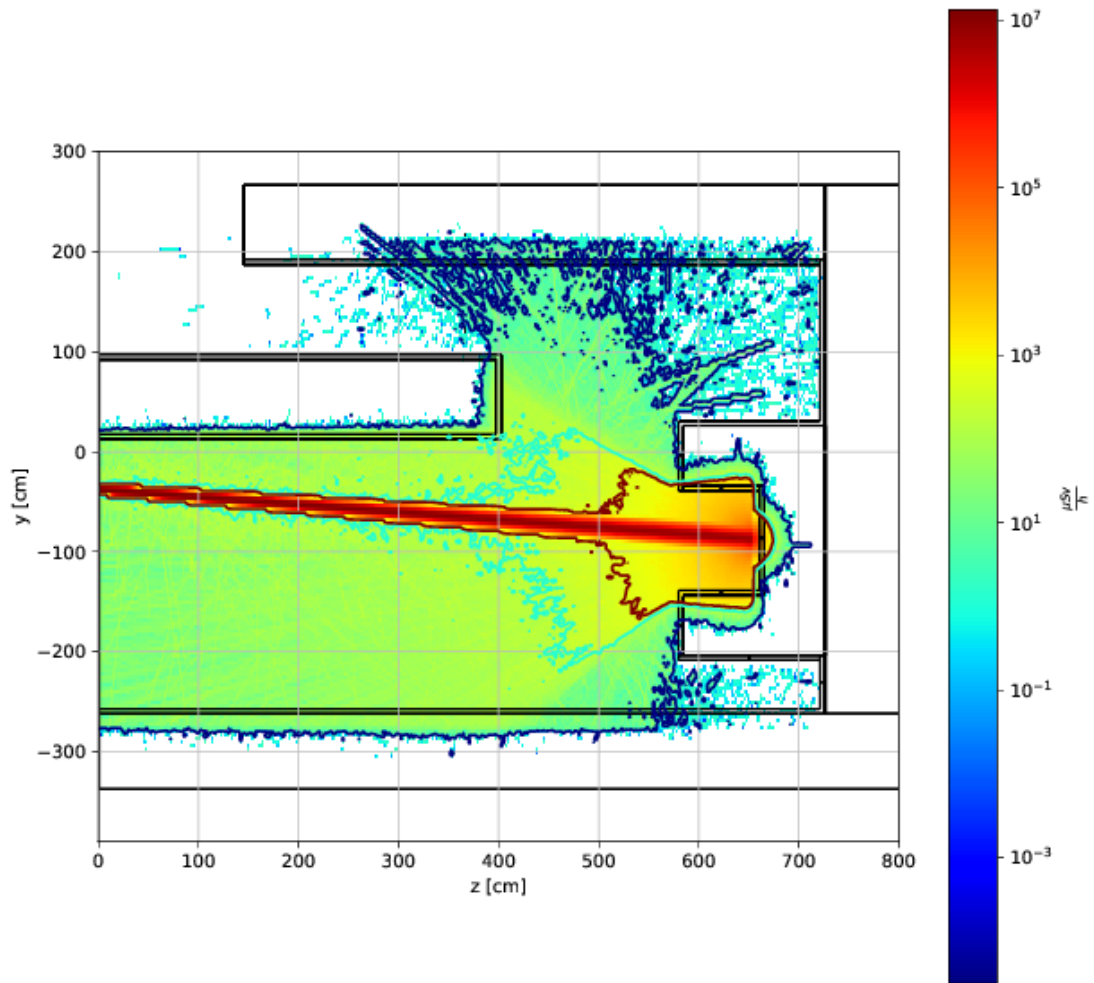


Figura 5.10: Curvas de igual tasa de dosis con 10^7 historias. En azul hasta $3 \frac{\mu Sv}{h}$, en cyan hasta $200 \frac{\mu Sv}{h}$ y en marrón hasta $500 \frac{\mu Sv}{h}$.

En la Figura 5.11 se observan las líneas de igual tasa de dosis equivalente ambiental y la distribución espacial de la tasa de dosis debida tanto a neutrones y fotones, de fuente y secundarios, para un total de 10^8 partículas simuladas.

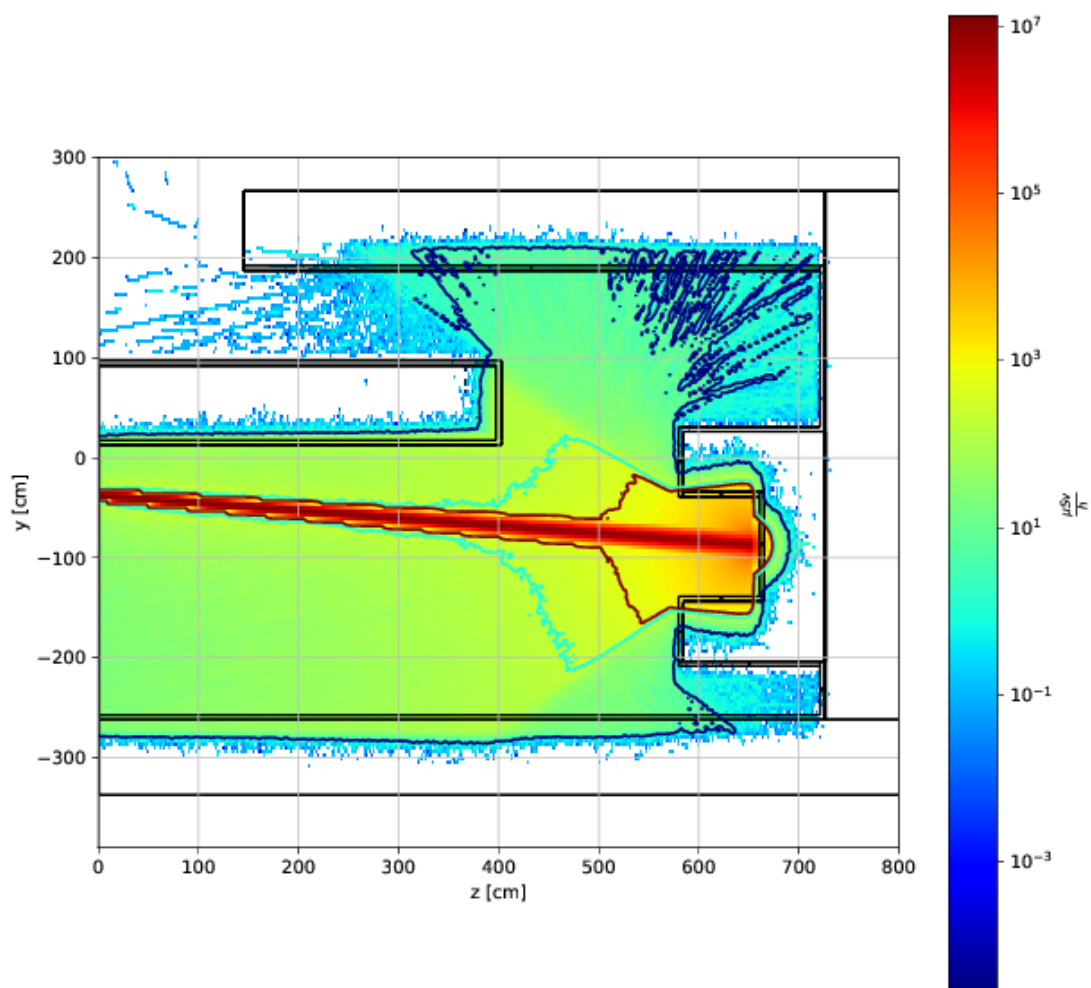


Figura 5.11: Curvas de igual tasa de dosis con 10^8 historias. En azul hasta $3 \frac{\mu Sv}{h}$, en cyan hasta $200 \frac{\mu Sv}{h}$ y en marrón hasta $500 \frac{\mu Sv}{h}$.

En la Figura 5.12 se observan las líneas de igual tasa de dosis equivalente ambiental y la distribución espacial de la tasa de dosis debida tanto a neutrones y fotones, de fuente y secundarios, para un total de 10^9 partículas simuladas.

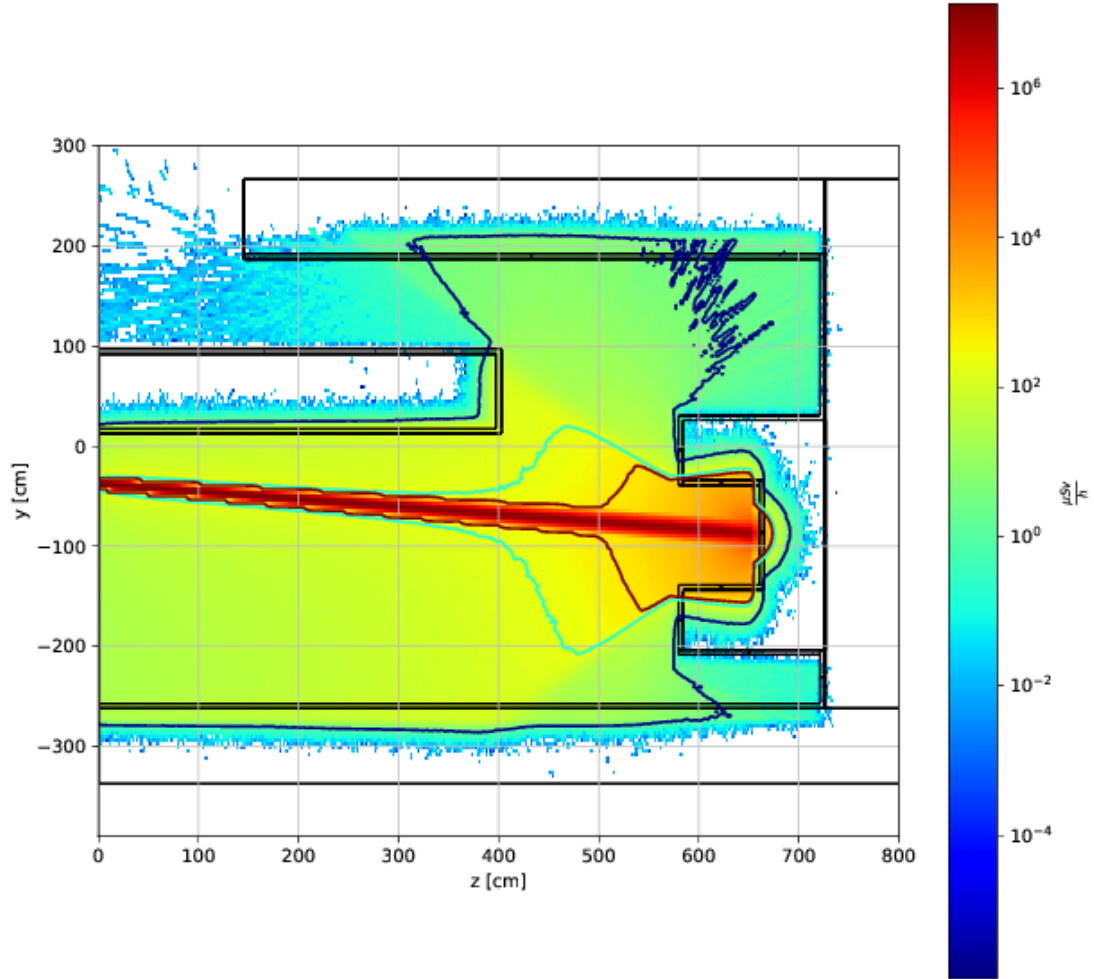


Figura 5.12: Curvas de igual tasa de dosis con 10^9 historias. En azul hasta $3 \frac{\mu Sv}{h}$, en cian hasta $200 \frac{\mu Sv}{h}$ y en marrón hasta $500 \frac{\mu Sv}{h}$.

Se presentan estos resultados con una mayor cantidad de partículas simuladas para poder determinar con mejor detalle las curvas de isodosis. Se observa que la curva que corresponde a $3 \frac{\mu Sv}{h}$ yace sobre la pared del blindaje. Se observa la mejora en la determinación de los niveles de tasa de dosis dado el incremento en el número de historias, no siendo demasiado significativo para más de 10^8 partículas.

El tiempo de cálculo de todas las simulaciones depende en primer lugar de la cantidad de historias pero también del problema particular: con o sin beam-catcher, con o sin absorbente de neutrones, simulando neutrones únicamente o neutrones y fotones acoplados. Se obtuvo para el peor de los casos aproximadamente $0,3\text{ CPUh}$ por cada 10^7 partículas simuladas. En el último caso de 10^9 partículas, la simulación tuvo una duración total de 35 h.

Se muestra la capacidad de la línea de cálculo para la obtención con suficiente grado de detalle de la distribución de la tasa de dosis distinguiendo curvas de isodosis y para el problema particular planteado se observa que la línea que corresponde al límite de optimización regulatorio yace sobre la misma geometría, cumpliendo con los requisitos a nivel conceptual.

Capítulo 6

Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se logró desarrollar una línea de cálculo basada en el código TRIPOLI para la caracterización de blindajes. A través del proceso se logró comprender los principios que rigen una simulación de naturaleza probabilística como es el método Monte Carlo.

Se logró entender el funcionamiento de un nuevo código de cálculo neutrónico TRIPOLI, desarrollando conocimiento que fue difundido dentro del Departamento donde tuvo lugar el trabajo. Se exploraron las fortalezas y bondades del código, en un orden creciente de dificultad hasta llegar a la implementación final. Se logró simular a través de la línea de cálculo desarrollada un esquema conceptual de blindajes a la salida del haz térmico GT3.

Se desarrolló un código que logra reproducir adecuadamente las distribuciones en cada una de las variables que caracterizan a las partículas a partir de la información almacenada en la fuente de trazas o TRACKS. De esta forma se sorteó la limitación de la fuente de trazas de correr una cantidad fija de partículas y en consecuencia limitando el nivel de incerteza del cálculo.

La línea de cálculo final inicia con los datos crudos de otra simulación Monte Carlo, sigue a través de McStas y componentes creados a medida, y finaliza con una determinación de la tasa de dosis equivalente ambiental en TRIPOLI.

Se propone como trabajo a futuro, desarrollar mejores aproximaciones a las distribuciones de las variables y por otro lado, analizar la factibilidad de poder seleccionar la cantidad y valores de corte de las discretizaciones de las variables de manera automática.

Apéndice A

Actividades de formación y desarrollo

A.1. Práctica Profesional Supervisada (PPS).

El presente trabajo tuvo lugar dentro de las instalaciones del Departamento de Física de Reactores y Radiaciones de la CNEA, en el Centro Atómico Bariloche. Durante el desarrollo del mismo, tuvieron lugar las actividades relacionadas con la Práctica Profesional Supervisada, por un total de 200 horas. El desarrollo del mismo estuvo a cargo y bajo la supervisión del Mgter. Ariel Aníbal Márquez.

El trabajo comprendió actividades de formación como ser el estudio y comprensión de los fenómenos físicos intervinientes, del mismo modo incentivó el desarrollo de criterios de ingeniería dada la familiarización con las estrategias de diseño propuestas dentro del Proyecto RA-10.

A.2. Proyecto y Diseño (P&D).

El desarrollo del Proyecto Integrador exigió el diseño y desarrollo de una línea de cálculo y diferentes interfaces de acople entre códigos ya existentes. Tuvo lugar también un testeo de capacidades y performance de las herramientas desarrolladas para la implementación final en un clúster de cálculo perteneciente al Proyecto RA-10.

Las actividades de P&D tuvieron lugar del mismo modo que la PPS dentro del Departamento de Física de Reactores y Radiaciones.

Bibliografía

- [1] Tripoli-4 version 8 user guide, 2013. [3](#), [7](#)
- [2] User and programmers guide to the neutron ray-tracing package mcstas version 2.5, 2018. [4](#)
- [3] Vassiliev, O. N. Monte carlo methods for radiation transport. *Fundamentals and Advanced Topics (Cham: Springer)*, 2017. [9](#), [25](#)
- [4] H. Werle, H. B. Measurement and calculation of the neutron leakage spectra of iron with a cf-252 source at the center. *SINBAD*, 1975. [19](#)
- [5] Fairhurst Agosta, R. E. Cálculo neutrónico detallado de haces y guías de neutrones del reactor ra-10, 2017. [24](#)

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la Comisión Nacional de Energía Atómica y a toda la comunidad del Instituto Balseiro por brindarme la posibilidad de desarrollarme académica y profesionalmente en instalaciones y con personal de primer nivel.

Por otro lado, quiero agradecer a Ariel Márquez quién me ayudó un montón para que este trabajo se realice, aportando ideas y guiándome de cerca durante todo el proceso. Gracias también a Nacho Márquez, que me ayudó y enseñó muchísimo, siempre dispuesto a resolver los problemas y motivándome a aprender cosas nuevas.

Infinitas gracias a Mikaela la persona que más me apoyó y ayudó a seguir cuando todo estaba cuesta arriba, tanto en lo académico como en lo personal, por su infinito aguante a la distancia. Sin ella definitivamente esto hubiese sido mucho más difícil. Gracias por confiar en mí, por siempre transmitirme la seguridad de que las cosas iban a salir bien y por motivar todos los proyectos futuros.

Del mismo modo quiero agradecer a mi familia por su apoyo, especialmente a mi mamá que es la persona que primero apostó a este proyecto, puedo decir que le debo este logro y que nunca me olvido de que “a veces hay que dejar lo bueno para conseguir lo mejor”.

Quiero agradecer a todos mis amigos de Oberá, con quienes empezó este desafío, especialmente a Jonathan Kraus, Paula Delgado y José Szychowski. Ejemplares personas y amigos que me motivaron e impulsaron a buscar este sueño.

Finalmente quiero agradecer también a la gente que me dejó el paso por el Instituto, mis más grandes amigos y magníficas personas con las que compartimos 3 años intensos: Ezequiel Giulio, Nicolás Sosa, Jonás Narváez y Norberto Schmidt. Sin el acompañamiento y apoyo de este hermoso grupo de personas, esto no hubiese sido posible.

