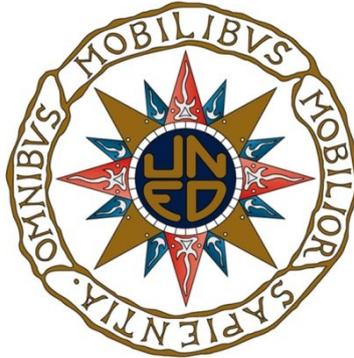


UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A  
DISTANCIA



*Trabajo de Fin de Máster en Investigación en Tecnologías Industriales*

**CARACTERIZACIÓN DE LA  
PISCINA DE ALMACENAMIENTO DE  
FUENTES NEUTRÓNICAS DEL  
LABORATORIO DE PATRONES  
NEUTRÓNICOS, POR MEDIO DE  
TÉCNICAS MONTECARLO**

Xandra Campo Blanco

Departamento de Ingeniería energética

E. T. S. Ingenieros Industriales

2013





## **Caracterización de la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas del Laboratorio de Patrones Neutrónicos, por medio de técnicas Montecarlo**

Trabajo de fin de master presentado por Xandra Campo Blanco para optar al Título de Máster en Investigación en Tecnologías Industriales, siendo tutor del mismo el doctor D. Javier Sanz Gozalo y siendo Miguel Embid Segura tutor por parte del CIEMAT.

Vº Bº del Tutor:

Alumno:

Dr. D. Javier Sanz Gozalo

D. Xandra Campo Blanco



**CARACTERIZACIÓN DE LA PISCINA DE ALMACENAMIENTO DE  
FUENTES NEUTRÓNICAS DEL LABORATORIO DE PATRONES  
NEUTRÓNICOS, POR MEDIO DE TÉCNICAS MONTECARLO**

(a rellenar por el tribunal calificador)

**TRIBUNAL CALIFICADOR**

PRESIDENTE:

VOCAL:

SECRETARIO:

FECHA DEFENSA:

CALIFICACIÓN:

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo:

Fdo:

Fdo:

PALABRAS CLAVE: CLAVES EN PROPIEDADES

CÓDIGOS UNESCO:

--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--





## MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

### E.T.S. INGENIEROS INDUSTRIALES

#### TÍTULO:

Caracterización de la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas del Laboratorio de Patrones Neutrónicos, por medio de técnicas Montecarlo

#### AUTOR:

Xandra Campo Blanco

#### TUTOR ACADÉMICO:

Javier Sanz Gozalo, Miguel Embid Segura

#### RESUMEN:

El desarrollo de materiales resistentes al daño por irradiación es uno de los campos abiertos más importantes en el diseño de instalaciones experimentales y en plantas conceptuales nucleoelectricas de fusión. El Laboratorio de Patrones Neutrónicos es una instalación que pretende colaborar en este desarrollo facilitando la irradiación neutrónica de materiales en su piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas de calibración. Para ello, es fundamental que la propia piscina esté bien caracterizada respecto a la fluencia y espectros neutrónicos presentes en el interior de la misma debido a la presencia de dichas fuentes. En este estudio, se presenta un resumen de las principales características de esta instalación y se lleva a cabo la caracterización de la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas. Finalmente, se muestra cómo se puede aplicar los resultados obtenidos en la caracterización para la irradiación neutrónica de materiales.

#### PALABRAS CLAVE:

Caracterización de instalaciones de irradiación, fuentes neutrónicas, daño por irradiación.

**ABSTRACT:**

The development of materials resistant to radiation damage is one of the most important open fields in the design of experimental fusion nuclear power plant facilities. Neutron Standards Laboratory is a facility that aims to contribute to this development by permitting neutron irradiation of materials in its neutron calibration sources storage pool. In order to do this, it is essential that the pool itself is well characterized with respect to neutron fluence and spectra found inside the pool due to the presence of these sources. In this document, we present a summary of the main features of this facility and carry out the characterization of the neutron sources storage pool. Finally, we show how to apply the results obtained in this characterization for neutron irradiation of materials.

**KEYWORDS:**

Irradiation facilities characterization, neutron sources, irradiation damage.

*Agradecimientos*

A *Miguel Embid Segura*, porque sin él este proyecto no hubiese sido posible, y a *Pablo Jimeno Romero*, por el inestimable apoyo durante la realización del mismo

# Índice

Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Alcance.....	2
Capítulo 2. Metodología de trabajo .....	4
2.1 Fase I: Planteamiento .....	5
2.2 Fase II: Modelización.....	5
2.3 Fase III: Validación.....	6
2.4 Fase IV: Caracterización .....	6
2.5 Fase V: Conclusión .....	6
Capítulo 3. Planteamiento.....	8
3.1 Laboratorio de Patrones Neutrónicos.....	8
3.1.1 Inventario de material radiactivo .....	8
3.1.2 Descripción de la instalación .....	9
3.1.3 Blindajes biológicos.....	11
3.2 Caracterización de fuentes neutrónicas .....	12
3.3 Herramientas de software.....	13
3.3.1 MCNPX v27e.....	13
3.3.2 VisEd v22S .....	14
3.3.3 Wolfram Mathematica 9 .....	14
Capítulo 4. Modelización.....	15
4.1 Geometría.....	16
4.1.1 Edificio.....	16
4.1.2 Piscina.....	19
4.1.3 Almacén de fuentes.....	22
4.1.4 Tapa.....	23
4.1.5 Lanzadera .....	26
4.2 Materiales .....	27
4.2.1 Acero.....	27

4.2.2	Agua.....	27
4.2.3	Polietileno.....	27
4.2.4	Aire.....	28
4.2.5	Hormigón.....	28
4.2.6	Aluminio.....	28
4.3	Tratamiento físico.....	29
4.4	Fuente.....	29
4.4.1	Disposición de las fuentes.....	30
4.4.2	Distribución energética de las fuentes.....	32
Capítulo 5.	Validación.....	34
5.1	Resultados del ES.....	35
5.2	Adaptación del modelo al ES.....	37
5.2.1	Geometría.....	37
5.2.2	Fuente.....	37
5.2.3	Tallies.....	39
5.2.4	Reducción de varianza y miscelánea.....	42
5.3	Primera serie de simulaciones.....	43
5.3.1	Opciones de simulación y objetivos.....	43
5.3.2	Resultados.....	43
5.3.3	Análisis.....	46
5.3.4	Conclusiones.....	47
5.4	Segunda serie de simulaciones.....	47
5.4.1	Opciones de simulación y objetivos.....	47
5.4.2	Resultados.....	48
5.4.3	Análisis.....	51
5.4.4	Conclusiones.....	51
Capítulo 6.	Caracterización.....	52
6.1	Adaptación del modelo.....	52
6.1.1	Geometría.....	52
6.1.2	Fuente.....	55
6.1.3	Tallies.....	56

6.1.4	Reducción de varianza y miscelánea .....	57
6.2	Simulaciones .....	57
6.3	Distribución tridimensional de fluencia neutrónica .....	58
6.4	Análisis preliminar .....	61
6.4.1	Representación tabular de resultados .....	61
6.4.2	Representación gráfica de resultados .....	61
6.4.3	Análisis preliminar del espectro neutrónico .....	62
6.4.4	Desarrollo de un modelo de interacción de los neutrones con la materia....	65
6.5	Distribución de fluencia neutrónica a lo ancho de la piscina .....	67
6.5.1	Efecto de la distancia a las fuentes en la fluencia neutrónica .....	67
6.5.2	Efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico .....	73
6.6	Distribución de fluencia neutrónica a lo largo de la piscina .....	76
6.6.1	Efecto de la distancia a las fuentes en la fluencia neutrónica .....	76
6.6.2	Efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico .....	82
6.7	Distribución de fluencia neutrónica a lo alto de la piscina .....	87
6.7.1	Efecto de la distancia a las fuentes en la fluencia neutrónica .....	87
6.7.2	Efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico .....	88
Capítulo 7.	Ejemplo de aplicación a la irradiación de materiales.....	91
Capítulo 8.	Conclusiones .....	93
Capítulo 9.	Referencias.....	100
Capítulo 10.	Anexos.....	102
10.1	Anexo I: Input de MCNP, modelización de la geometría .....	102
10.2	Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales.....	105
10.3	Anexo III: Input de MCNP, modelización del tratamiento físico .....	106
10.4	Anexo IV: Input de MCNP, modelización de las fuentes .....	106
10.5	Anexo V: Input de MCNP, geometría para la validación.....	108
10.6	Anexo VI: Input de MCNP, término fuente para la validación.....	109
10.7	Anexo VII: Input de MCNP, detectores puntuales para la validación .....	110
10.8	Anexo VIII: Input de MCNP, miscelánea para la validación.....	111
10.9	Anexo IX: Input de MCNP, mesh tallies para la caracterización.....	111
10.10	Anexo X: Input de MCNP, tallies para la caracterización .....	112

## Listado de Figuras

Figura 2.1: Metodología de trabajo seguida para el desarrollo del estudio. ....	4
Figura 3.1: Plano de la instalación. ....	9
Figura 3.2: Sistema automatizado de manipulación de las fuentes neutrónicas de calibración. ....	10
Figura 4.1: Disposición y dimensiones del LPN (planta). ....	16
Figura 4.2: Detalle de la disposición del LPN en el modelo (planta). ....	17
Figura 4.3: Disposición y dimensiones del LPN (alzado). ....	17
Figura 4.4: Detalle de la disposición del LPN en el modelo (alzado). ....	18
Figura 4.5: Disposición y dimensiones del LPN (alzado). ....	18
Figura 4.6: Detalle de la disposición del LPN en el modelo (alzado). ....	19
Figura 4.7: Disposición y dimensiones de la piscina (alzado). ....	20
Figura 4.8: Detalle de la disposición de la piscina en el modelo (alzado). ....	20
Figura 4.9: Detalle de la disposición de la piscina en el modelo (alzado). ....	21
Figura 4.10: Detalle de la disposición de la piscina en el modelo (planta) ....	21
Figura 4.11: Disposición y dimensiones del almacén de fuentes (alzado). ....	22
Figura 4.12: Detalle de la disposición del almacén de fuentes en el modelo (alzado). ....	22
Figura 4.13: Disposición y dimensiones del almacén de fuentes (planta). ....	23
Figura 4.14: Detalle de la disposición del almacén de fuentes en el modelo (planta). ....	23
Figura 4.15: Disposición y dimensiones de la tapa de la piscina (planta). Se muestra la muesca. ....	24
Figura 4.16: Disposición y dimensiones de la tapa de la piscina (planta). Se muestran los raíles. ....	24
Figura 4.17: Detalle de la disposición de la tapa de la piscina en el modelo (planta). Se muestran la muesca y el hueco para los raíles. ....	25
Figura 4.18: Disposición y dimensiones de la tapa de la piscina (alzado). Se muestran los raíles y el huelgo con el suelo. ....	25
Figura 4.19: Detalle de la disposición de la tapa de la piscina en el modelo (alzado). Se muestran la muesca, el hueco para los raíles y el detalle del huelgo con el suelo. ....	25
Figura 4.20: Detalle de la disposición de la lanzadera en el modelo (alzado). ....	26

Figura 4.21: Disposición de las fuentes de calibración en el almacén de fuentes (alzado).	30
Figura 4.22: Disposición de las fuentes de calibración en el modelo (alzado).	30
Figura 4.23: Disposición de las fuentes de calibración en el almacén de fuentes (planta).	31
Figura 4.24: Disposición de las fuentes de calibración en modelo (planta).	31
Figura 5.1: Localización de los detectores dentro del búnker.	36
Figura 5.2: Localización de los detectores dentro del búnker.	36
Figura 5.3: Posición de las fuentes en el modelo para la validación (planta).	38
Figura 5.4: Posición de las fuentes en el modelo para la validación (alzado).	38
Figura 5.5: Disposición relativa de los sistemas de referencia usados en el ES (rojo) y en el modelo (verde).	40
Figura 5.6: Posiciones de los detectores en el laboratorio en el ES y en el modelo.	41
Figura 5.7: Tasas de dosis debidas a neutrones de la primera serie de simulaciones para la validación.	45
Figura 5.8: Tasas de dosis debidas a fotones de la primera serie de simulaciones para la validación.	45
Figura 5.9: Tasas de dosis debidas a neutrones de la segunda serie de simulaciones para la validación.	49
Figura 5.10: Tasas de dosis debidas a fotones de la segunda serie de simulaciones para la validación.	49
Figura 6.1: Disposición de las celdas detectoras en el modelo (planta).	54
Figura 6.2: Disposición de las celdas detectoras en el modelo (alzado).	54
Figura 6.3: Posiciones del almacén de fuentes (planta).	55
Figura 6.4: Posición de las fuentes (alzado).	55
Figura 6.5: Mallado de los mesh tallies implementados en el modelo.	56
Figura 6.6: Distribución de la fluencia neutrónica en la zona de irradiación de la piscina, corte según el plano $z = -98$ cm.	59
Figura 6.7: Distribución de la fluencia neutrónica en la zona de irradiación de la piscina, corte según el plano $x = 0$ .	60
Figura 6.8: Distribución de la fluencia neutrónica en la zona de irradiación de la piscina, corte según el plano $y = 29.5$ cm.	60
Figura 6.9: Presentación tabular de los resultados, tal y como se muestran en el output de MCNPX.	62

Figura 6.10: Espectro neutrónico en la celda 92.....	63
Figura 6.11: Espectros neutrónicos de referencia de las fuentes de $^{252}\text{Cf}$ y de $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ . .....	63
Figura 6.12: Probabilidades de interacción de un neutrón.....	65
Figura 6.13: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de $^{252}\text{Cf}$ a lo ancho de la piscina. ....	68
Figura 6.14: Ajustes realizados de los puntos experimentales para la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina. ....	70
Figura 6.15: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de $^{252}\text{Cf}$ a lo ancho de la piscina, debida a la propagación en un medio material moderador. ....	72
Figura 6.16: Variación del espectro neutrónico a lo ancho de la piscina (dimensión x). ..	74
Figura 6.17: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de $^{252}\text{Cf}$ a lo largo de la piscina.....	77
Figura 6.18: Ajustes realizados de los puntos experimentales para la distribución de la fluencia a lo largo de la piscina.....	79
Figura 6.19: Variación del espectro neutrónico a lo largo de la piscina (dimensión y). ...	83
Figura 6.20: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de $^{252}\text{Cf}$ a lo alto de la piscina. ....	89
Figura 6.21: Ajustes realizados de los puntos experimentales para la distribución de la fluencia a lo alto de la piscina.....	90
Figura 6.22: Variación del espectro neutrónico a lo alto de la piscina (dimensión z). .....	90

## Listado de Tablas

Tabla 4-1: Composición del acero. ....	27
Tabla 4-2: Composición del agua. ....	27
Tabla 4-3: Composición del polietileno.....	27
Tabla 4-4: Composición del aire.....	28
Tabla 4-5: Composición del hormigón. ....	28
Tabla 4-6: Especificaciones técnicas de las fuentes de calibración del LPN. ....	29
Tabla 4-7: Coordenadas de las posibles posiciones de las fuentes en el almacén de fuentes.....	31
Tabla 4-8: Distribución energética de la intensidad de la fuente de $^{252}\text{Cf}$ .....	32

Tabla 4-9: Distribución energética de la intensidad de la fuente de $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ .....	33
Tabla 5-1: Coordenadas de los detectores dentro del bunker. ....	35
Tabla 5-2: Tasa de dosis dentro del búnker con la tapa de blindaje cerrada ( $\mu\text{Sv/h}$ ). ....	35
Tabla 5-3: Posiciones de las fuentes en el modelo para la validación. ....	38
Tabla 5-4: Coordenadas de los detectores en el ES y en el modelo. ....	40
Tabla 5-5: Opciones de simulación para la primera serie de simulaciones de validación del modelo.....	44
Tabla 5-6: Primera serie de simulaciones para la validación del modelo.....	44
Tabla 5-7: Tasas de dosis debidas a neutrones y fotones de la primera serie de simulaciones para la validación. ....	46
Tabla 5-8: Opciones de simulación para la segunda serie de simulaciones de validación del modelo.....	48
Tabla 5-9: Segunda serie de simulaciones para la validación del modelo.....	48
Tabla 5-10: Tasas de dosis debidas a neutrones y fotones de la segunda serie de simulaciones para la validación. ....	50
Tabla 6-1: Posición de la celdas detectoras en el modelo.....	53
Tabla 6-2: Posición, tasa de emisión actual e intensidad relativa actual de las fuentes para la caracterización. ....	55
Tabla 6-3: Simulaciones realizadas para la caracterización. ....	58
Tabla 6-4: Opciones de simulación comunes a todas las simulaciones para la caracterización. ....	58
Tabla 6-5: Fluencia neutrónica total, característica y térmica para las celdas detectoras lo largo del eje x.....	67
Tabla 6-6: Fluencia neutrónica total, característica y térmica para las celdas detectoras lo largo del eje y.....	77
Tabla 6-7: Fluencia neutrónica total, característica y térmica para las celdas detectoras lo largo del eje z.....	89
Tabla 8-1: Resumen de los resultados obtenidos para la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina. ....	96
Tabla 8-2: Resumen de los resultados obtenidos para la distribución de la fluencia a lo largo de la piscina. ....	97
Tabla 8-3: Resumen de los resultados obtenidos para la distribución de la fluencia a lo alto de la piscina.....	99

# Capítulo 1.

## Introducción

### *1.1 Antecedentes*

El desarrollo de materiales resistentes al daño por irradiación es uno de los campos abiertos más importantes en el diseño de instalaciones experimentales y en plantas conceptuales nucleoelectricas de fusión. Numerosas instalaciones experimentales internacionales están trabajando en este tema, como por ejemplo las instalaciones IFMIF o IFMIF EVEDA, en las cuales la UNED [1] y el Laboratorio Nacional de Fusión (CIEMAT) están colaborando.

Sin embargo, en España no existe ninguna instalación con fuentes neutrónicas capaces de abordar este problema, así como otros problemas, como son el poder calibrar detectores de neutrones que nos sirvan para verificar dicha seguridad, o tener un laboratorio de dosimetría, entre otras muchas carencias. Recientemente el CIEMAT ha puesto en marcha una instalación totalmente novedosa en España: el Laboratorio de Patrones Neutrónicos [4] (en adelante LPN).

En esta instalación se dispone de varias fuentes neutrónicas de distintos tipos y su objetivo es el desarrollo de patrones neutrónicos, de manera que en España se pueda contar con un laboratorio de referencia propio en este campo.

En este contexto, ambas instalaciones, el Laboratorio Nacional de Fusión y el Laboratorio de Patrones Neutrónicos, prevén colaborar para la realización de pruebas de irradiación de materiales para plantas nucleoelectricas de fusión en la piscina del LPN. Como ya se mencionó anteriormente, dada la importancia del desarrollo y análisis de nuevos materiales, el uso de esta nueva instalación suscita un gran interés.

Actualmente el LPN está en la fase de puesta a punto, con lo que es necesario y fundamental, para un buen aprovechamiento de la instalación, realizar la caracterización de la misma. Para realizar la memoria y documentación preceptiva para la apertura de la instalación se han realizado algunos cálculos de caracterización del bunker del laboratorio.

Uno de los objetivos de la instalación se centra en la evaluación de los materiales que se van a usar en el desarrollo de plantas nucleoelectricas de fusión. Parte de este estudio se va a realizar en el LPN y por ello es muy importante tener bien caracterizada la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas de calibración del LPN.

## ***1.2 Objetivos***

El objetivo del presente documento es la caracterización de la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas de calibración del LPN mediante el uso de técnicas Montecarlo.

Como consecuencia de la presencia de las fuentes neutrónicas de calibración en el interior de la piscina, se produce un campo mixto de neutrones y fotones que se propagan por el interior de la misma, y que afectarán a los materiales que se introduzcan en la misma para testear el daño por irradiación neutrónica.

Por tanto, en la caracterización, habrá de prestarse especial atención a dos magnitudes del campo neutrónico:

- Fluencia neutrónica del campo.
- Espectro neutrónico del campo.

Atendiendo a estos aspectos, la caracterización de la piscina de almacenamiento consistirá en determinar:

- La distribución tridimensional de la fluencia neutrónica en el interior de la piscina.
- Variación del espectro neutrónico en el interior de la piscina.

Esta caracterización se llevará a cabo mediante simulaciones usando el código de transporte MCNP. En un estudio más extenso, y que no entra dentro del alcance de este documento, se podría analizar la influencia en estos resultados de las distintas posiciones que pueden ocupar las fuentes dentro de la piscina del LPN, y también se podría realizar una comprobación de los resultados obtenidos mediante una comparación experimental usando, por ejemplo, la técnica de activación de las láminas de oro.

## ***1.3 Alcance***

El alcance de las actividades que se desarrollan en este proyecto para la caracterización de la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas de calibración del LPN se dividirá en seis fases:

- **Fase I: Planteamiento**

En este apartado se van a realizar las siguientes tareas:

- Familiarización con la instalación: Descripción del LPN, del inventario radiactivo y de los blindajes presentes en el mismo.
- Familiarización con la caracterización de fuentes neutrónicas: Descripción de las magnitudes de interés en la caracterización de fuentes neutrónicas.
- Familiarización con MCNP: Introducción a MCNP, la herramienta de simulación que se utiliza para la modelización de la instalación.

- **Fase II: Modelización**

En este apartado se van a realizar las siguientes tareas:

- Modelización de la instalación: Modelización con MCNP de la geometría y los materiales que conforman el LPN.
- Modelización de la fuente: Modelización con MCNP de las fuentes de calibración presentes en la piscina del LPN.
- Modelización del tratamiento físico: Modelización de las condiciones físicas que se van a aplicar a las partículas transportadas por MCNP.

- **Fase III: Validación**

En este apartado se van a realizar las siguientes tareas:

- Modelización: Adaptación del modelo implementado a las condiciones del ES.
- Simulación: Cálculo de la tasa de dosis medida en distintos puntos de interés del LPN.
- Validación: Comparación de los resultados de la simulación con los especificados en el ES.

- **Fase IV: Caracterización**

En este apartado se van a realizar las siguientes tareas:

- Modelización: Adaptación del modelo a condiciones realistas actuales.
- Simulación: Cálculo de la fluencia neutrónica y de los espectros neutrónicos en el interior de la piscina.
- Análisis: Análisis de la variación de la fluencia y los espectros neutrónicos en el interior de la piscina en función de la distancia a las fuentes.

- **Fase V: Conclusión**

En este apartado se van a realizar las siguientes tareas:

- Aplicación a un caso práctico de irradiación de materiales.
- Conclusión: exposición de los aspectos más relevantes del estudio.

## Capítulo 2. Metodología de trabajo

En este capítulo se detalla la metodología de trabajo seguida para el desarrollo del estudio.

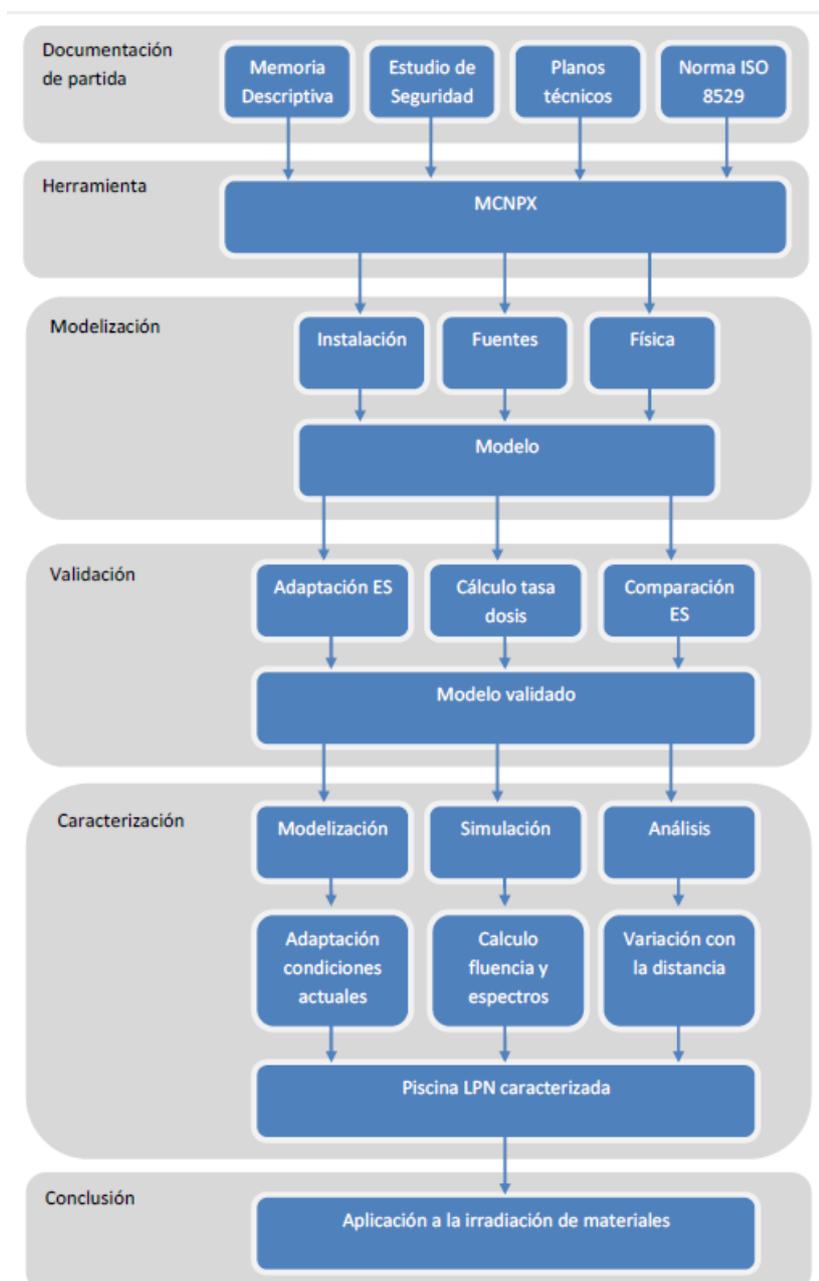


Figura 2.1: Metodología de trabajo seguida para el desarrollo del estudio.

## **2.1 Fase I: Planteamiento**

Inicialmente se cuenta con una documentación de partida: la *Memoria Descriptiva de la Instalación* [4], el *Estudio de Seguridad de la Instalación* (en adelante *ES*) [5], planos de la instalación ([25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32] y [33]) y diversos procedimientos ([6], [7], [8] y [9]).

En estos documentos se encuentra una descripción detallada de la instalación, así como de las fuentes radiactivas y de los diferentes blindajes presentes en la misma. A partir de ellos se lleva a cabo la *familiarización con la instalación*.

Por otro lado, se cuenta con diversos artículos ([2] y [3]) y normas internacionales ([10], [11] y [12]), en la que se encuentra una descripción de las características de las principales radiaciones neutrónicas de referencia y diferentes técnicas de caracterización, y que sirven como base para la *familiarización con la caracterización de fuentes neutrónicas* y para llevar a cabo la caracterización.

Así mismo se cuenta con la herramienta *MCNPX*, un código de transporte de radiación de tipo Monte Carlo y de propósito general diseñado para transportar diversos tipos de partículas en un amplio rango de energías, y que es la principal herramienta que se utiliza para la modelización y simulación del LPN. Este programa se complementa con una serie de manuales ([17], [18], [19] y [20]) a partir de los cuales se lleva a cabo la *familiarización con MCNPX*.

Por otro lado, se cuenta con otras herramientas de software, como *VISED* [22], software complementario de *MCNPX* y especializado en la visualización de los modelos implementados con *MCNPX*, y el *Wolfram Mathematica*, [23] un potente software de procesamiento de datos que se usa para la manipulación de los resultados proporcionados por *MCNPX*.

## **2.2 Fase II: Modelización**

A partir de los documentos mencionados anteriormente se obtienen los datos de partida necesarios que son introducidos en *MCNPX* para llevar a cabo la *modelización y simulación* de la *instalación del LPN* y del comportamiento de las *fuentes neutrónicas de calibración*.

En cuanto a la modelización, en esta fase se implementa un modelo básico lo suficientemente realista y lo suficientemente versátil como para que pueda ser fácilmente adaptado para su validación y su posterior utilización para la caracterización de la piscina del LPN, que es el objetivo último del presente estudio.

Así, la primera área importante de modelización será la *instalación* propiamente dicha, para lo cual se extrae de la documentación de partida datos tales como las dimensiones y los materiales de los diferentes componentes de la instalación, ya sean estructurales, blindajes o equipos.

La segunda área de modelización son las *fuentes neutrónicas* de calibración, para lo cual se extrae de la documentación de partida datos tales como las características técnicas de las fuentes (espectros de emisión o actividad) o como las condiciones bajo las cuales se almacenan y se utilizan las fuentes.

La tercera y última área del modelo básico es el *tratamiento físico* que van a recibir las partículas emitidas por las fuentes y transportadas por el código MCNPX, que son deducibles de los datos obtenidos anteriormente.

### **2.3 Fase III: Validación**

Una vez implementado el modelo del LPN, se ha de realizar es la validación del mismo, para comprobar que el modelo es adecuado y se puede utilizar para la caracterización.

La validación del modelo se va a llevar a cabo con un caso de referencia que se proporciona en el *ES* de la instalación, en el que se calculan las tasas de dosis neutrónicas y fotónicas en el interior del laboratorio cuando las fuentes se encuentran almacenadas en la piscina.

Por tanto, habrá de llevarse a cabo una *adaptación del modelo* a las condiciones especificadas en el *ES* de la instalación y de las fuentes, realizar las *simulaciones* necesarias para el cálculo de las tasas de dosis correspondientes mediante MCNPX y *comparar* los resultados proporcionados por el modelo con los especificados en el *ES*. Se establecerán unos criterios de validación cuyo cumplimiento determinará la validez del modelo.

### **2.4 Fase IV: Caracterización**

Sustentado por la validación, se puede proceder a utilizar el modelo implementado para llevar a cabo la caracterización del campo neutrónico generado por las fuentes de calibración en la piscina del LPN.

Para ello, habrá de realizarse una *adaptación del modelo* a las condiciones actuales de la instalación y de las fuentes y realizar las *simulaciones* necesarias para el cálculo de la fluencia y los espectros del campo neutrónico generado por las fuentes en el interior de la piscina del LPN mediante MCNPX.

Posteriormente, se *analizan* estos resultados, con apoyo en las herramientas de software descritas anteriormente, para determinar cómo varían la fluencia y los espectros del campo neutrónico generado en función de la distancia a las fuentes. Con este análisis quedará caracterizado el campo neutrónico en el interior de la piscina del LPN.

### **2.5 Fase V: Conclusión**

Con el campo neutrónico caracterizado, se puede mostrar un ejemplo sencillo de aplicación de la caracterización obtenida a un *caso práctico de irradiación de materiales* en el interior de la piscina, que es uno de los servicios que proporcionará el LPN, tal y

como se describió en el apartado *Antecedentes* al inicio de este documento. Con esto, el estudio queda concluido y se pueden presentar los aspectos más relevantes del mismo a modo de *conclusión*.

## Capítulo 3. Planteamiento

### 3.1 Laboratorio de Patrones Neutrónicos

El Laboratorio de Patrones Neutrónicos es una instalación radiactiva que cuenta con una sala de irradiación que alberga varias fuentes neutrónicas de referencia, en base a las cuales se podrán establecer los patrones nacionales de radiación neutrónica y dar una serie de servicios metrológicos, como son la calibración de equipos de medida neutrónica o la irradiación de detectores y materiales según procedimientos técnicos contrastados y aprobados en el marco de un Sistema de Calidad conforme a la *norma ISO-17025*.

#### 3.1.1 Inventario de material radiactivo

Este laboratorio utiliza exclusivamente fuentes encapsuladas, siguiendo las recomendaciones de la *norma ISO 2919*. Las fuentes encapsuladas utilizadas son de dos tipos diferentes:

- Fuentes de calibración o irradiación: son aquellas empleadas para los procedimientos de calibración o irradiación de equipos. Se almacenan en alojamientos dispuestos en el fondo de una piscina de almacenamiento y se manipulan mediante sistemas automatizados previstos a tal efecto. Las fuentes de calibración seleccionadas son una fuente de neutrones de  $^{252}\text{Cf}$  y una fuente de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ , ambas siguiendo las recomendaciones de la *norma ISO 8529*.
- Fuentes de verificación: son aquellas empleadas para la verificación de los equipos. Se almacenan en los propios contenedores de transporte y pueden manipularse manualmente mediante pinzas.

Consecuentemente con los objetivos expuestos en el apartado 1.2, las fuentes de interés en el presente estudio son las fuentes de calibración.

- Fuente de calibración con neutrones de  $^{252}\text{Cf}$ : El laboratorio utiliza una fuente encapsulada de  $^{252}\text{Cf}$  con un contenido total máximo de 1 mg de  $^{252}\text{Cf}$  equivalente a 20 GBq y equivalente a una tasa de emisión nominal de  $2,3 \cdot 10^9$  neutrones/segundo. La fuente de  $^{252}\text{Cf}$  se presenta en forma de cilindro macizo de unos 10 mm de longitud y 8 mm de diámetro con el californio disperso en una matriz cerámica, si bien sus dimensiones dependen de su actividad y del fabricante. La fisión espontánea del  $^{252}\text{Cf}$  es la responsable de la producción de los neutrones con un espectro energético similar al de fisión por neutrones térmicos.



### 3.1.2.1 Sala de irradiación o búnker

Se trata de una sala de dimensiones 9 m x 7,5 m en planta y 8 m en altura. En su interior, en el centro, se encuentra una pequeña piscina o almacén de fuentes de calibración de 1,5 m x 1 m y 1,69 m de profundidad máxima con una losa de cierre; también se dispone de los equipamientos de manejo automatizado de las fuentes (manipulador cartesiano y lanzadera), la bancada de irradiación y otros equipos de seguridad. En la sala se ubican los contenedores de las fuentes de verificación. Los muros tienen un espesor de 125 cm los muros y la cubierta de 60 cm.

Básicamente, un sistema automatizado (manipulador cartesiano y lanzadera, ver Figura 3.2) permite, tras la apertura de la tapa de la piscina, la elección de la fuente a emplear en la irradiación situada en el almacén de fuentes y su elevación hasta el punto de irradiación. Los equipos y materiales a irradiar se sitúan sobre la bancada y se enfrentan a la fuente que se dispone en el centro geométrico del búnker, a 4 m de altura.

La lanzadera es una estructura vertical de aluminio de 5.6 m unida a la bancada. Consta de dos guías y un carro, para posicionar la fuente dentro de su portafuente, que se lanza mediante la acción de un motor. Tiene por misión llevar la fuente de calibración desde la posición de lanzamiento en el fondeo de la piscina, hasta la posición de irradiación a 4 m de altura sobre el suelo; todo ello en el menor tiempo posible (menor de 1 segundo en su recorrido fuera del agua) para reducir el impacto del tránsito entre ambas posiciones en el conjunto de la irradiación.

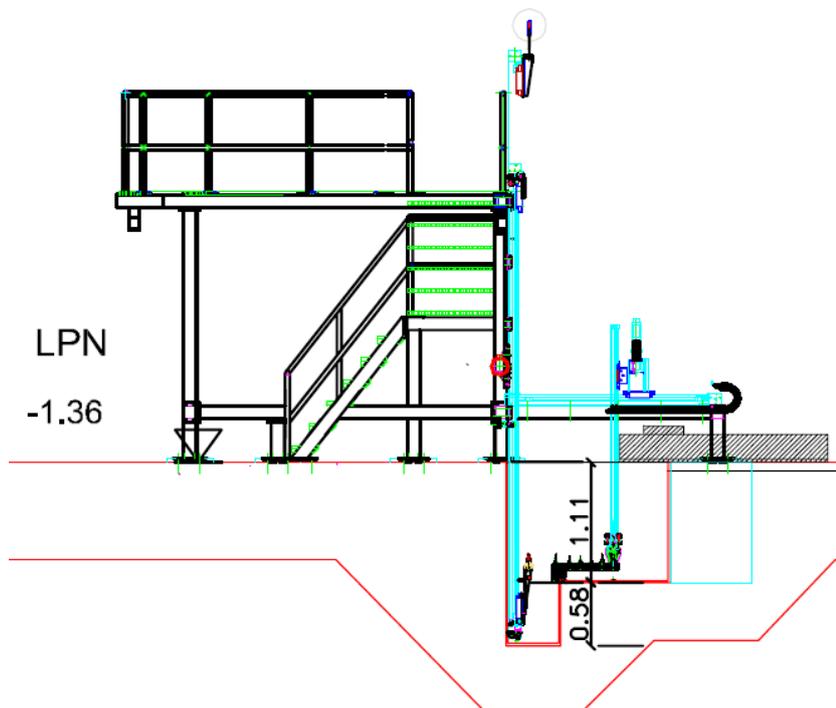


Figura 3.2: Sistema automatizado de manipulación de las fuentes neutrálicas de calibración.

### 3.1.2.2 Almacén de fuentes de calibración

Las fuentes se almacenan en el fondo de una piscina situada aproximadamente en el centro de la sala del búnker. Sobre su fondo se encuentra el almacén propiamente dicho con 12 posiciones alineadas para alojar las diferentes fuentes. Debido al diseño del portacápsula para la fuente limitante de  $^{252}\text{Cf}$  esta fuente sólo puede adoptar una posición en el almacén que coincide con el escalón que presenta la piscina, de tal modo que la distancia mínima a las paredes es de 0,5 m. En la zona que rodea al mástil de la lanzadera, la profundidad de la piscina es algo mayor para alojar la estructura la misma.

Las dimensiones de la piscina son de 1 m longitud y 1 m de anchura, y presenta dos niveles. El de mayor profundidad presenta una superficie de 1 m de anchura por 0,5 m de longitud y está situado a 1,68 m de profundidad desde el suelo del búnker. La otra superficie tiene igualmente 1 m de anchura por 1 m de longitud y está a una profundidad de 1,1 m bajo el nivel del suelo de la instalación.

La piscina de hormigón está recubierta en todas sus paredes y suelo por una placa de polietileno de 2 cm de espesor. La piscina se encuentra llena de agua hasta un nivel ligeramente por debajo del suelo para evitar derrames. Las fuentes se encuentran rodeadas y cubiertas por agua con una capa de espesor mínimo de 85 cm que actúa como blindaje neutrónico.

La piscina se cierra con una tapa de hormigón de 23 cm de espesor, junto con otros 2 cm de acero en su base con propósitos estructurales, que desliza sobre raíles. Esta losa tiene solapes de 20 cm. El huelgo entre dicha placa y el suelo del bunker es de 0.5 cm.

### 3.1.3 Blindajes biológicos

En la piscina, se emplea agua purificada tipo II (resistividad  $> 5 \text{ MOhm.cm}$ ) y las planchas de polietileno como blindaje neutrónico conjuntamente con una tapa que cubre la piscina de espesor adecuado para blindar fundamentalmente la radiación gamma de 2,2 MeV que se produce como consecuencia de la interacción de los neutrones con los átomos de hidrógeno del agua.

Los muros del búnker también actúan como blindaje biológico y son de hormigón armado ordinario con unas condiciones mínimas para la densidad y el contenido en hidrógeno, concretamente una densidad mínima de  $2,15 \text{ g/cm}^3$  y un contenido en hidrógeno de 0,5 % en peso como mínimo. Todos los muros del bunker se han diseñado para cumplir que en el exterior de los mismos las tasas de dosis están por debajo de  $0,5 \mu\text{Sv/h}$  cuando la fuente de máxima intensidad se encuentra en la posición de irradiación, momento en que dicha dosis es máxima.

### 3.2 Caracterización de fuentes neutrónicas

Tal y como se expuso en el apartado 1.2, el objetivo de este documento es la caracterización de la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas de calibración del LPN, lo cual consiste básicamente en determinar la distribución espacial y energética de la fluencia neutrónica presente en el interior de la piscina.

Esta fluencia se debe a la presencia de las dos fuentes neutrónicas de calibración presentes en el interior de la misma, por tanto, para realizar la caracterización es fundamental que las fuentes propiamente dichas estén bien caracterizadas en términos de tasa de emisión de neutrones, anisotropía de la emisión y la fluencia espectral de los neutrones emitidos.

Atendiendo a estos aspectos, las magnitudes de interés para la caracterización de las fuentes son:

- Tasa de emisión la fuente,  $B$  ( $s^{-1}$ ): representa el número de neutrones emitidos por la fuente en un ángulo sólido de  $4\pi$  srad por unidad de tiempo.
- Anisotropía de la fuente,  $F_I(\theta)$ : factor adimensional que mide la falta de isotropía de la fuente, y qué es necesario tener en cuenta en caso de que las fuentes no sean esféricas.
- Tasa de emisión espectral,  $B_E$  ( $s^{-1} eV^{-1}$ ), de los neutrones emitidos por la fuente: es el espectro o la distribución energética de los neutrones emitidos por la fuente, y su conocimiento para cada fuente es de importancia esencial dado que la interacción de los neutrones con la materia depende de su energía.

Las fuentes neutrónicas de calibración del LPN son fuentes neutrónicas de referencia según la *norma ISO 8529*, encontrándose estas magnitudes de referencia especificadas en esta norma para cada una de las fuentes.

Coherentemente, las magnitudes de interés para la caracterización de la piscina son:

- Fluencia neutrónica,  $\Phi$  ( $cm^{-2}$ ): representa el número de neutrones por unidad de área que se encuentran en un punto determinado debido a la distribución de fuentes presentes.
- Fluencia espectral,  $\Phi_E$  ( $cm^{-2} eV^{-1}$ ): es el espectro o la distribución energética de dichos neutrones, que dependerá sensiblemente de la tasa de emisión espectral de la fuente y de la interacción de los neutrones con el medio en el que se propagan.

Estas magnitudes se determinarán a partir de las magnitudes de referencia y los datos de la instalación mediante la utilización del código MCNPX.

### ***3.3 Herramientas de software***

#### **3.3.1 MCNPX v27e**

MCNP es un código de Monte Carlo de N - Partículas de propósito general que puede ser utilizado para el transporte de neutrones, fotones, electrones o neutrones o el transporte acoplado de neutrones, fotones y electrones en un amplio rango de energías. Fue desarrollado por el Laboratorio Nacional de los Álamos y fue lanzado por primera vez en 1977.

Actualmente es el código más utilizado para aplicaciones tales como la física de reactores, blindajes, criticidad, tratamiento de residuos nucleare, tratamiento de imágenes médicas y muchas otras áreas relacionadas.

Las características que hacen de MCNP un código muy completo y versátil son las siguientes:

- El tratamiento tridimensional de la geometría, a través de celdas especificadas por el usuario a partir de superficies sencillas, y que permiten modelizar prácticamente cualquier configuración de materiales.
- El uso de secciones eficaces continuas en energía y en dependencia temporal, contando con una amplia colección de librerías de secciones eficaces que, combinado con modelos físicos detallados, le permite simular prácticamente cualquier interacción que puedan sufrir las distintas partículas.
- La capacidad para modelar una gran variedad de fuentes, incluyendo criticidad.
- Puede proporcionar una gran variedad de resultados o tallies, totalmente personalizables por el usuario.
- Permite el uso de múltiples técnicas de reducción de varianza para mejorar la estadística de los resultados o reducir el tiempo de cálculo necesario para obtenerlos.
- Permite la visualización de la geometría o de los resultados obtenidos mediante paquetes incluidos en el propio código.

MCNPX es una extensión de MCNP para el transporte de muchos tipos de partículas y en rangos más amplios de energías, incluyendo la mejora de los modelos de simulación física, la formulación de técnicas de reducción de varianza y análisis de datos adicionales, la inclusión de experimentos de referencia, el desarrollo de código determinista y mejoras en el código de la transmutación.

En el presente estudio se utiliza la versión *MCNPX v27e*, y las librerías de secciones eficaces *ENDF/B-VI* y *ENDF/B-VII*.

### **3.3.2 VisEd v22S**

Visual Editor es un software desarrollado para facilitar la visualización de geometrías y la creación de los ficheros de entrada MCNP. La primera versión fue lanzada en 1997 y el código de Visual Editor pasó a formar parte del paquete de MCNP con el lanzamiento de la versión 5 de MCNP, y en 2007 se adaptó para trabajar con MCNPX.

Visual Editor permite configurar fácilmente y modificar el punto de vista de la geometría MCNP / MCNPX y determinar información sobre el modelo directamente desde la ventana de dibujo. Visual Editor también permite la creación interactiva de ficheros de entrada con la ayuda de vistas dinámicas de secciones del modelo. El fichero de entrada también se pueden crear en un editor externo o directamente escribiendo en la ventana de entrada. Otras funciones adicionales incluyen:

- Dos visualizaciones simultáneas 2D de la geometría y visualización opcional dinámica en 3D.
- Capacidad para crear dinámicamente una geometría mientras se está viendo cómo evoluciona.
- Visualizaciones dinámicas de fuentes, tracks de partículas, secciones eficaces, y tallies.
- Importación y conversión de un archivo CAD a un fichero de entrada MCNP / MCNPX.

La versión de Visual Editor utilizado en este proyecto está supervisado 22S.

### **3.3.3 Wolfram Mathematica 9**

Mathematica es un potente sistema totalmente integrado para la computación técnica. Entre las posibilidades que ofrece son:

- Interfaz frontal interactivo con interfaz de cuaderno.
- Cálculos numéricos de gran precisión.
- Manipulación simbólica, funciones especiales.
- Gráficos.

Mathematica permite desarrollar soluciones a problemas complejos que combinan derivaciones simbólicas, cálculos numéricos y representaciones gráficas, y todo ello en un mismo documento interactivo, facilitando la concentración en el desarrollo conceptual y la visualización de los detalles más que el álgebra o la programación estrictas.

La versión de Mathematica utilizada en este estudio es la *Wolfram Mathematica 9*.

## Capítulo 4. Modelización

En este capítulo se describe el proceso seguido para la modelización del LPN en MCNP. Este modelo se va a utilizar posteriormente para dos funciones:

- Realizar una validación del mismo con el *ES* de la instalación.
- Realizar la caracterización de la piscina del LPN.

El modelo abarca dos aéreas fundamentales del LPN:

- *Piscina del LPN*, que incluye la piscina propiamente dicha, con su blindaje de polietileno, su tapa y el equipamiento que se encuentra en su interior (almacén de fuentes, fuentes y lanzadera. Esta parte es de extrema importancia para la caracterización.
- *Edificio del LPN*, es el entorno que rodea a la piscina, en el que se incluye el edificio que contiene la piscina del LPN. Su importancia no es tan fundamental a la hora de la caracterización, pero ha de incluirse debido a que es el entorno que rodea a la piscina y a que es necesario para realizar la validación del modelo.

Para la utilización del código MCNPX, lo primero que se debe hacer es crear un fichero de entrada, llamado normalmente *input*. Este archivo contiene de manera estructurada información sobre la geometría, los materiales utilizados, las secciones eficaces a utilizar, la localización, características y tipo de fuente, los resultados o *tallies* que se quiere que devuelva el código y cualquier técnica de reducción de varianza que se desee utilizar.

Posteriormente se ejecuta el código proporcionándole el fichero de entrada. MCNPX leerá las instrucciones del *input*, realizará la simulación y creará un nuevo fichero de salida o *output*, en el que se recogen los resultados generados por cada tally, los errores producidos y algunas tablas que resumen el proceso de simulación.

Para la modelización, las partes fundamentales del *input* a desarrollar son: la geometría, los materiales, el tratamiento físico y el término fuente.

Las otras partes del *input* serán relevantes a la hora de llevar a cabo la validación y la caracterización, y habrán de definirse en función del objetivo concreto de la simulación que se esté realizando.

## 4.1 Geometría

### 4.1.1 Edificio

Partiendo de los planos generales del edificio, el volumen general del edificio del LPN se modeliza mediante dos paralelepípedos concéntricos, entre los cuales se encontrará el hormigón que conforma las paredes, suelo y techo, y en el interior del paralelepípedo interior se encontrará el aire del laboratorio.

Se definen superficies de exclusión, también paralelepípedos, que se utilizan para eliminar los volúmenes de hormigón que no interesen en el subsuelo del laboratorio, definiendo así las formas recortadas del hormigón subterráneo del edificio del laboratorio.

En el interior del paralelepípedo de aire y sobre el suelo se encontrará la tapa de la piscina, y por debajo de ella, en el hormigón entre los dos paralelepípedos se encontrará la piscina propiamente dicha.

La disposición general y dimensiones del edificio del LPN se observan en la Figura 4.1, Figura 4.3 y Figura 4.5. Una visualización del modelo del edificio del LPN se muestra en la Figura 4.2, Figura 4.4 y Figura 4.6. Las celdas y superficies correspondientes al edificio del LPN se muestran en el *Anexo I: Input de MCNP, modelización de la geometría*.

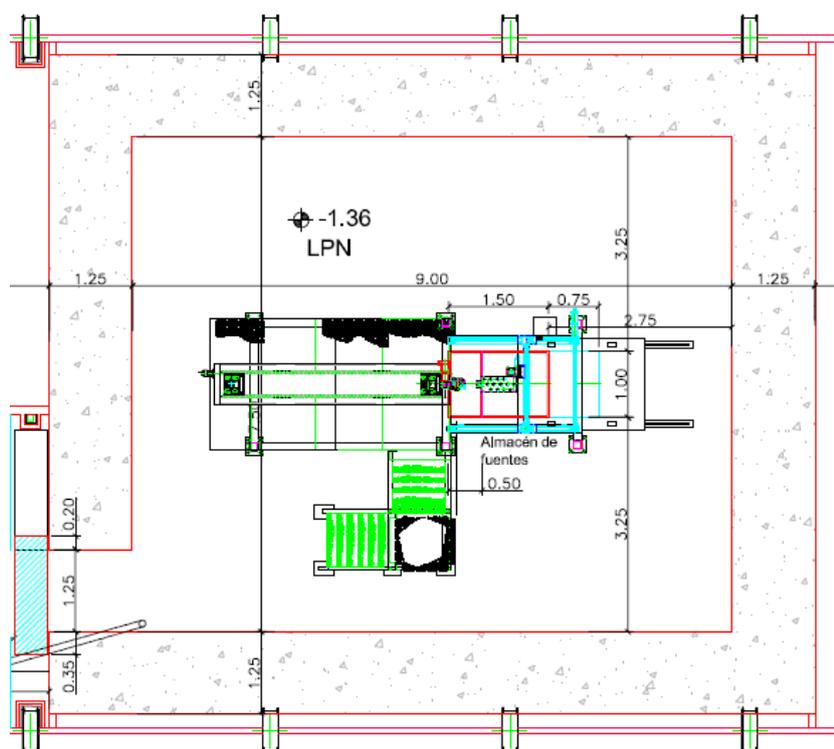


Figura 4.1: Disposición y dimensiones del LPN (planta).

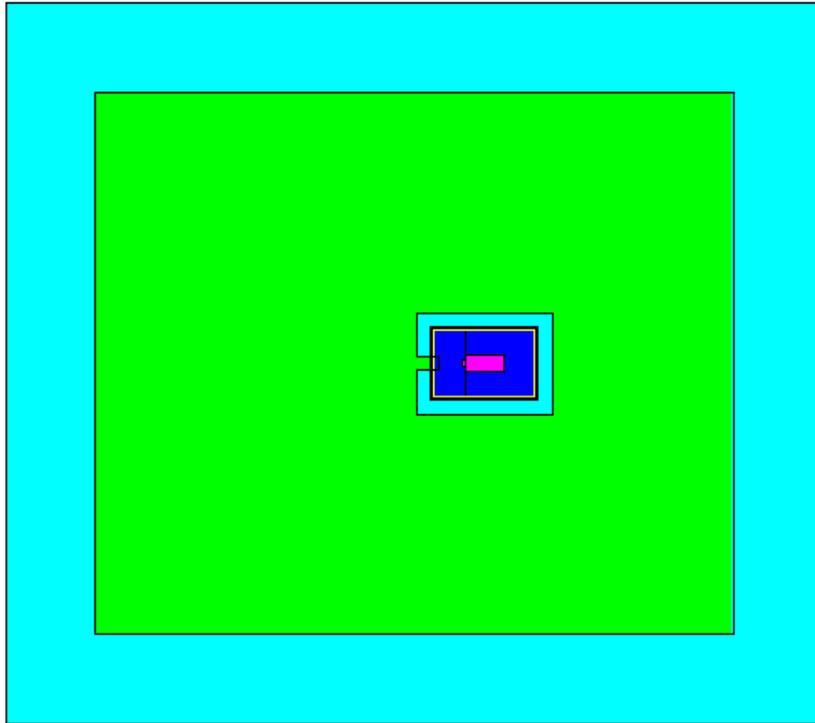


Figura 4.2: Detalle de la disposición del LPN en el modelo (planta).

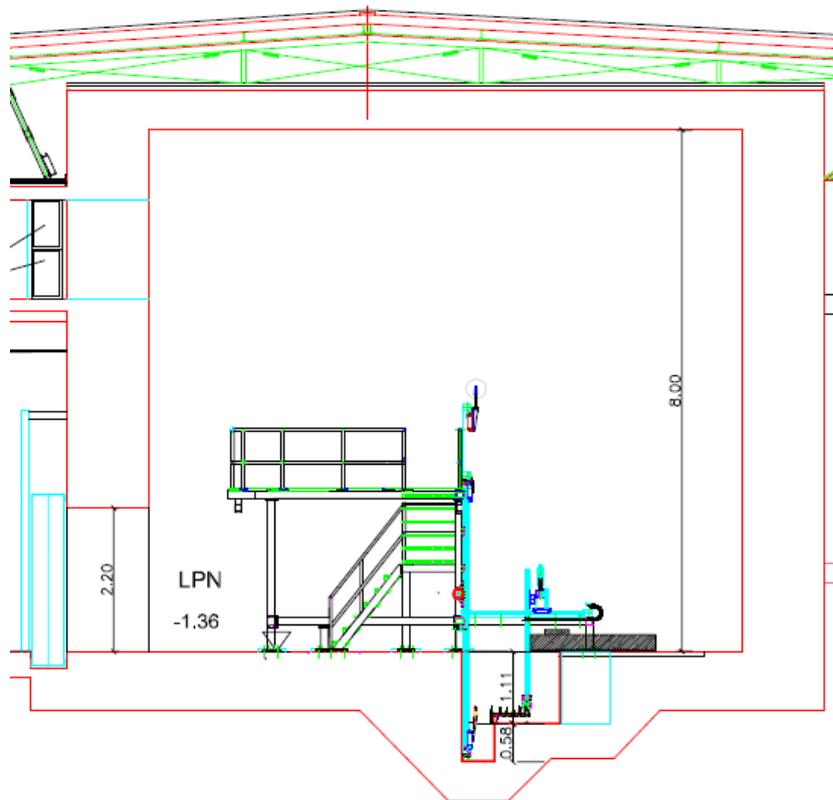


Figura 4.3: Disposición y dimensiones del LPN (alzado).

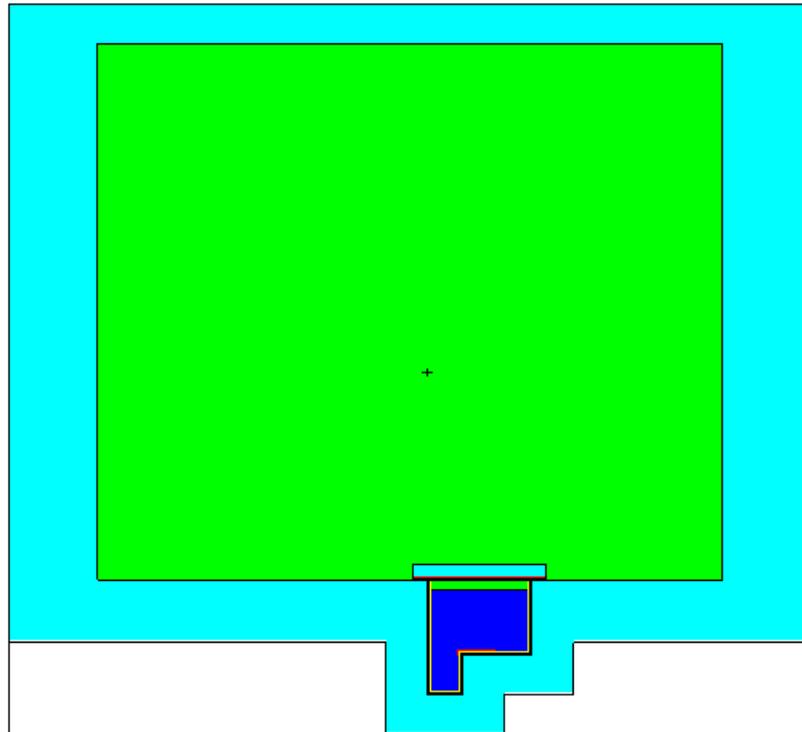


Figura 4.4: Detalle de la disposición del LPN en el modelo (alzado).

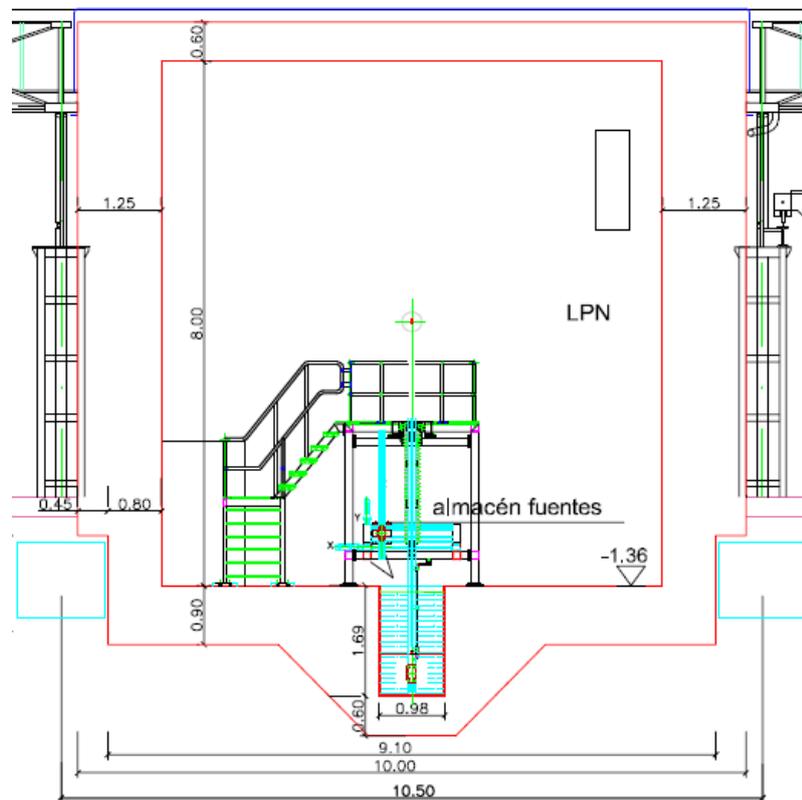


Figura 4.5: Disposición y dimensiones del LPN (alzado).

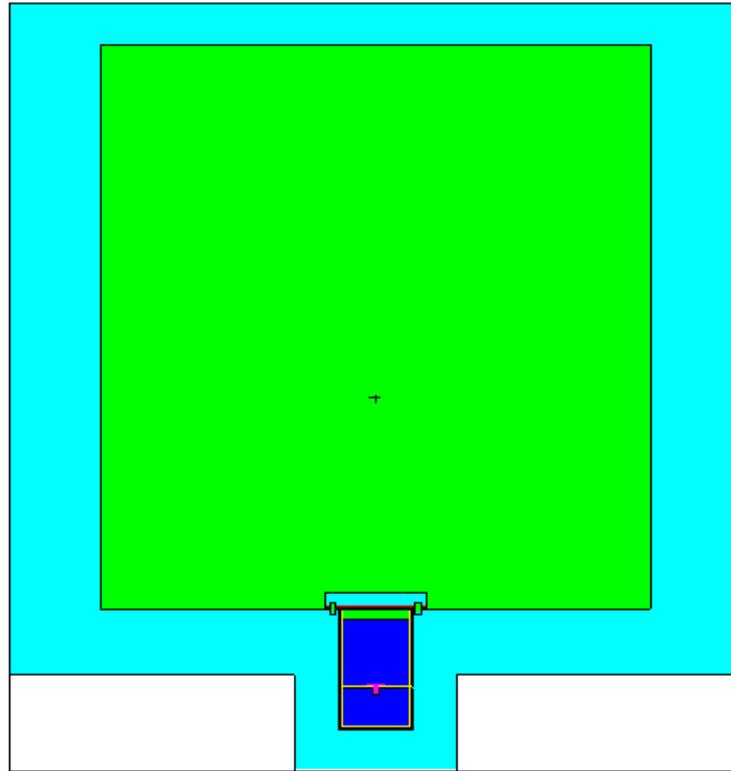


Figura 4.6: Detalle de la disposición del LPN en el modelo (alzado).

#### 4.1.2 Piscina

La piscina del LPN se modelizará fundamentalmente en tres partes: el agua, el polietileno y el aire.

Estos volúmenes se modelizan mediante tres paralelepípedos, uno exterior y dos interiores uno encima del otro:

- El paralelepípedo interior superior, que abarca toda la superficie de la piscina, y que contendrá el aire bajo la tapa de la piscina.
- El paralelepípedo interior inferior, que abarca toda la superficie de la piscina, contendrá el agua que llena la piscina.
- Entre estos dos paralelepípedos interiores y el exterior se encontrará el polietileno de la piscina.

En la parte inferior derecha de estos volúmenes se modelizan volúmenes de exclusión en forma de paralelepípedos que se utilizan para eliminar los volúmenes de agua y polietileno necesarios para representar el escalón de hormigón que divide la piscina en dos regiones, la profunda donde se encuentra la lanzadera y la no profunda donde se encuentra el almacén de fuentes.

La disposición general y dimensiones de la piscina se observan en la Figura 4.7. Una visualización del modelo de la piscina se muestra en la Figura 4.8, Figura 4.9 y Figura

4.10. Las celdas y superficies correspondientes a la piscina se muestran en el *Anexo I: Input de MCNP, modelización de la geometría.*

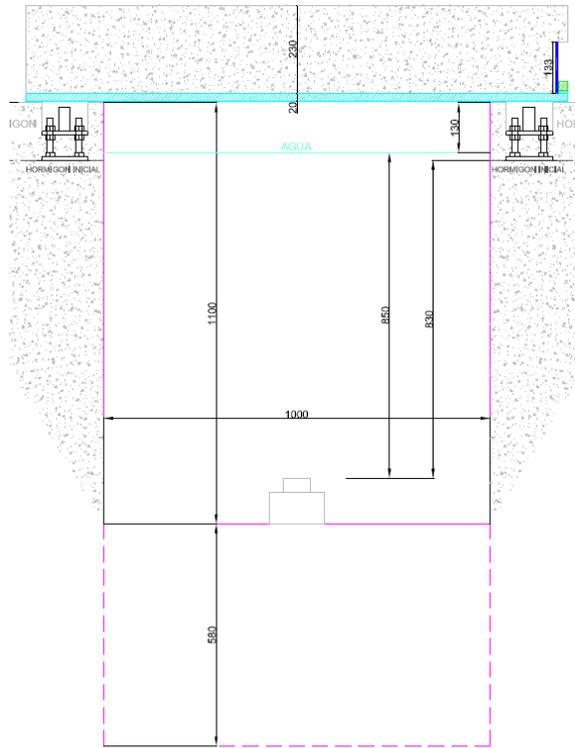


Figura 4.7: Disposición y dimensiones de la piscina (alzado)

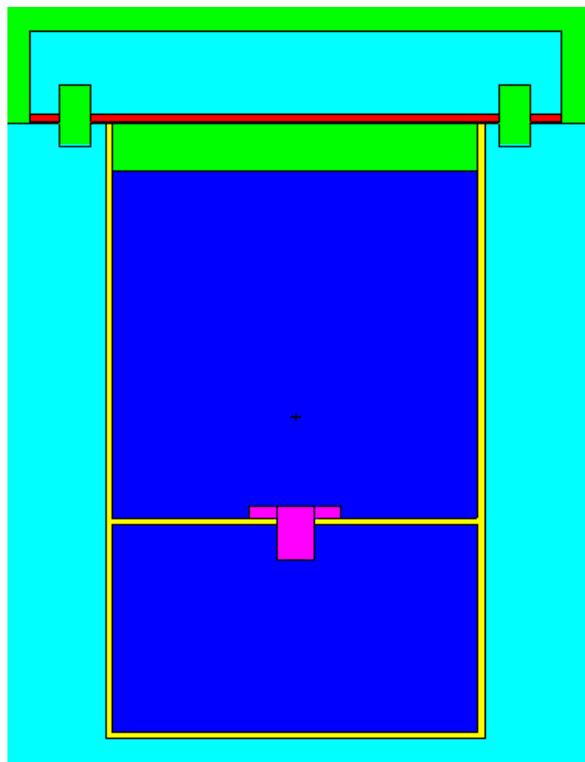


Figura 4.8: Detalle de la disposición de la piscina en el modelo (alzado)

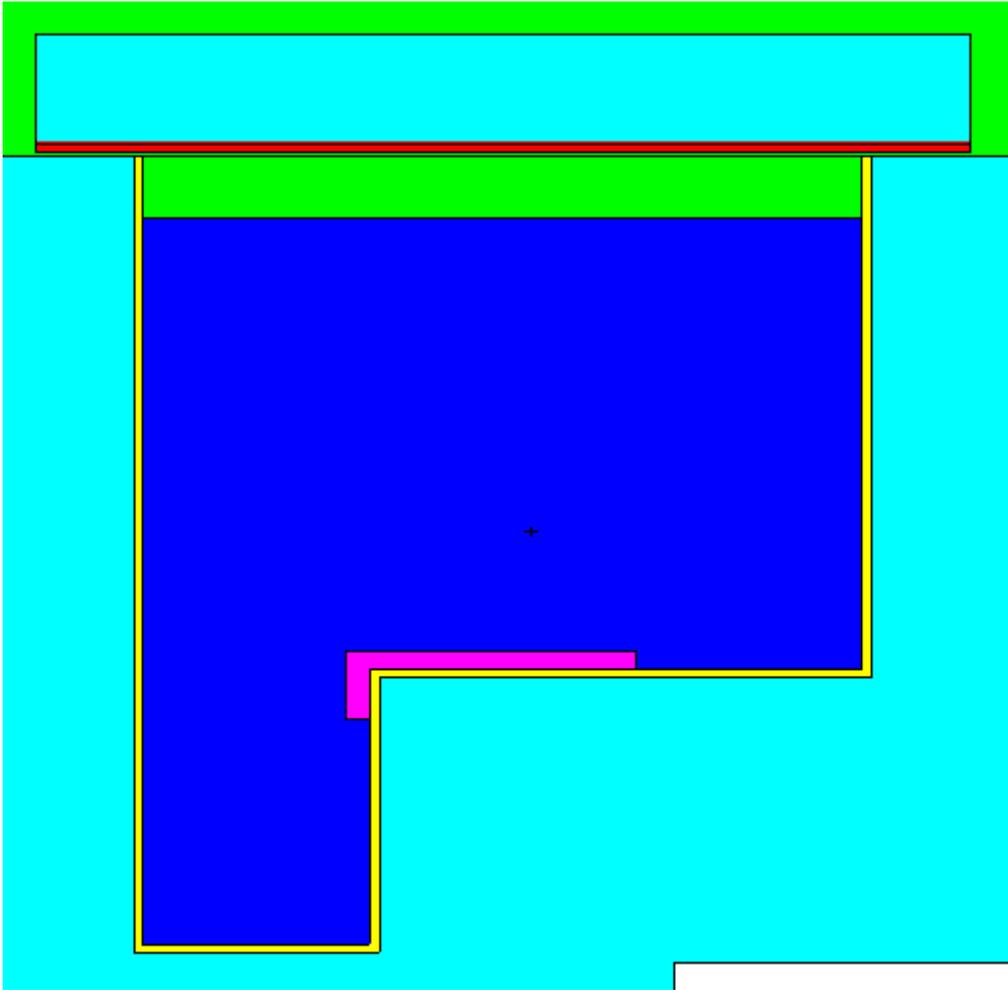


Figura 4.9: Detalle de la disposición de la piscina en el modelo (alzado) (ver Figura 3.2)

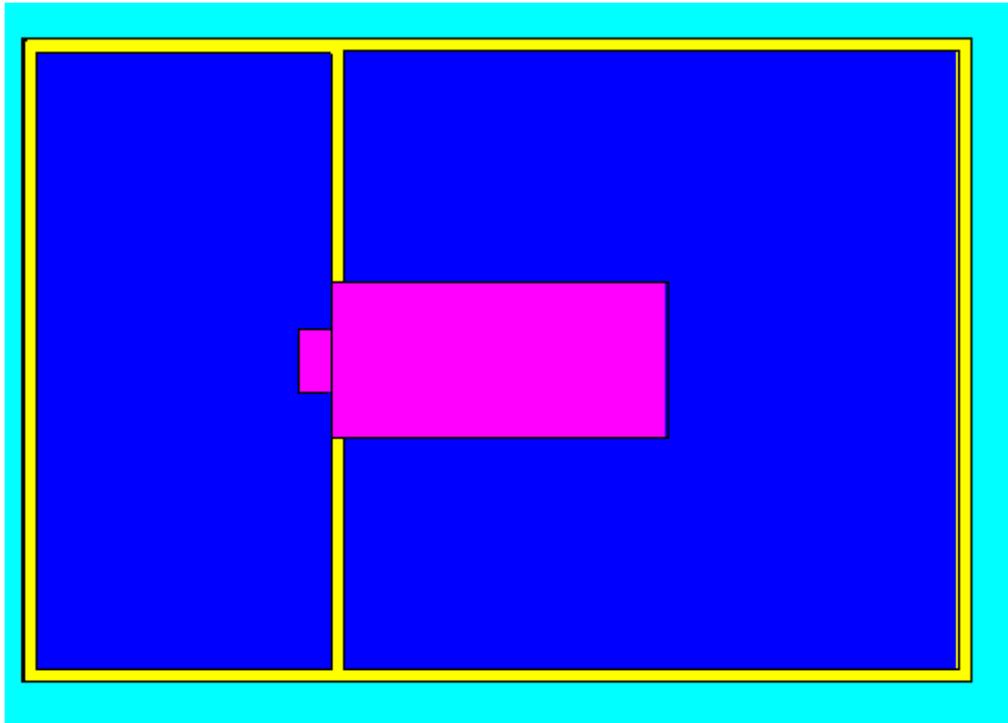


Figura 4.10: Detalle de la disposición de la piscina en el modelo (planta) (ver Figura 4.1).

### 4.1.3 Almacén de fuentes

El almacén de fuentes se modeliza mediante dos paralelepípedos:

- Uno para la plancha que se encuentra sobre el escalón de la piscina
- Otro para la columna que queda suspendida en el mismo, y que contiene la posición que almacena la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ .

El interior de estos dos paralelepípedos contendrá el aluminio que conforma el almacén de fuentes. Como primera aproximación, no se modelizan los huecos en los que se almacenan las fuentes.

La disposición general y dimensiones del almacén de fuentes se observan en la Figura 4.11 y Figura 4.13. Una visualización del modelo del almacén de fuentes se muestra en la Figura 4.12 y Figura 4.14. Las celdas y superficies correspondientes al almacén de fuentes se muestran en el *Anexo I: Input de MCNP, modelización de la geometría*.

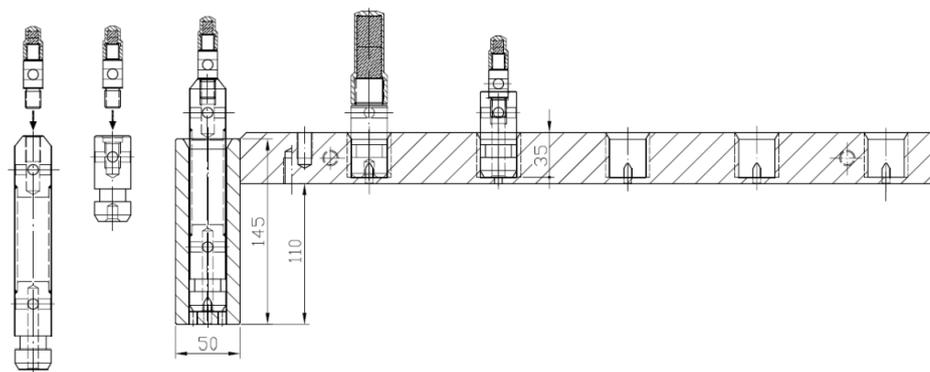


Figura 4.11: Disposición y dimensiones del almacén de fuentes (alzado).

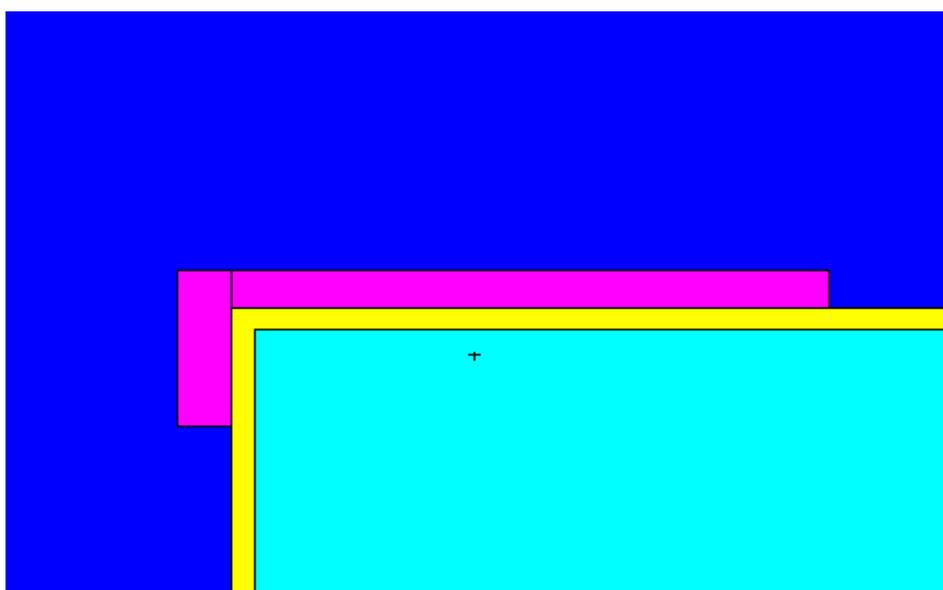


Figura 4.12: En color rosa, detalle de la disposición del almacén de fuentes en el modelo (alzado).

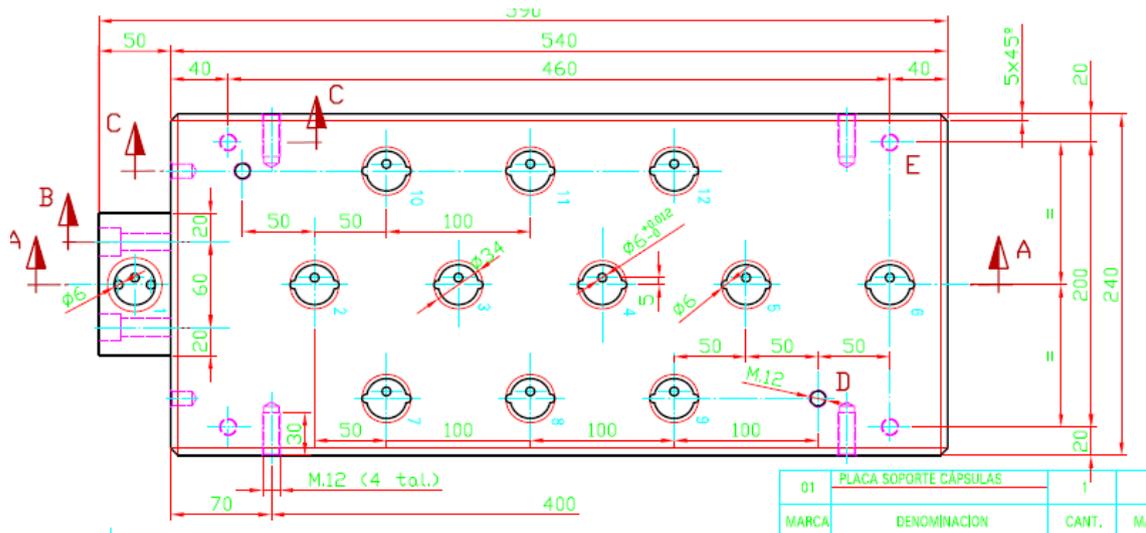


Figura 4.13: Disposición y dimensiones del almacén de fuentes (planta).

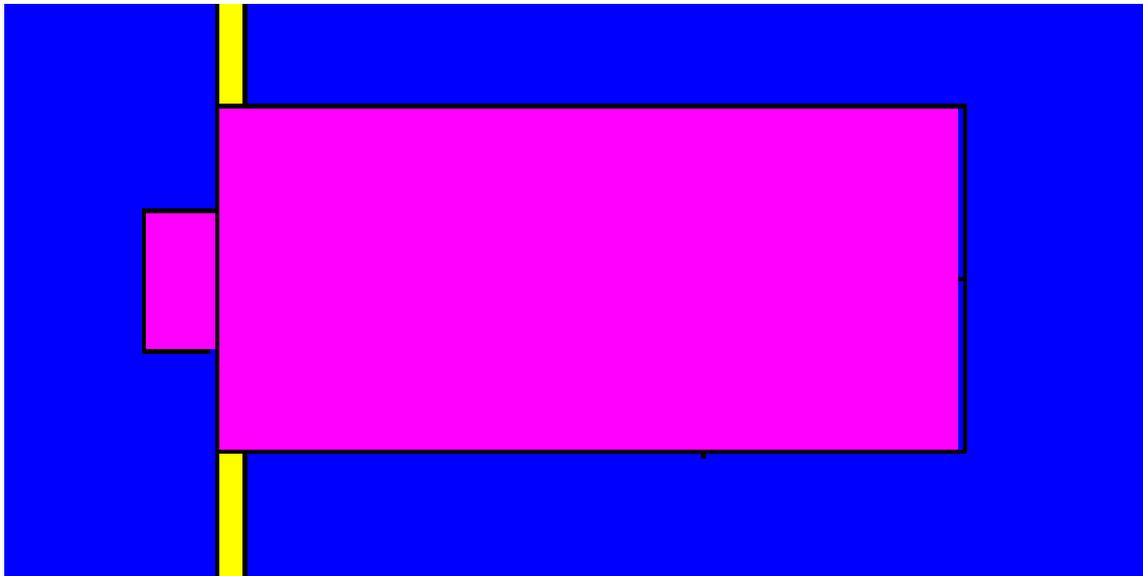


Figura 4.14: Detalle de la disposición del almacén de fuentes en el modelo (planta).

#### 4.1.4 Tapa

Se modeliza mediante dos paralelepípedos contiguos:

- Uno superior que contendrá el hormigón que conforma la tapa.
- Uno inferior que contendrá el acero que conforma la capa de aluminio en la superficie inferior de la tapa.

Se modelizan detalles de la tapa como son la muesca que permite el paso de la estructura de la lanzadera y los huecos para los raíles que permiten el movimiento de la tapa.

La disposición general y dimensiones de la tapa se observan en la Figura 4.15, Figura 4.16 y Figura 4.18. Una visualización del modelo de la tapa se muestra en la Figura 4.17 y Figura 4.19. Las celdas y superficies correspondientes a la tapa se muestran en el Anexo I: Input de MCNP, modelización de la geometría.

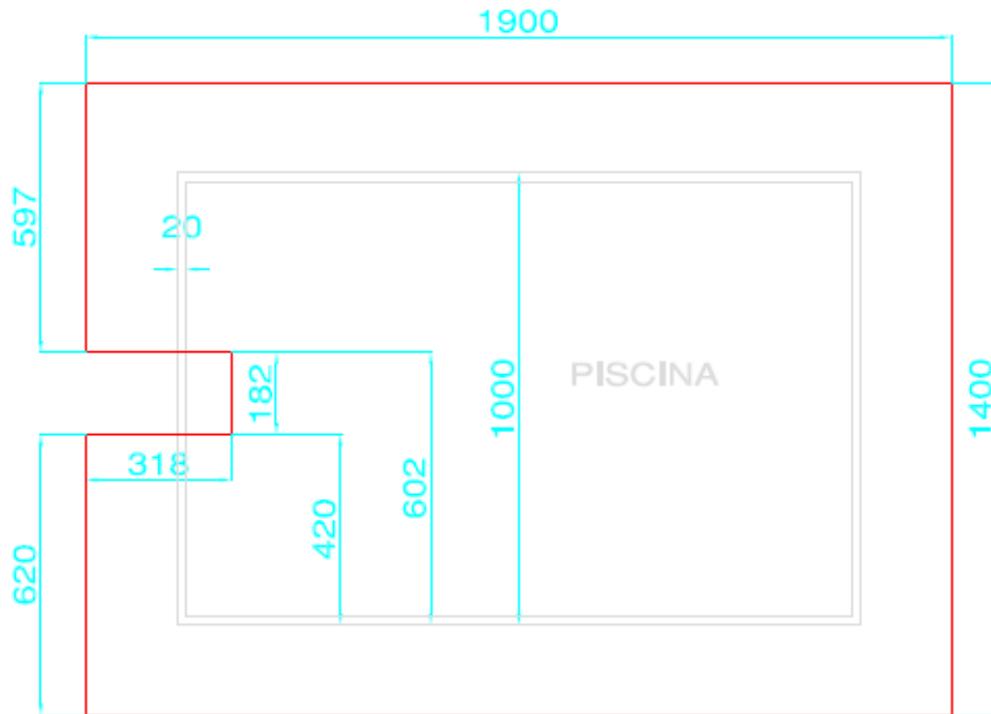


Figura 4.15: Disposición y dimensiones de la tapa de la piscina (planta). Se muestra la muesca.

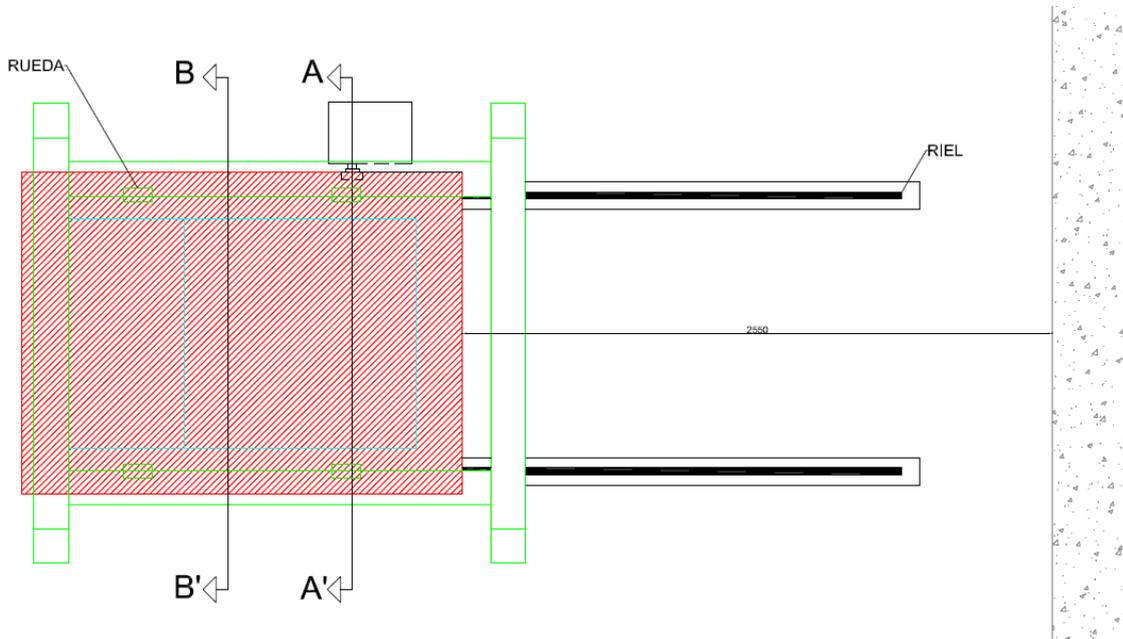


Figura 4.16: Disposición y dimensiones de la tapa de la piscina (planta). Se muestran los raíles.

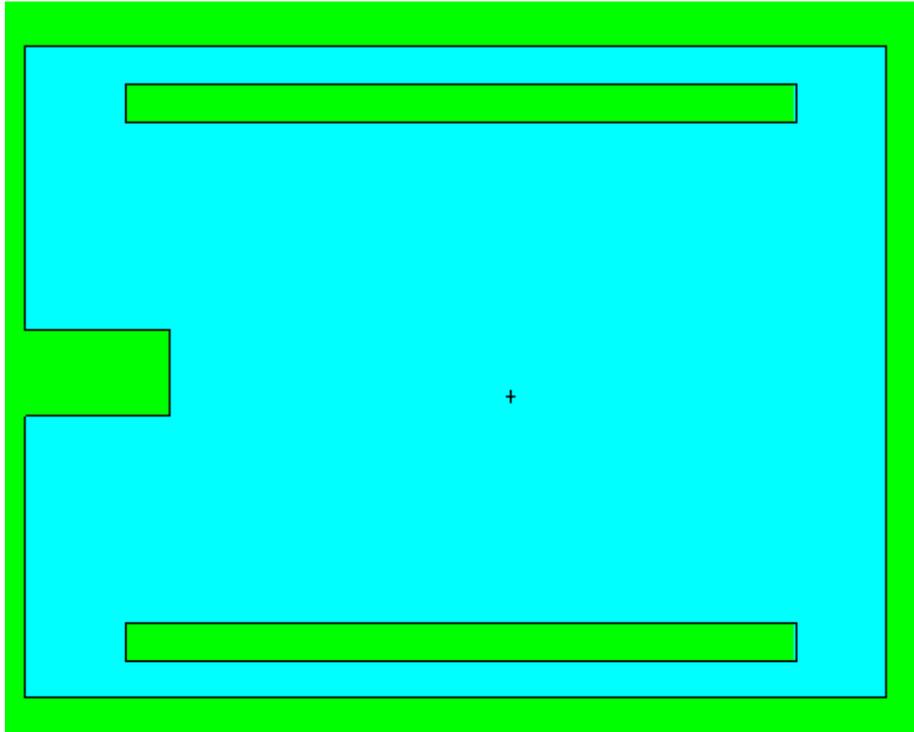


Figura 4.17: Detalle de la disposición de la tapa de la piscina en el modelo (planta). Se muestran la muesca y el hueco para los railes.

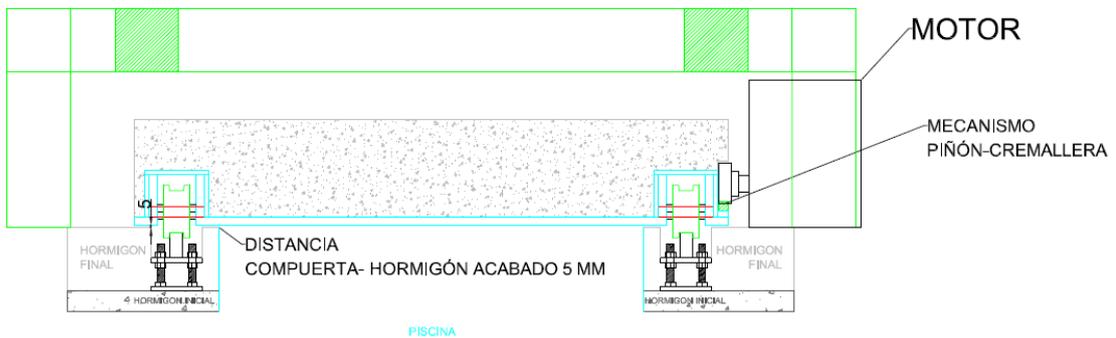


Figura 4.18: Disposición y dimensiones de la tapa de la piscina (alzado). Se muestran los railes y el huelgo con el suelo.

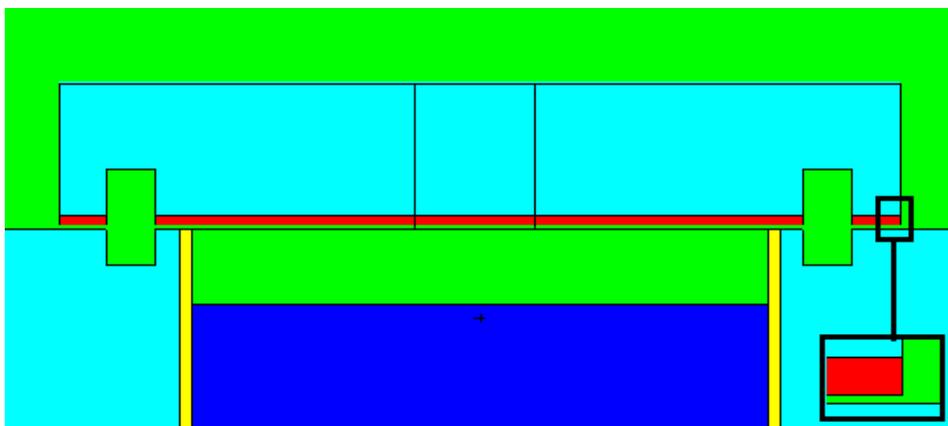


Figura 4.19: Detalle de la disposición de la tapa de la piscina en el modelo (alzado). Se muestran la muesca, el hueco para los railes y el detalle del huelgo con el suelo.

#### 4.1.5 Lanzadera

La lanzadera se modeliza mediante dos estructuras contiguas:

- Un paralelepípedo que conformará la estructura principal de la lanzadera y que llega hasta el centro del laboratorio.
- Medio cono invertido unido a la parte inferior de la estructura principal, que representa la antorcha en la que se sitúa la fuente para ser llevada a la posición de irradiación en el centro del laboratorio.

El material es aluminio, pero la estructura real se compone de varios tubos y el carrito que porta la antorcha, por tanto, para reflejar esta realidad se considera que el volumen de la lanzadera bajo el agua es un 50 % agua y un 50 % aluminio. Este aspecto se modeliza mediante la densidad de la celda que conforma la lanzadera, que será la media de las densidades del agua y del aluminio.

La disposición general y dimensiones de la lanzadera se observan en las Figuras Figura 4.3 y Figura 4.5. Una visualización del modelo de la lanzadera se muestra en la Figura 4.20. Las celdas y superficies correspondientes a la tapa se muestran en el *Anexo I: Input de MCNP, modelización de la geometría*.

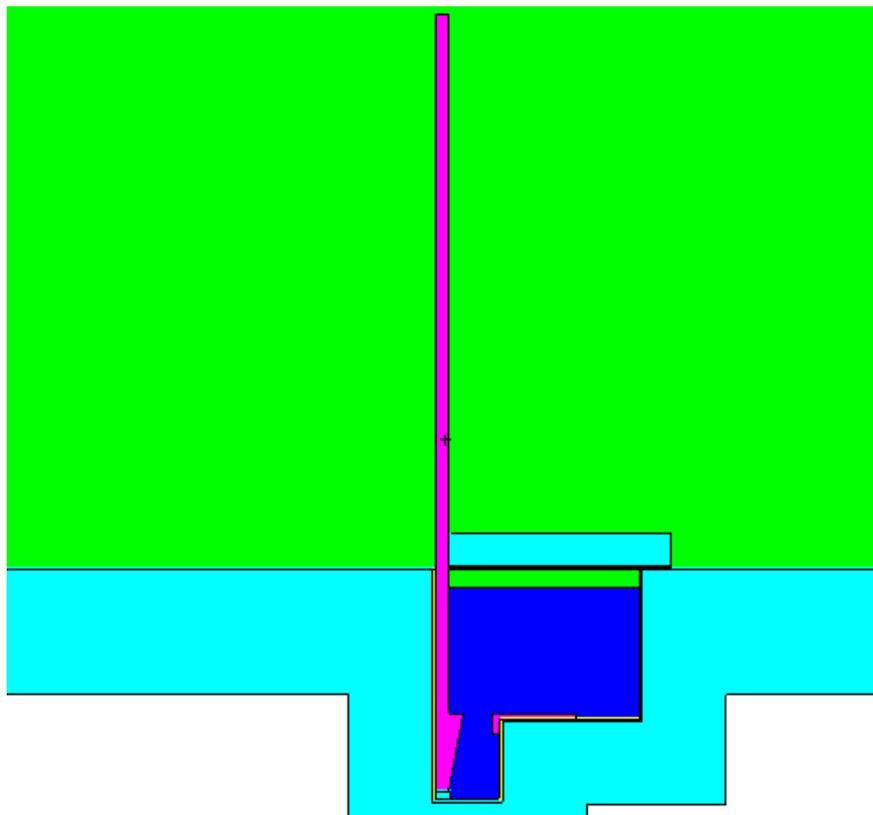


Figura 4.20: En color rosa, detalle de la disposición de la lanzadera en el modelo (alzado).

## 4.2 Materiales

### 4.2.1 Acero

Este material se encuentra en la tapa de la piscina. Se toma como referencia el *ES* y se recurre a las normas AISI para comprobar la composición. Por similitud, se selecciona el acero al carbón AISI-C1024 de densidad 7,85 g/cc (ver Tabla 4-1). La carta de materiales correspondiente se muestra en el *Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales*.

**Tabla 4-1: Composición del acero.**

Elemento	%
<sup>54</sup> Fe	5,739
<sup>56</sup> Fe	90,060
<sup>57</sup> Fe	2,090
<sup>58</sup> Fe	0,301
C natural	0,22
<sup>55</sup> Mn	1,50
<sup>31</sup> P	0,04
S natural	0,05

### 4.2.2 Agua

Este material se encuentra en el interior de la piscina. Se toma como referencia la composición especificadas en el *ES*, agua pura de densidad 1 g/cc (ver Tabla 4-2). La carta de materiales correspondiente se muestra en el *Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales*.

**Tabla 4-2: Composición del agua.**

Elemento	%
<sup>1</sup> H	11,111
<sup>16</sup> O	88,889

### 4.2.3 Polietileno

Este material se encuentra en las paredes de la piscina. Se toma como referencia la composición especificadas en el *ES*, polietileno de densidad 0,93 g/cc (ver Tabla 4-3). La carta de materiales correspondiente se muestra en el *Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales*.

**Tabla 4-3: Composición del polietileno.**

Elemento	%
<sup>1</sup> H	14,4
C natural	85,6

#### 4.2.4 Aire

Este material se encuentra llenando el interior del edificio del laboratorio y sobre el agua de la piscina. Se toma como referencia la composición especificadas en el *ES*, aire común de densidad 1,225 mg/cc (ver Tabla 4-4). La carta de materiales correspondiente se muestra en el *Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales*.

Tabla 4-4: Composición del aire.

Elemento	%
<sup>14</sup> N	75,4
<sup>16</sup> O	23,2
<sup>40</sup> Ar	1,4

#### 4.2.5 Hormigón

Este material conforma las paredes, el techo y el suelo del edificio del laboratorio, así como el subsuelo que rodea la piscina del laboratorio y la tapa de la piscina. Tal y como se especifica en el *ES*, se trata de hormigón armado ordinario de densidad 2,15g/cc y con un contenido en hidrogeno del 0,5% H en peso (ver Tabla 4-5). La carta de materiales correspondiente se muestra en el *Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales*.

Tabla 4-5: Composición del hormigón.

Elemento	%
<sup>1</sup> H	0,5
<sup>54</sup> Fe	0,15
<sup>56</sup> Fe	2,29
<sup>57</sup> Fe	0,053
<sup>58</sup> Fe	0,007
<sup>16</sup> O	51,1
Si natural	35,2
Ca natural	4,4
<sup>27</sup> Al	3,4
<sup>23</sup> Na	2,9

#### 4.2.6 Aluminio

Este material conforma el almacén de fuentes. El único isotopo estable del aluminio es el Al-27, y el aluminio metálico tienen una densidad de 2,7 g/cc. La carta de materiales correspondiente se muestra en el *Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales*.

### 4.3 Tratamiento físico

La modelización del tratamiento físico consta fundamentalmente de dos aéreas: el tipo de partículas que se va a transportar y las opciones físicas para las partículas que se van transportar.

En el modelo del LPN se van a transportar neutrones y fotones. Las opciones físicas escogidas para el tratamiento de neutrones y fotones son las opciones por defecto de MCNP. Estas opciones son adecuadas para el modelo, dado que

- Abarcan un amplio rango de energías neutrónicas (de 0 a 100 MeV), que incluye el rango de energías de emisión de las fuentes presentes en la piscina.
- Incluye la dispersión elástica e inelástica de neutrones y la absorción de neutrones.
- Incluye la generación de fotones a partir de interacciones neutrónicas.
- Abarcan un amplio rango de energías fotónicas (de 0 a 100 MeV), que incluye las energías de los fotones generados a partir de interacciones neutrónicas.
- Incluye generación de electrones por Bremsstrahlung y dispersión coherente de fotones.

También incluye el tratamiento para reacciones de fisión, aunque en este caso no son necesarias. La carta de tratamiento físico se muestra en el *Anexo III: Input de MCNP, modelización del tratamiento físico*

### 4.4 Fuente

En el LPN se dispone de dos fuentes de calibración: una fuente de <sup>252</sup>Cf y una fuente de <sup>241</sup>Am-<sup>9</sup>Be. Las especificaciones técnicas de las fuentes se recogen en la Tabla 4-6. Nótese que estos valores irán disminuyendo con el tiempo, a medida que decaigan las fuentes. Los valores recogidos en esta tabla son los valores nominales según la *Norma ISO 8529-1:2001*.

Para la modelización de las fuentes, en MCNP se define el termino fuente como una distribución de dos fuentes puntuales generales, de las cuales se ha de especificar la posición, el tipo de partículas emitidas y la energía de las partículas emitidas. La carta de termino fuente correspondiente se muestra en el *Anexo IV: Input de MCNP, modelización de las fuentes*.

**Tabla 4-6: Especificaciones técnicas de las fuentes de calibración del LPN.**

	Tasa emisión nominal (n/s)	Actividad nominal (GBq)	Tasa emisión relativa (%)
<sup>252</sup> Cf	2,3E09	20	98,123
<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	4,4E07	740	1,877

#### 4.4.1 Disposición de las fuentes

Sobre el suelo de la piscina se sitúa el almacén de fuentes, que es una plancha metálica con 12 alojamientos para situar en ellos las fuentes neutrónicas dentro de sus portacápsulas. Debido al diseño del portacápsula para la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  esta fuente sólo puede adoptar una posición en el almacén que coincide con el escalón que presenta la piscina, de tal modo que la distancia mínima a las paredes es de 50 cm. Un esquema de la disposición de las fuentes en su almacén se muestra en las Figura 4.21 y Figura 4.23.

En el modelo, la posición de las fuentes se especifica como una distribución de dos números discretos, que son las coordenadas de las dos posiciones que ocupen las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  respectivamente en el almacén de fuentes. Cada posición tiene asociada una probabilidad que es la intensidad relativa de cada fuente, que se calcula en función de la tasa de emisión de cada fuente respecto a la tasa de emisión total de ambas fuentes (ver la Tabla 4-6). Esta probabilidad se irá modificando con el paso del tiempo, a medida que decaigan las fuentes.

Un esquema de las posibles posiciones de las fuentes en el almacén de fuentes en el modelo se muestra en las Figura 4.22 y Figura 4.24. Las coordenadas de las posibles posiciones de las fuentes en el almacén de fuentes en el modelo se muestran en la Tabla 4-7. La carta de termino fuente correspondiente se muestra en el *Anexo IV: Input de MCNP, modelización de las fuentes*.

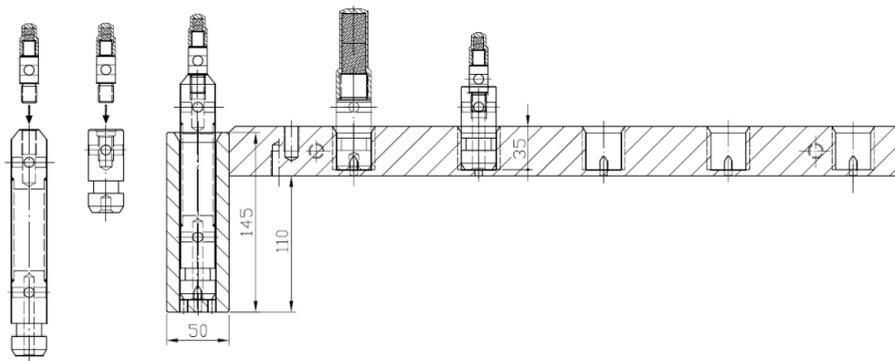


Figura 4.21: Disposición de las fuentes de calibración en el almacén de fuentes (alzado).

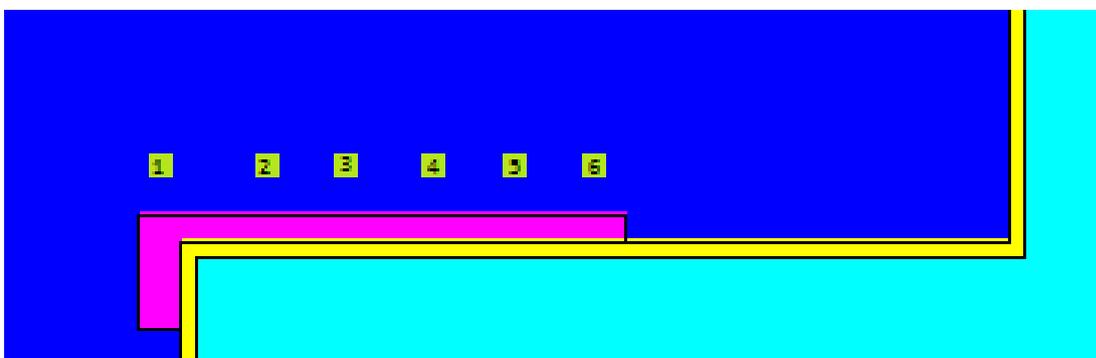


Figura 4.22: Disposición de las fuentes de calibración en el modelo (alzado).

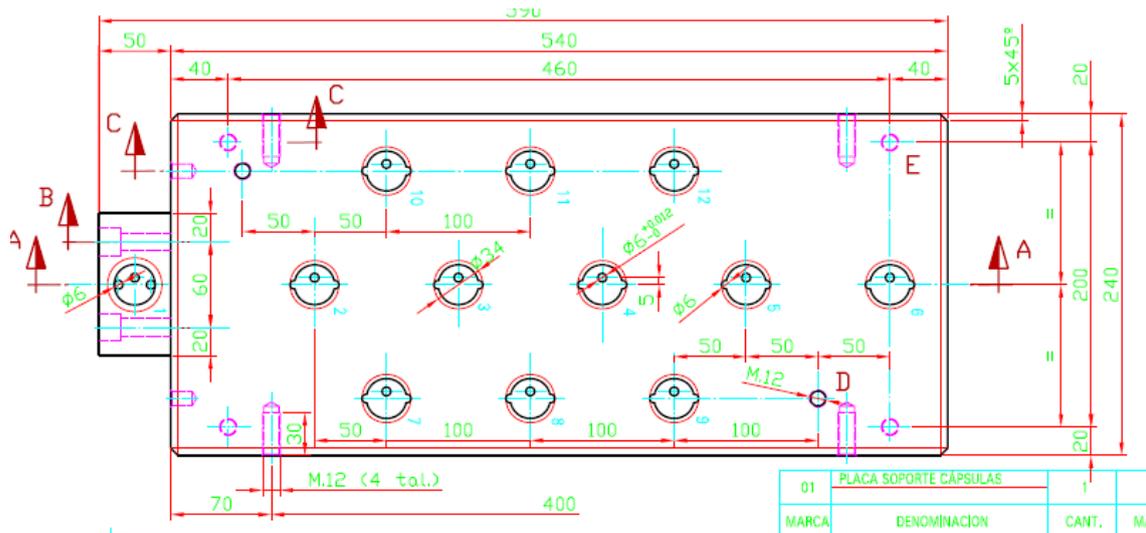


Figura 4.23: Disposición de las fuentes de calibración en el almacén de fuentes (planta).

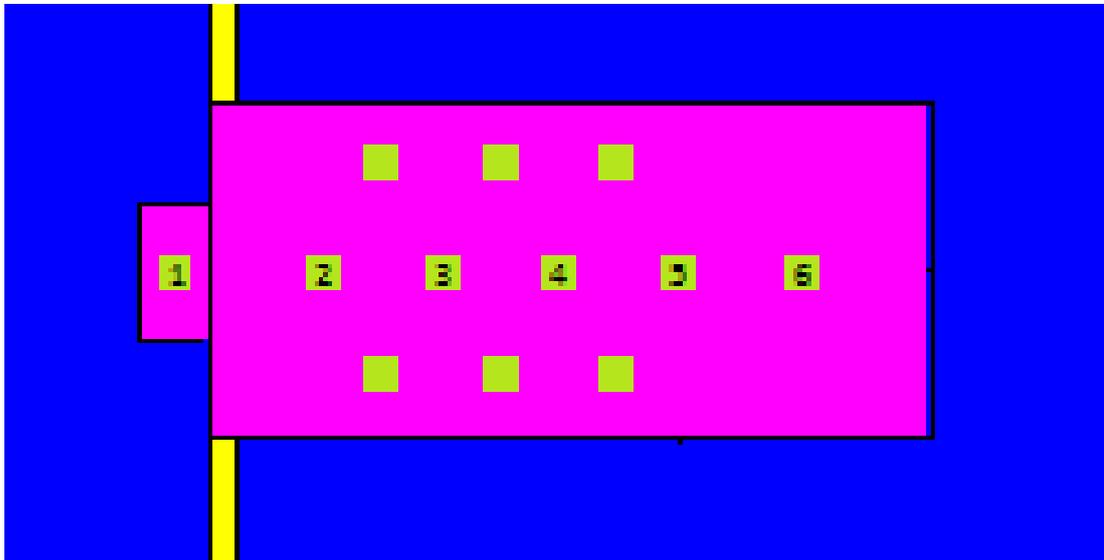


Figura 4.24: Disposición de las fuentes de calibración en modelo (planta).

Tabla 4-7: Coordenadas de las posibles posiciones de las fuentes en el almacén de fuentes.

Numero posición	Coordenadas (x, y, z)	Numero posición	Coordenadas (x, y, z)	Numero posición	Coordenadas (x, y, z)
1	(0, 29,5, -98)	7	(-8,6, 12, -98)	10	(8,6, 12, -98)
2	(0, 17, -98)	8	(-8,6, 2, -98)	11	(8,6, 2, -98)
3	(0, 7, -98)	9	(-8,6, -8, -98)	12	(8,6, -8, -98)
4	(0, -3, -98)				
5	(0, -13, -98)				
6	(0, -23, -98)				

#### 4.4.2 Distribución energética de las fuentes

Las fuentes de calibración del LPN son fuentes neutrónicas de referencia según la *norma ISO 8529-1:2001*, cumpliendo por tanto que la emisión de fotones y partículas alfa es lo suficientemente pequeñas como para poder considerar en el modelo que las fuentes emiten únicamente neutrones.

La emisión de partículas de las fuentes se especifica en función de la posición como una distribución de dos valores discretos, que son el tipo de partícula que emiten las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  respectivamente.

En el modelo, la distribución energética de las fuentes se especifica como una distribución de dos distribuciones, que son las distribuciones energéticas de las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  respectivamente.

La distribución energética de los neutrones emitidos por las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  se obtiene de la *norma ISO 8529-1:2001* y se recogen respectivamente en las Tabla 4-8 y la Tabla 4-9. Estas distribuciones son un histograma en el que se especifica la tasa de emisión de la fuente ( $\text{s}^{-1}$ ) en cada intervalo de energía (MeV).

La carta de termino fuente correspondiente se muestra en el *Anexo IV: Input de MCNP, modelización de las fuentes*.

**Tabla 4-8: Distribución energética de la intensidad de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ .**

E(MeV)	B(s-1)	E(MeV)	B(s-1)	E(MeV)	B(s-1)
4,14E-07	3,10E-10	2,00E-01	1,33E-02	2,30E+00	5,67E-02
1,00E-06	1,11E-08	2,50E-01	1,42E-02	2,60E+00	6,33E-02
1,00E-05	1,27E-07	3,00E-01	1,49E-02	3,00E+00	6,21E-02
5,00E-05	2,76E-07	3,50E-01	1,55E-02	3,50E+00	4,68E-02
1,00E-04	7,82E-07	4,00E-01	1,60E-02	4,00E+00	3,49E-02
2,00E-04	2,21E-06	4,50E-01	1,63E-02	4,50E+00	2,58E-02
4,00E-04	4,53E-06	5,00E-01	1,66E-02	5,00E+00	3,30E-02
7,00E-04	5,68E-06	5,50E-01	1,68E-02	6,00E+00	1,74E-02
1,00E-03	5,51E-05	6,00E-01	3,38E-02	7,00E+00	9,01E-03
3,00E-03	1,28E-04	7,00E-01	3,39E-02	8,00E+00	4,61E-03
6,00E-03	2,30E-04	8,00E-01	3,37E-02	9,00E+00	2,33E-03
1,00E-02	7,74E-04	9,00E-01	3,33E-02	1,00E+01	1,17E-03
2,00E-02	2,17E-03	1,00E+00	6,46E-02	1,10E+01	5,83E-04
4,00E-02	2,80E-03	1,20E+00	6,12E-02	1,20E+01	2,88E-04
6,00E-02	3,29E-03	1,40E+00	5,73E-02	1,30E+01	1,42E-04
8,00E-02	3,68E-03	1,60E+00	5,31E-02	1,40E+01	6,94E-05
1,00E-01	1,05E-02	1,80E+00	4,88E-02	1,50E+01	
1,50E-01	1,21E-02	2,00E+00	6,55E-02		

**Tabla 4-9: Distribución energética de la intensidad de la fuente de <sup>241</sup>Am-<sup>9</sup>Be.**

E(MeV)	B(s-1)	E(MeV)	B(s-1)	E(MeV)	B(s-1)
4,14E-07	1,44E-02	4,18E+00	2,86E-02	8,46E+00	6,52E-03
1,10E-01	3,34E-02	4,39E+00	3,18E-02	8,68E+00	4,26E-03
3,30E-01	3,13E-02	4,61E+00	3,07E-02	8,89E+00	3,67E-03
5,40E-01	2,81E-02	4,82E+00	3,33E-02	9,11E+00	3,81E-03
7,50E-01	2,50E-02	5,04E+00	3,04E-02	9,32E+00	5,06E-03
9,70E-01	2,14E-02	5,25E+00	2,74E-02	9,53E+00	6,25E-03
1,18E+00	1,98E-02	5,47E+00	2,33E-02	9,75E+00	5,52E-03
1,40E+00	1,75E-02	5,68E+00	2,06E-02	9,96E+00	4,68E-03
1,61E+00	1,92E-02	5,89E+00	1,82E-02	1,02E+01	3,70E-03
1,82E+00	2,23E-02	6,11E+00	1,77E-02	1,04E+01	2,78E-03
2,04E+00	2,15E-02	6,32E+00	2,04E-02	1,06E+01	1,51E-03
2,25E+00	2,25E-02	6,54E+00	1,83E-02	1,08E+01	3,63E-04
2,47E+00	2,28E-02	6,75E+00	1,63E-02	1,10E+01	
2,68E+00	2,95E-02	6,96E+00	1,68E-02		
2,92E+00	3,56E-02	7,18E+00	1,68E-02		
3,11E+00	3,69E-02	7,39E+00	1,88E-02		
3,32E+00	3,46E-02	7,61E+00	1,84E-02		
3,54E+00	3,07E-02	7,82E+00	1,69E-02		
3,75E+00	3,00E-02	8,03E+00	1,44E-02		
3,97E+00	2,69E-02	8,25E+00	9,68E-03		

## Capítulo 5. Validación

En este capítulo se describe el proceso de validación del modelo, tomando como referencia el *ES* de la instalación. La validación consistirá en utilizar el modelo implementado para realizar una estimación de la tasa de dosis en distintos puntos del laboratorio, con las fuentes en posición de almacenamiento y la tapa de la piscina cerrada, tal y como se especifica en el *ES*.

El modelo se considera validado si se cumplen los siguientes criterios:

- El error en la medida de las simulaciones ha de ser menor del 10 %.
- Los resultados de las simulaciones solapan con los resultados del *ES*.

La aplicación del segundo criterio de validación se puede entender como sigue:

- Sea  $ES \pm \Delta ES$  el resultado del *ES* para un detector y  $M \pm \Delta M$  el resultado de la simulación para el mismo detector. Estos resultados solapan si se cumple que una de las siguientes condiciones:
  - $ES - \Delta ES \leq M - \Delta M \leq ES + \Delta ES$
  - $ES - \Delta ES \leq M + \Delta M \leq ES + \Delta ES$
  - $M - \Delta M \leq ES - \Delta ES \leq M + \Delta M$
  - $M - \Delta M \leq ES + \Delta ES \leq M + \Delta M$
- Si esta condición de solapamiento se cumple para todos los detectores, entonces los resultados de la simulación solapan con los del *ES*. Se considera que los resultados para la tasa de dosis expuestos en el *ES* tienen un error del 15 %.

Para llevar a cabo la validación la metodología seguida es la siguiente:

- Adaptación del modelo a las condiciones del *ES*.
- Realización de las simulaciones necesarias.
- Comparación de los resultados de las simulaciones con los del *ES*.
- Obtención de conclusiones respecto a la adecuación del modelo para la validación, posibles mejoras en caso de que sea necesario.

### 5.1 Resultados del ES

Para el cálculo de la tasa de dosis se consideran distintos puntos donde puede encontrarse el personal de operación. En las Figura 5.1 y Figura 5.2, así como en la Tabla 5-1 se muestra la posición de los detectores y sus coordenadas:

- Los detectores 10, 11, 12 y 13 están situados a 1m del suelo del búnker, a distintas distancias del borde de la piscina.
- Los detectores 14, 15 y 16 están situados a 1m sobre la bancada (3,5m del suelo del búnker) para estimar las dosis que recibiría un trabajador realizando operaciones sobre la bancada.
- El detector 17 está situado justo encima de la puerta de acceso. Posición en donde se colocarán las sondas de radiación.

Nótese que las coordenadas están en un sistema de referencia distinto al del modelo implementado. Hay que transformar estas coordenadas a nuestro sistema de referencia.

Se considera que en la piscina está almacenada la fuente de calibración de <sup>252</sup>Cf de 20GBq, por ser la más limitante en término de fuente de neutrones. La fuente está en posición de almacenamiento y la tapa de la piscina cerrada.

Las tasas de dosis calculadas en los distintos puntos se presentan en la Tabla 5-2.

**Tabla 5-1: Coordenadas de los detectores dentro del búnker (cm).**

Detector	X	Y	Z
10	90	100	-300
11	120	100	-300
12	150	100	-300
13	200	100	-300
14	0	0	-50
15	0	-30	-50
16	0	-60	-50
17	315	-450	-160

**Tabla 5-2: Tasa de dosis dentro del búnker con la tapa de blindaje cerrada (µSv/h).**

	Detector	Neutrones	Fotones	Total
10	A 40cm del borde de la piscina	0,028	0,705	0,732
11	A 70cm del borde de la piscina	0,022	0,569	0,591
12	A 1m del borde de la piscina	0,017	0,409	0,425
13	A 1,5m del borde de la piscina	0,009	0,159	0,168
14	En bancada junto a lanzadera	0,007	0,236	0,243
15	En bancada a 30cm de la lanzadera	0,007	0,216	0,223
16	En bancada a 60cm de la lanzadera	0,006	0,192	0,198
17	Puerta de acceso al búnker	0,001	0,009	0,010

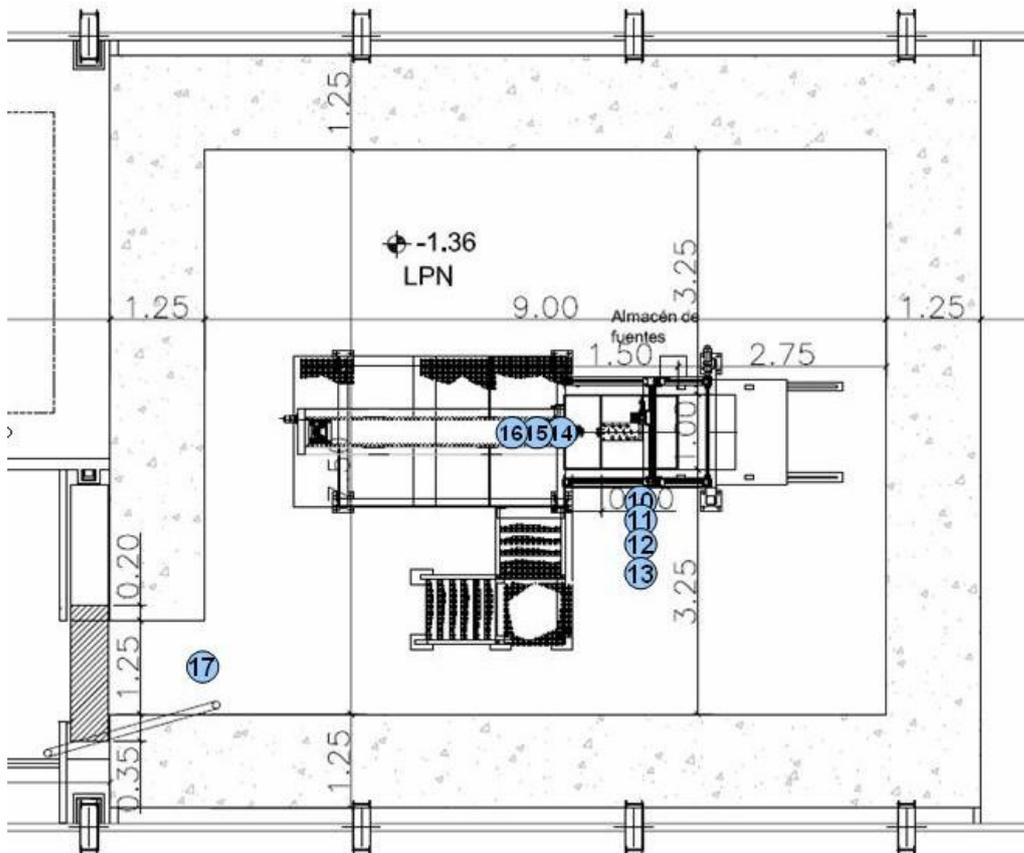


Figura 5.1: Localización de los detectores dentro del búnker.

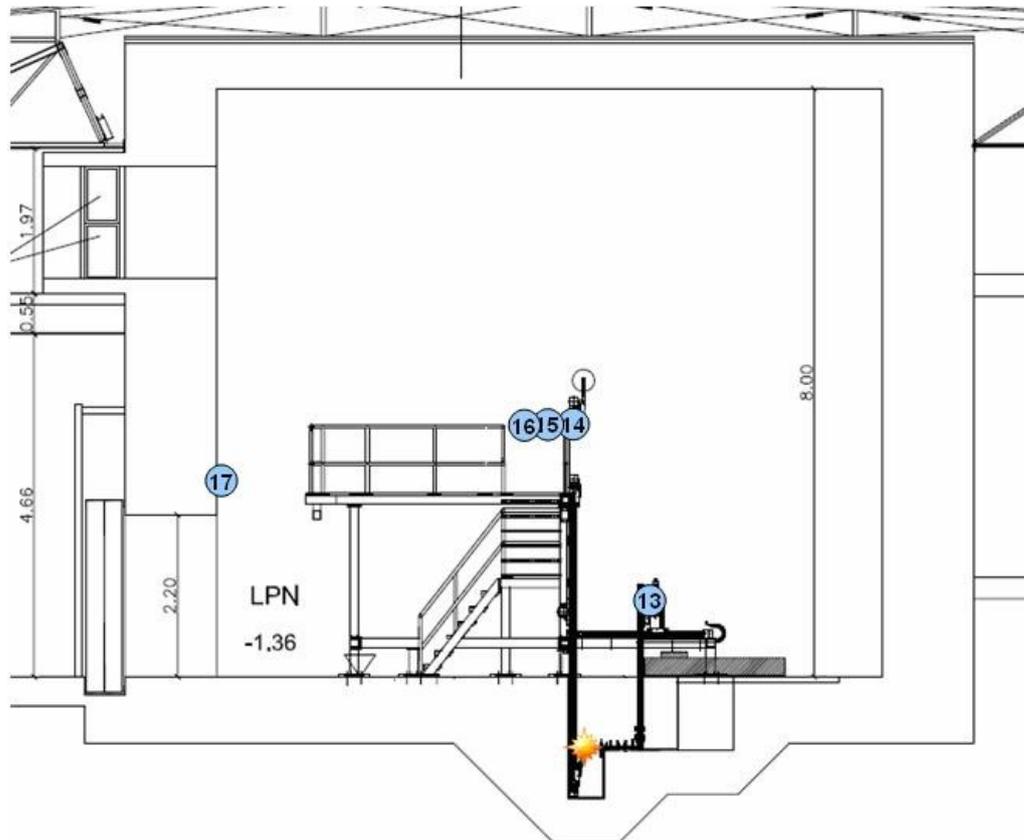


Figura 5.2: Localización de los detectores dentro del búnker.

## 5.2 Adaptación del modelo al ES

El primer paso para llevar a cabo la validación del modelo es la adaptación del mismo a las condiciones descritas en el *ES*. Estas adaptaciones consistirán principalmente en adaptar ciertos aspectos de la geometría y de las fuentes, y en añadir el código necesario para calcular la tasa de dosis en los puntos descritos en el *ES*. El objetivo de estas adaptaciones es hacer que el modelo refleje lo más fielmente posible las condiciones descritas en el *ES*.

### 5.2.1 Geometría

En el *ES*, la geometría de la piscina no es tan detallada como en el modelo implementado en este estudio. Esto se debe a que el objetivo de dicho documento era calcular la tasa de dosis en el exterior de la piscina.

El *ES* incluye el hueco para los raíles de la tapa, pero no incluye los siguientes detalles de la geometría de la piscina:

- Huelgo entre la tapa de la piscina y el suelo.
- Muesca de la tapa.
- Almacén de fuentes.
- Lanzadera.

En el modelo, y sólo para la validación, se van a eliminar estos detalles de la geometría. La especificación de la geometría adaptada al *ES* se muestra en el *Anexo V: Input de MCNP, geometría para la validación*.

### 5.2.2 Fuente

#### 5.2.2.1 Posición de las fuentes

En el *ES* no se considera la presencia de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , por ser la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  la fuente limitante en cuanto a emisión de neutrones y la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  se encuentra en la posición 4 del almacén de fuentes. Esta posición no es realista, dado que, como ya se ha descrito, la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  únicamente puede ocupar la posición 1 del almacén de fuentes.

En el modelo, y solo para la validación, se sitúa la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  en esta posición. Por los motivos descritos anteriormente, la posición de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  es irrelevante a efectos del cálculo de dosis en el exterior de la piscina. Arbitrariamente se elige la posición 6 del almacén de fuentes.

En la Tabla 5-3 se recogen las coordenadas de ambas fuentes en el modelo. Visualizando la geometría de nuestro modelo se comprueba que la posición de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  respecto a la piscina es la correcta (ver Figura 5.3 y Figura 5.4).

Tabla 5-3: Posiciones de las fuentes en el modelo para la validación (cm).

Fuente	X	Y	Z
$^{252}\text{Cf}$	0	-3	-98
$^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$	0	-23	-98

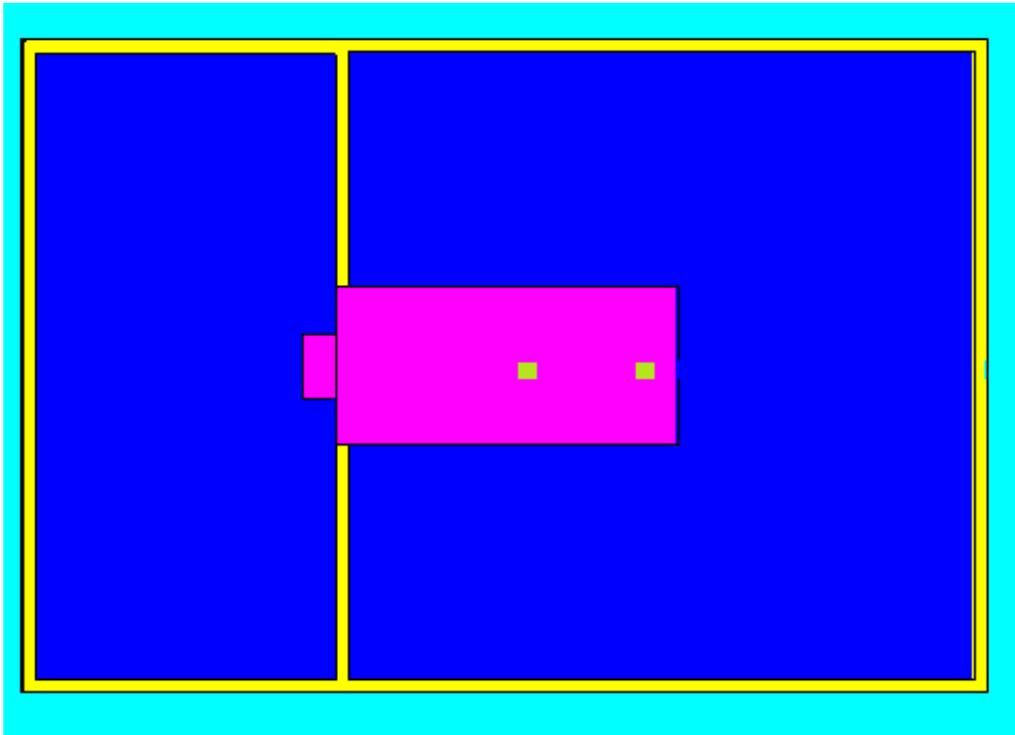


Figura 5.3: Posición de las fuentes en el modelo para la validación (planta).

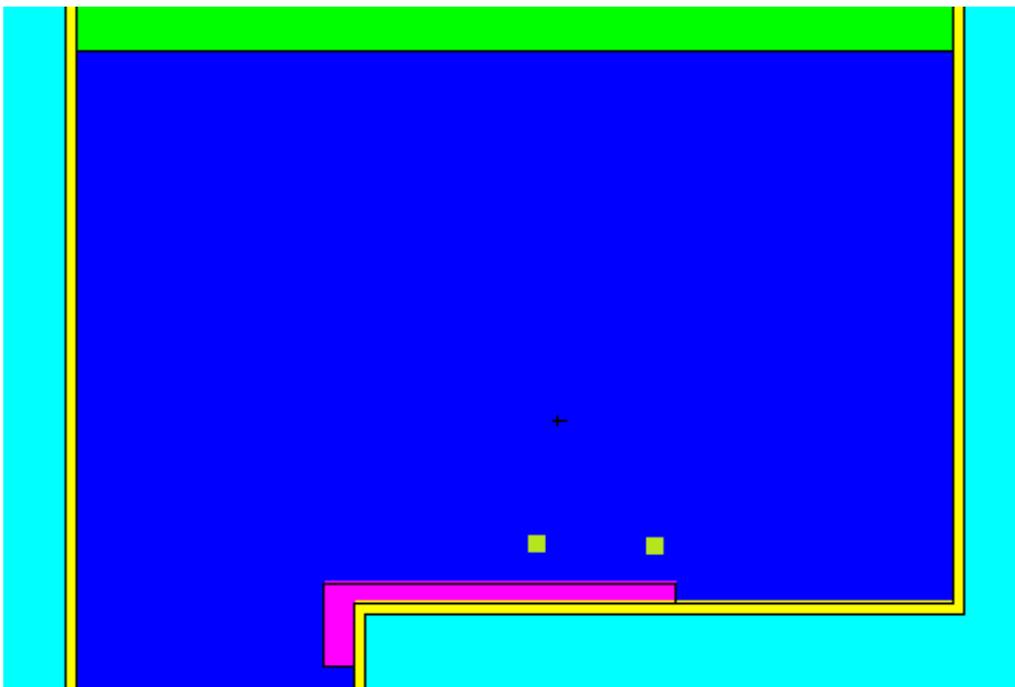


Figura 5.4: Posición de las fuentes en el modelo para la validación (alzado).

### 5.2.2.2 Probabilidad de las fuentes

En el ES se considera únicamente la fuente limitante de  $^{252}\text{Cf}$ , por ser su tasa de emisión dos órdenes de magnitud mayor que la del  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ .

Para adaptar el modelo a esta condición se debería establecer la probabilidad de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  en 1 y la de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  en 0. En estas condiciones la tasa de emisión total sería igual que la de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  ( $2,3 \cdot 10^9$  n/s).

Sin embargo, las probabilidades consideradas en el modelo (0,98123 y 0,01877 respectivamente) distan en apenas un 2% de las primeras, por tanto en principio no debería afectar demasiado a los resultados. En estas condiciones la tasa de emisión total sería la suma de ambas fuentes ( $2,344 \cdot 10^9$  n/s).

Sería interesante comprobar la diferencia en los resultados entre el caso de fuente única y el caso de fuente distribuida.

La especificación del término fuente adaptada al *ES* se muestra en los casos de fuente distribuida y de fuente única se muestran en el *Anexo VI: Input de MCNP, término fuente para la validación*.

### 5.2.3 Tallies

Se van a simular un total de 14 detectores, dos en cada posición especificada en el ES, uno para neutrones y otro para fotones. Para la validación, y por ser la caracterización de la piscina el objetivo último de este estudio, sólo se consideran los grupos de detectores del *ES* que se encuentran próximos a la piscina, es decir, los detectores del 10 al 16. El detector 17 no se tiene en cuenta para la validación por estar muy alejado de la piscina.

La magnitud que queremos obtener como resultado de la simulación es la tasa de dosis en distintos puntos del laboratorio, medida en  $\mu\text{Sv/h}$ . En MCNP, el tipo de tally más apropiado para obtener este resultado es el tally tipo *F5*, denominado *tally de flujo en detector puntual*, que devuelve el resultado en partículas/ $\text{cm}^2$ . Las características que se han de especificar para los mismos son las siguientes:

- Número de identificación del detector: en el modelo los detectores se identifican mediante tres números, el primero indica la posición del detector (de 1 a 7), el segundo el tipo de partículas que detecta (0 para neutrones y 1 para fotones) y el tercero el tipo de tally (5).
- Tipo de partícula que detecta el detector: en el modelo serán neutrones para los detectores X0 y fotones para los detectores X1.
- Coordenadas x, y, z del detector: En el *ES* el origen del sistema de referencia se sitúa sobre el centro del borde de la piscina en el que está situada la lanzadera a 4m sobre el suelo, mientras que en el modelo el origen de coordenadas se sitúa en el centro de la piscina a nivel del suelo. En la Figura 5.5 se muestra un esquema

de la disposición de ambos sistemas de referencia, para poder realizar el cambio de coordenadas.

Las coordenadas de los detectores en el *ES* y en el modelo se recogen en la Tabla 5-4. Visualizando la geometría del modelo y comparándola con el *ES* se comprueba que la posición de los detectores es la correcta es la correcta (ver Figura 5.6).

- *Radio de exclusión del detector*: representa una esfera alrededor del detector que se caracteriza porque todas las partículas que entran en esta esfera inciden en el detector. Se toma como referencia el *ES*, en el que se establece un radio de exclusión de 30 cm.

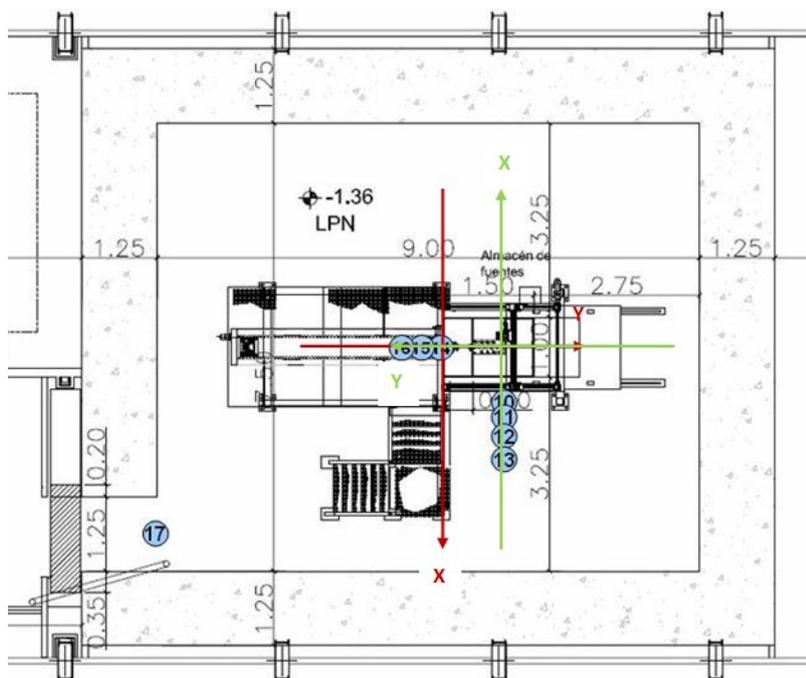


Figura 5.5: Disposición relativa de los sistemas de referencia usados en el *ES* (rojo) y en el modelo (verde).

Tabla 5-4: Coordenadas de los detectores en el *ES* y en el modelo (cm).

Detector		ES			Modelo		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1	A 40cm del borde de la piscina	90	100	-300	-90	-25	100
2	A 70cm del borde de la piscina	120	100	-300	-120	-25	100
3	A 1m del borde de la piscina	150	100	-300	-150	-25	100
4	A 1,5m del borde de la piscina	200	100	-300	-200	-25	100
5	Bancada junto a lanzadera	0	0	-50	0	75	350
6	Bancada a 30cm de la lanzadera	0	-30	-50	0	105	350
7	Bancada a 60cm de la lanzadera	0	-60	-50	0	135	350

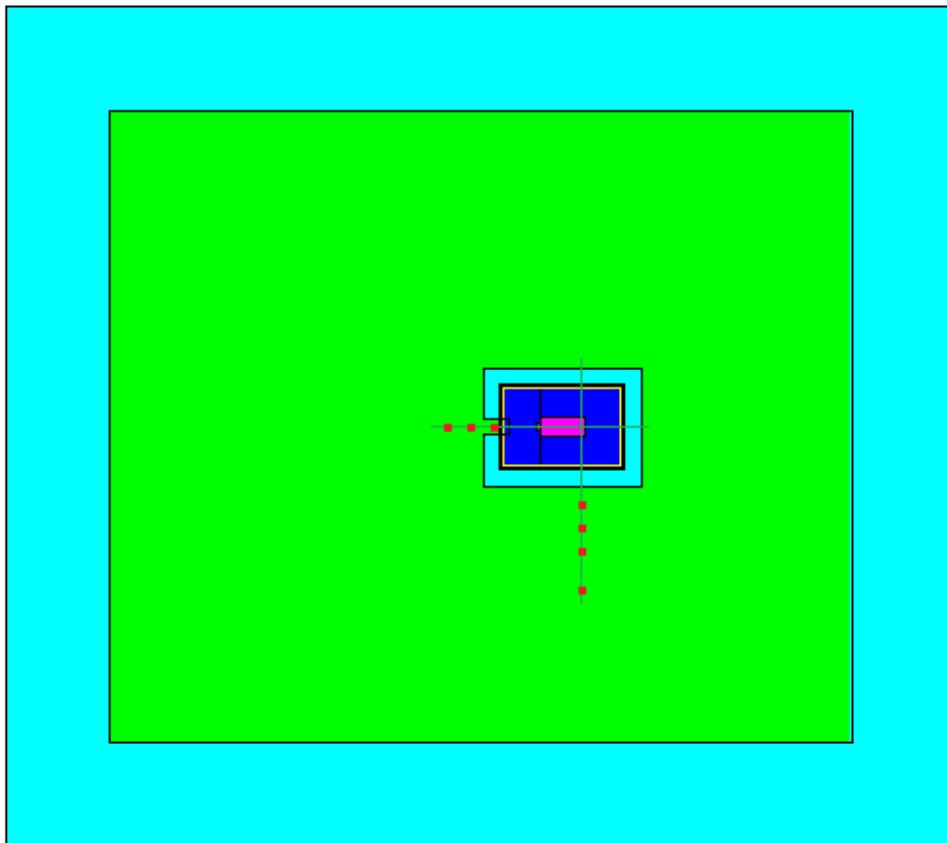
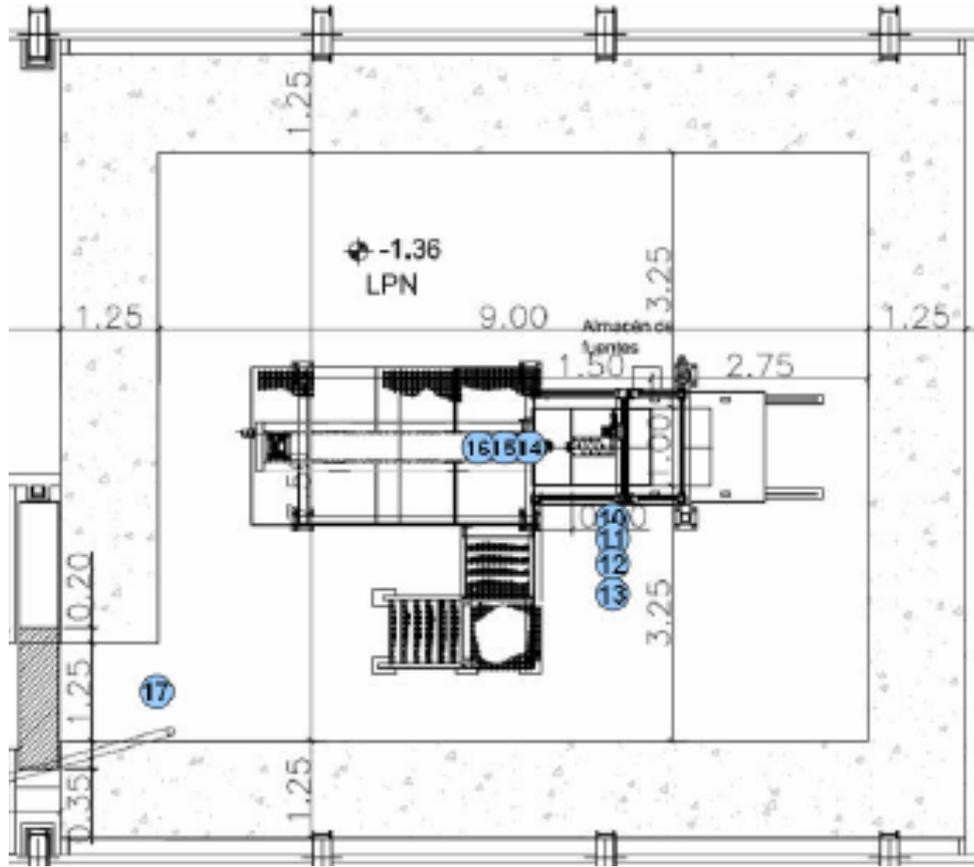


Figura 5.6: Posiciones de los detectores en el laboratorio en el ES y en el modelo.

Para convertir los resultados del tally de flujo a tasa de dosis se usan *funciones de dosis*. Las características que se han de especificar son las siguientes:

- Tally sobre el que se aplica la función: se define una única función de dosis que se aplica a todos los tallies.
- Sistema de unidades: se selecciona el Sistema Internacional de unidades, por lo que el resultado se devolverá en Sv/h/partícula de la fuente.
- Factor de normalización: factor que multiplica al resultado del tally para obtener el resultado en  $\mu\text{Sv/h}$ , por tanto, se compondrá de dos factores:
  - Factor de conversión de  $\mu\text{Sv}$  a Sv:  $1 \cdot 10^6 \mu\text{Sv/Sv}$ .
  - Tasa de emisión total de las fuentes:  $2,344 \cdot 10^9$  neutrones/s para el caso de fuentes distribuidas y  $2,3 \cdot 10^9$  neutrones/s para el caso de fuente única.

Por tanto el factor de normalización es  $2,344 \cdot 10^{15}$  para el caso de fuentes distribuidas y  $2,3 \cdot 10^{15}$  para el caso de fuente única.

- Estándar de conversión a dosis: se usa la Norma ANS-611-1977, que es la especificada en el ES.

La especificación de los tallies detectores y las funciones de conversión a dosis se muestra en el *Anexo VII: Input de MCNP, detectores puntuales para la validación*.

#### 5.2.4 Reducción de varianza y miscelánea

El principal método de reducción de varianza es la importancia de cada tipo de partícula en cada celda de la geometría. Para la validación, sólo interesa transportar las partículas en el interior del laboratorio, por tanto, la reducción de varianza se va a aplicar asignando importancia nula para neutrones en el exterior del laboratorio y asignando importancia unidad para neutrones en el interior del laboratorio.

En MCNP la importancia por defecto para los tipos de partículas especificadas en las cartas de tratamiento físico es la unidad, en este caso neutrones y fotones. Además, si se establece importancia nula para un tipo de partícula en una celda, por defecto se establece importancia nula para los demás tipos de partículas.

De esta manera, en el modelo, se considera importancia unidad para los neutrones y los fotones y electrones generados en el transporte en el interior del laboratorio, e importancia nula en el exterior del laboratorio.

En las cartas de miscelánea se encuentran, por ejemplo, métodos para definir cuando debe terminar de ejecutarse el código. Los principales métodos son:

- Finalización después de haber corrido un número determinado de historias de partículas de la fuente.
- Finalización después de haber consumido un determinado tiempo de ejecución.

Ejecutando preliminarmente el input en el ordenador personal se obtiene que el MCNP invierte aproximadamente 1 h en correr 1 millón de historias. Por tanto, en este documento se va a diferenciar entre tres tipos de ejecuciones:

- *Ejecución corta*: aproximadamente 1 h de tiempo de ejecución y 1 millón numero de historias corridas.
- *Ejecución media*: aproximadamente entre 12 y 24 h de tiempo de ejecución y entre 15 y 30 millones numero de historias corridas.
- *Ejecución larga*: varios días de tiempo de ejecución.

La estadística de los resultados depende sensiblemente del numero de historias corridas por MCNP. Por tanto, se utilizarán ejecuciones cortas como primera aproximación a los modelos planteados, y los que parezcan más adecuados se someterán a ejecuciones medias. Los modelos que demuestren ser adecuados se someterán a ejecuciones largas para mejorar la estadística del problema.

La especificación de los cortes en la ejecución se muestra en el *Anexo VIII: Input de MCNP, miscelánea para la validación*.

### **5.3 Primera serie de simulaciones**

#### **5.3.1 Opciones de simulación y objetivos**

En la Tabla 5-5 se recoge un resumen de las opciones de simulación consideradas para esta quinta serie de simulaciones. Los objetivos que se pretenden conseguir son:

- Analizar el comportamiento del modelo adaptado al ES para ver como se ajusta a los resultados del mismo.
- Discernir qué modelo de fuente es más adecuado para la validación.

Para ello, se van a realizar dos simulaciones cortas, tal y como se detalla en la Tabla 5-6.

#### **5.3.2 Resultados**

Las tasas de dosis debidas a neutrones y fotones en cada uno de los detectores para las dos simulaciones se muestran en la Tabla 5-7.

En la Figura 5.7 se muestra la comparación entre las tasas de dosis debidas a neutrones en el ES y las obtenidas en las dos simulaciones realizadas. En la Figura 5.8 se muestra la misma comparación para las tasas de dosis debidas a fotones.

**Tabla 5-5: Opciones de simulación para la primera serie de simulaciones de validación del modelo.**

Área de modelización	Opción	Valores	Descripción
Geometría	Huelgo (mm)	0	Según el ES
	Hueco raíles	Con	Según el ES
	Almacén de fuentes	Sin	Según el ES
	Muesca	Sin	Según el ES
	Lanzadera	Sin	Según el ES
	Fuente	Probabilidad fuentes $^{252}\text{Cf}$ y $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$	1 0
		0,98123 0,01877	Fuente distribuida, fiel a la realidad
Posición fuentes $^{252}\text{Cf}$ y $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$		4 6	Según el ES
Tallies		Detectores	1-7
	Radio de excusión (cm)	30	Según el ES
	Factor de normalización	$2,3 \cdot 10^9$	Fuente única, según el ES
		$2,344 \cdot 10^9$	Fuente distribuida, fiel a la realidad
Miscelánea	Cortes de ejecución	$10^6$	Limite numero de historias
		60	Limite tiempo de ejecución

**Tabla 5-6: Primera serie de simulaciones para la validación del modelo.**

Simulación	Descripción	Opciones	Valor
V10	Fuente única	Probabilidad fuentes	1 0
V11	Fuente distribuida	Probabilidad fuentes	0,98123 0,01877

Serie 1, Neutrones

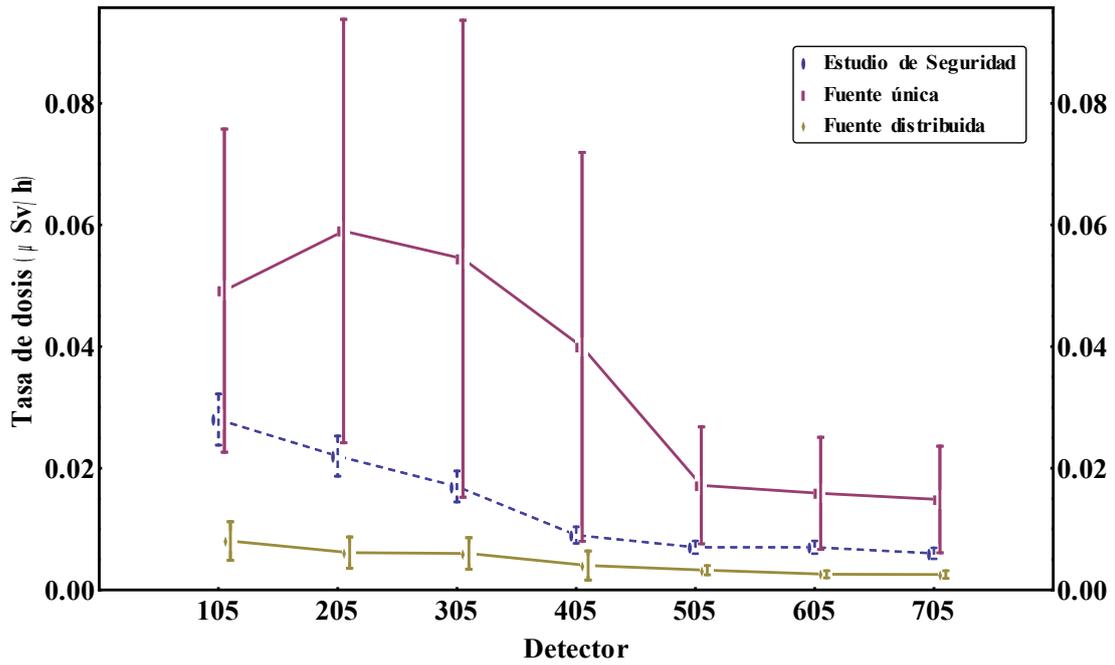


Figura 5.7: Tasas de dosis debidas a neutrones de la primera serie de simulaciones para la validación.

Serie 1, Fotones

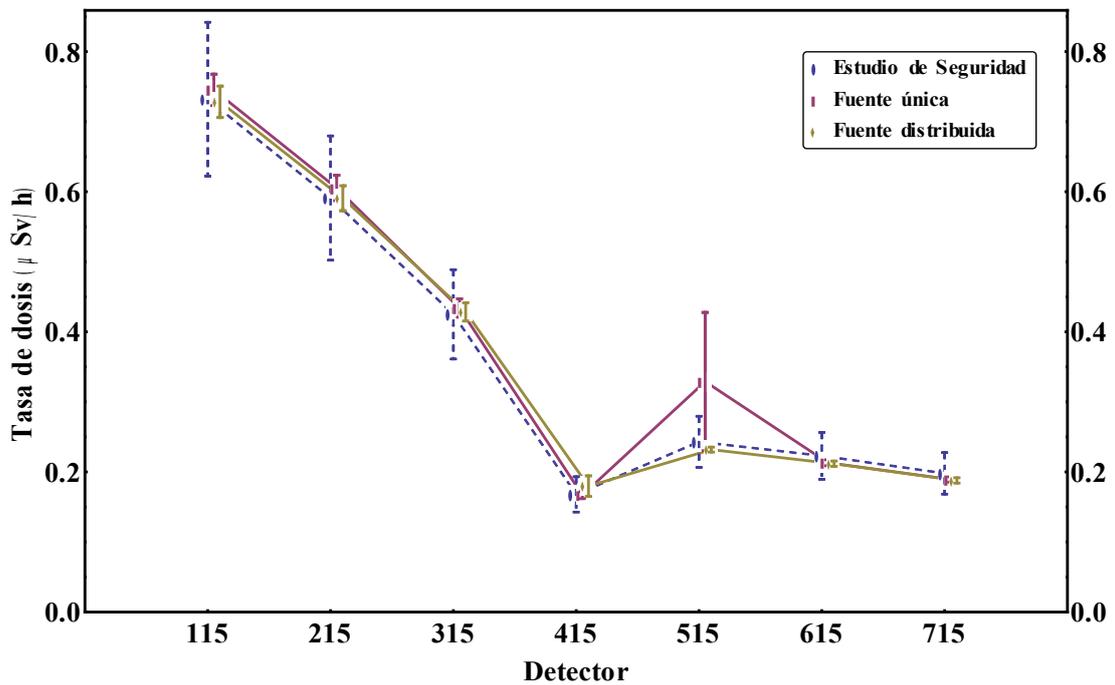


Figura 5.8: Tasas de dosis debidas a fotones de la primera serie de simulaciones para la validación.

**Tabla 5-7: Tasas de dosis debidas a neutrones y fotones de la primera serie de simulaciones para la validación.**

	V10: Fuente única		V11: Fuentes distribuidas		ES
Detector	Dosis μSv/h	Error por uno	Dosis μSv/h	Error por uno	Dosis μSv/h
105	4,92E-02	0,54	8,04E-03	0,39	2,80E-02
205	5,90E-02	0,59	6,12E-03	0,42	2,20E-02
305	5,44E-02	0,72	5,99E-03	0,43	1,70E-02
405	4,00E-02	0,80	4,01E-03	0,59	9,00E-03
505	1,72E-02	0,56	3,23E-03	0,24	7,00E-03
605	1,59E-02	0,58	2,57E-03	0,23	7,00E-03
705	1,49E-02	0,59	2,53E-03	0,25	6,00E-03
115	7,45E-01	0,03	7,28E-01	0,03	7,32E-01
215	6,05E-01	0,03	5,91E-01	0,03	5,91E-01
315	4,34E-01	0,03	4,28E-01	0,03	4,25E-01
415	1,67E-01	0,03	1,80E-01	0,08	1,68E-01
515	3,29E-01	0,30	2,32E-01	0,02	2,43E-01
615	2,13E-01	0,02	2,12E-01	0,02	2,23E-01
715	1,89E-01	0,02	1,88E-01	0,02	1,98E-01
media n		0,63		0,36	
media p		0,07		0,03	

### 5.3.3 Análisis

Cualitativamente, ambos modelos presentan un comportamiento más o menos similar al presentado en el ES para las tasas de dosis neutrónica y fotónica. Ambos modelos ajustan mejor el comportamiento de la tasa fotónica, y en general, el modelo de fuentes distribuidas ajusta mejor el comportamiento de ambas tasas.

Cuantitativamente, el modelo con fuente única (simulación v10), proporciona una tasa de dosis debida a neutrones que se encuentra muy por encima de la presentada en el ES, desviándose de media un 154% de la misma. La tasa de dosis debida a fotones se ajusta bastante bien a las tasas presentadas en el ES, desviándose de media un 6% de la misma.

El error medio de la tasa de dosis debida a neutrones es inaceptable (asciende al 63%), mientras que el error medio de la tasa de dosis debida a fotones es del 7%, por lo que ya cumple el criterio de validación.

En cuanto al modelo con fuentes distribuidas (simulación v11), la tasa de dosis debida a neutrones se encuentra por debajo de la presentada en el ES, desviándose de media un 55% de la misma. La tasa de dosis debida a fotones se ajusta bastante bien a las tasas presentadas en el ES, desviándose de media un 3% de la misma.

El error medio de la tasa de dosis debida a neutrones es menor que en el caso de fuente única, pero sigue siendo inaceptable (asciende al 36%), mientras que el error medio de la tasa de dosis debida a fotones es del 3%, por lo que ya cumple el criterio de validación.

Nótese que estas han sido simulaciones cortas, simplemente para observar el comportamiento de ambos modelos. Merece la pena destacar que la tasa fotónica ya cumple los criterios de validación para todos los detectores. Para mejorar los resultados de las tasas neutrónicas haría falta incrementar la estadística del problema, mediante ejecuciones más largas con mayor número de partículas emitidas por la fuente.

### **5.3.4 Conclusiones**

Las principales conclusiones que se deducen de los resultados anteriores son:

- El modelo con fuente distribuida presenta mayor potencial para la validación que el modelo con fuente única, proporcionando resultados más precisos y más ajustados al *ES*.
- Por tanto, en cuanto a la probabilidad de la fuente, la fuente única queda descartada frente a la fuente distribuida.
- La tasa de dosis debida a fotones cumple los criterios de validación.
- Para mejorar los resultados de la tasa de dosis neutrónica hace falta realizar simulaciones más largas.

Las actuaciones siguientes consistirán en realizar simulaciones más largas del modelo con fuente única, para ver si los resultados se ajustan más al *ES*.

## ***5.4 Segunda serie de simulaciones***

### **5.4.1 Opciones de simulación y objetivos**

El objetivo de esta serie de simulaciones es, partiendo del modelo con fuentes distribuidas expuesto en el apartado anterior, ir aumentando progresivamente el tiempo de simulación y el número de partículas de la fuente corridas para conseguir:

- Comprobar que al aumentar la estadística de las simulaciones los resultados de las tasas de dosis se ajustan más a los resultados presentados en el *ES*.
- Comprobar que al aumentar la estadística de las simulaciones se reduce el error de las tasas de dosis calculadas, principalmente las dosis neutrónicas, que son las que no cumplían los criterios de validación.
- Cumplir los criterios de validación expuestos al principio del presente capítulo.

Para ello, se van a realizar cuatro simulaciones. Las opciones de simulación comunes a las cuatro simulaciones, correspondientes al modelo de fuente distribuida, se muestran en la Tabla 5-8. Las opciones de simulación específicas de cada una de las simulaciones,

referentes al tiempo de ejecución y el número de partículas de la fuente corridas, se detallan en la Tabla 5-9.

**Tabla 5-8: Opciones de simulación para la segunda serie de simulaciones de validación del modelo.**

Área de modelización	Opción	Valores	Descripción
Geometría	Huelgo (mm)	0	Según el ES
	Hueco raíles	Con	Según el ES
	Almacén de fuentes	Sin	Según el ES
	Muesca	Sin	Según el ES
	Lanzadera	Sin	Según el ES
Fuente	Probabilidad fuentes $^{252}\text{Cf}$ y $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$	0,98123 0,01877	Fuente distribuida, fiel a la realidad
	Posición fuentes $^{252}\text{Cf}$ y $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$	4 6	Según el ES
Tallies	Detectores	1-7	Según el ES
	Radio de excusión (cm)	30	Según el ES
	Factor de normalización	2,344E09	Fuente distribuida, fiel a la realidad

**Tabla 5-9: Segunda serie de simulaciones para la validación del modelo.**

Simulación	Descripción	Opciones	Valor
V20	Simulación media	Limite numero de historias	15 millones
		Limite tiempo de ejecución	20 horas
V21	Simulación larga	Limite numero de historias	30 millones
		Limite tiempo de ejecución	2,5 días
V22	Simulación más larga	Limite numero de historias	120 millones
		Limite tiempo de ejecución	Ilimitado

### 5.4.2 Resultados

Las tasas de dosis debidas a neutrones y fotones en cada uno de los detectores para las dos simulaciones se muestran en la Tabla 5-10.

En la Figura 5.9 se muestra la comparación entre las tasas de dosis debidas a neutrones en el ES y las obtenidas en las simulaciones realizadas. En la Figura 5.10 se muestra la misma comparación para las tasas de dosis debidas a fotones.

### Serie 2, Neutrones

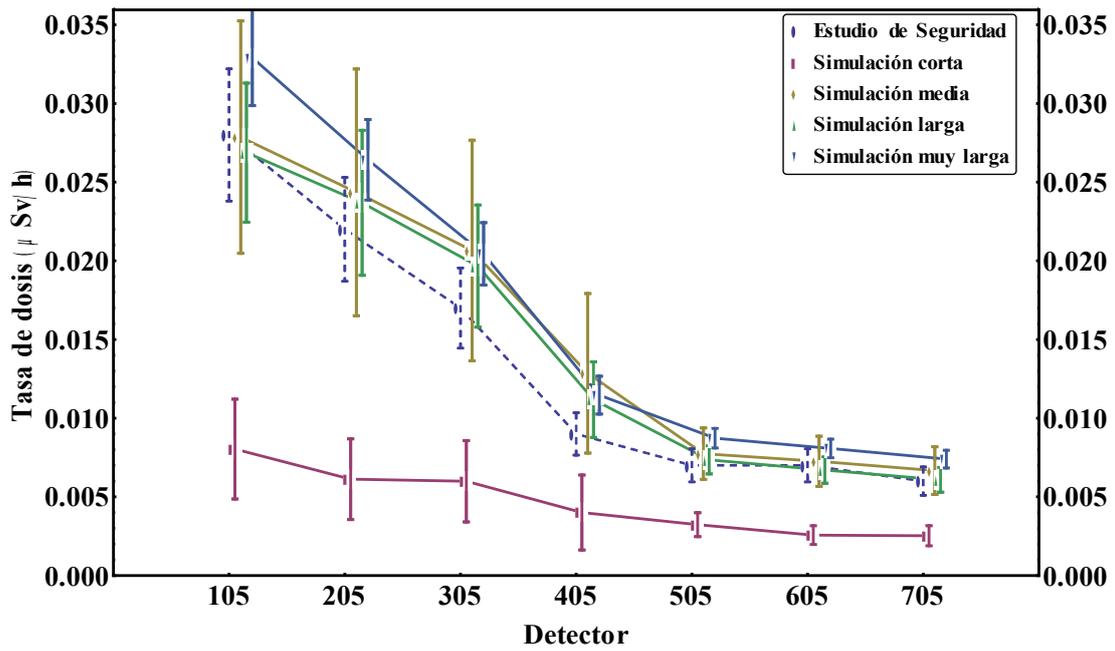


Figura 5.9: Tasas de dosis debidas a neutrones de la segunda serie de simulaciones para la validación.

### Serie 2, Fotones

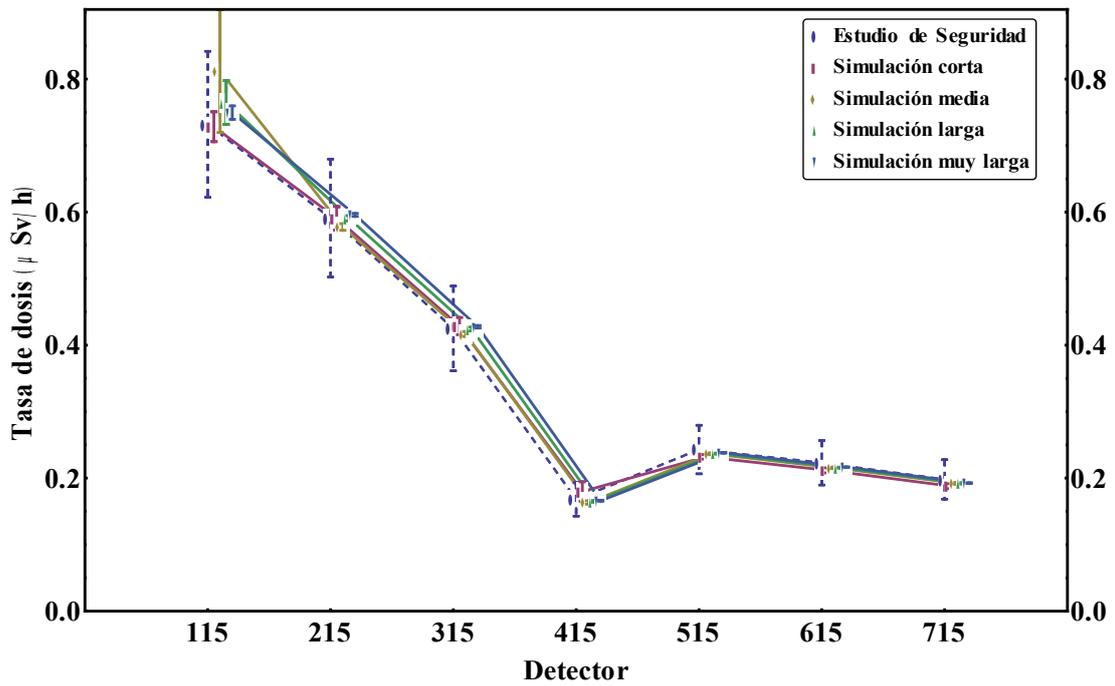


Figura 5.10: Tasas de dosis debidas a fotones de la segunda serie de simulaciones para la validación.

**Tabla 5-10: Tasas de dosis debidas a neutrones y fotones de la segunda serie de simulaciones para la validación.**

	V11: Simulación corta		V20: Simulación media		ES
Detector	Dosis μSv/h	Error por uno	Dosis μSv/h	Error por uno	Dosis μSv/h
105	8,04E-03	0,39	2,79E-02	0,27	2,80E-02
205	6,12E-03	0,42	2,44E-02	0,32	2,20E-02
305	5,99E-03	0,43	2,07E-02	0,34	1,70E-02
405	4,01E-03	0,59	1,29E-02	0,39	9,00E-03
505	3,23E-03	0,24	7,74E-03	0,21	7,00E-03
605	2,57E-03	0,23	7,26E-03	0,22	7,00E-03
705	2,53E-03	0,25	6,67E-03	0,23	6,00E-03
115	7,28E-01	0,03	8,12E-01	0,11	7,32E-01
215	5,91E-01	0,03	5,78E-01	0,01	5,91E-01
315	4,28E-01	0,03	4,17E-01	0,01	4,25E-01
415	1,80E-01	0,08	1,63E-01	0,02	1,68E-01
515	2,32E-01	0,02	2,37E-01	0,01	2,43E-01
615	2,12E-01	0,02	2,16E-01	0,01	2,23E-01
715	1,88E-01	0,02	1,92E-01	0,01	1,98E-01
media n		0,36		0,28	
media p		0,03		0,02	

	V21: Simulación larga		V20: Simulación muy larga		ES
Detector	Dosis μSv/h	Error por uno	Dosis μSv/h	Error por uno	Dosis μSv/h
105	2,69E-02	0,16	3,29E-02	0,09	2,80E-02
205	2,37E-02	0,19	2,64E-02	0,10	2,20E-02
305	1,97E-02	0,20	2,04E-02	0,10	1,70E-02
405	1,12E-02	0,21	1,15E-02	0,10	9,00E-03
505	7,35E-03	0,12	8,73E-03	0,07	7,00E-03
605	6,70E-03	0,13	8,08E-03	0,07	7,00E-03
705	6,08E-03	0,13	7,40E-03	0,08	6,00E-03
115	7,65E-01	0,04	7,50E-01	0,01	7,32E-01
215	5,91E-01	0,01	5,96E-01	0,00	5,91E-01
315	4,24E-01	0,01	4,28E-01	0,00	4,25E-01
415	1,65E-01	0,01	1,66E-01	0,00	1,68E-01
515	2,37E-01	0,00	2,38E-01	0,00	2,43E-01
615	2,16E-01	0,00	2,17E-01	0,00	2,23E-01
715	1,92E-01	0,01	1,93E-01	0,00	1,98E-01
media n		0,16		0,09	
media p		0,01		0,00	

### **5.4.3 Análisis**

Respecto a los resultados obtenidos para la tasa de dosis neutrónica, en la Figura 5.9 se observa como a medida que se aumenta la estadística del problema, el comportamiento de la tasa neutrónica se asemeja cada vez más a la presentada en el ES, hasta presentar un comportamiento totalmente análogo al mismo en la última simulación (V22).

Al mismo tiempo, se observa como el error en las tasas de dosis neutrónicas calculadas se van reduciendo cada vez más: habiendo comenzado con un error medio del 36% en la simulación corta, se reduce a un 28% en la simulación media y a un 16% en la simulación larga, alcanzándose el criterio de validación en la última simulación, en la que el error medio es del 9%, siendo el error en todos los detectores menor del 10%.

Finalmente, se observa que las tasas neutrónicas calculadas en la última simulación solapan con las tasas neutrónicas presentadas en el ES, cumpliéndose así el segundo criterio de validación.

Respecto a los resultados obtenidos para la tasa de dosis fotónica, que ya cumplían ambos criterios de validación en la simulación corta, sigue cumpliéndolos en cada una de las simulaciones realizadas, observándose el mismo tipo de comportamiento que la tasa de dosis neutrónica a medida que se aumenta la estadística del problema: la precisión y el ajuste de los resultados aumenta.

### **5.4.4 Conclusiones**

Las principales conclusiones que se deducen de los resultados anteriores son:

- Se ha comprobado que al aumentar la estadística de las simulaciones los resultados de las tasas de dosis se ajustan más a los resultados presentados en el ES.
- Se ha comprobado que al aumentar la estadística de las simulaciones se reduce el error de las tasas de dosis calculadas disminuye.
- Se ha logrado cumplir los criterios de validación expuestos al principio del presente capítulo.

Por tanto, el modelo queda validado según el ES de la instalación, y se puede proceder a la utilización del mismo para llevar a cabo la caracterización de la piscina del LPN.

# Capítulo 6.

## Caracterización

Como ya se indicó en los apartados 1.2 y 3.2, en relación a la caracterización de la piscina nos interesa conocer:

- *Fluencia neutrónica* en puntos en el interior de la piscina, utilizando un mallado tridimensional de espaciado 1 cc, para conocer cómo varía con la distancia a las fuentes y qué órdenes de magnitud se encuentran.
- *Espectros neutrónicos* en puntos sobre el almacén de fuentes y alrededor de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , desde la posición de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  y a intervalos regulares en las direcciones x y y z, para conocer el efecto de la distancia a la fuente sobre el espectro.

### 6.1 Adaptación del modelo

Para realizar la caracterización nos interesa que el modelo sea lo más fiel a la realidad posible. Por ello, y para acometer los objetivos expuestos en el apartado anterior, se han introducido las siguientes modificaciones en el modelo.

Al igual que en la validación, se considera que la tapa de la piscina está cerrada y que las fuentes son puntuales y que se encuentran en posición de almacenamiento.

#### 6.1.1 Geometría

En cuanto a la geometría, además de los huecos para los raíles, que ya estaban presentes en la simulación, también se considera la presencia de un huelgo entre la tapa y el suelo de 0.5 cm, del almacén de fuentes, de la lanzadera y de la muesca en la tapa que permite el paso de la estructura de la lanzadera. Se consideran tal y como se modelizaron el *Capítulo 4*.

Por otro lado, tal y como se explica en el apartado siguiente, hay que añadir a la geometría del modelo una serie de celdas detectoras.

##### 6.1.1.1 Celdas detectoras

Las celdas detectoras son las celdas en las que se van a contar los neutrones para determinar la fluencia y los espectros neutrónicos en distintos puntos estratégicos de la piscina y para distintas posiciones de la fuente de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ .

Las celdas detectoras se modelizan como paralelepípedos de 1 cc de volumen, que contendrán agua de la piscina, se situarán en la denominada zona de irradiación, que corresponde al volumen de la piscina sobre el suelo de la parte no profunda de la misma, ya que es la zona en la que se depositarán materiales para su irradiación.

Para establecer las posiciones de las celdas detectoras, se toma como origen de coordenadas la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  y se sitúan celdas detectoras en los ejes x y z a lo largo de las tres dimensiones de la piscina. Además se sitúa una celda detectora en el origen, que contiene la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ .

La disposición de las celdas detectoras en la piscina se muestran en la Figura 6.1 y la Figura 6.2, y las coordenadas de las mismas en la Tabla 6-1. Nótese que las celdas detectoras 100, 80, 81, 82, 83 y 84 coinciden con las posiciones de la 1 a la 6 del almacén de fuentes.

**Tabla 6-1: Posición de la celdas detectoras en el modelo (cm).**

Celda detectora	Número	x	y	z
Fuente $^{252}\text{Cf}$	100	0	29,5	-98
Eje X	70	1	29,5	-98
	71	2	29,5	-98
	72	3	29,5	-98
	73	4	29,5	-98
	74	5	29,5	-98
	75	6	29,5	-98
	76	9	29,5	-98
	77	23	29,5	-98
	78	46	29,5	-98
Eje Y	80	0	17	-98
	81	0	7	-98
	82	0	-3	-98
	83	0	-13	-98
	84	0	-23	-98
	85	0	-33	-98
	86	0	-43	-98
	87	0	-53	-98
	88	0	-63	-98
Eje Z	90	0	29,5	-97
	91	0	29,5	-96
	92	0	29,5	-95
	93	0	29,5	-94
	94	0	29,5	-93
	95	0	29,5	-90
	96	0	29,5	-80
	97	0	29,5	-70
	98	0	29,5	-50

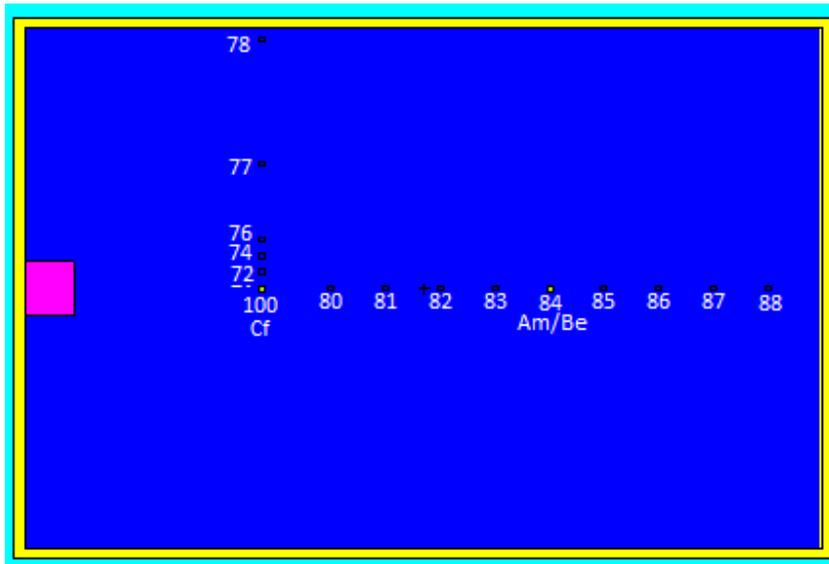


Figura 6.1: Disposición de las celdas detectoras en el modelo (planta).

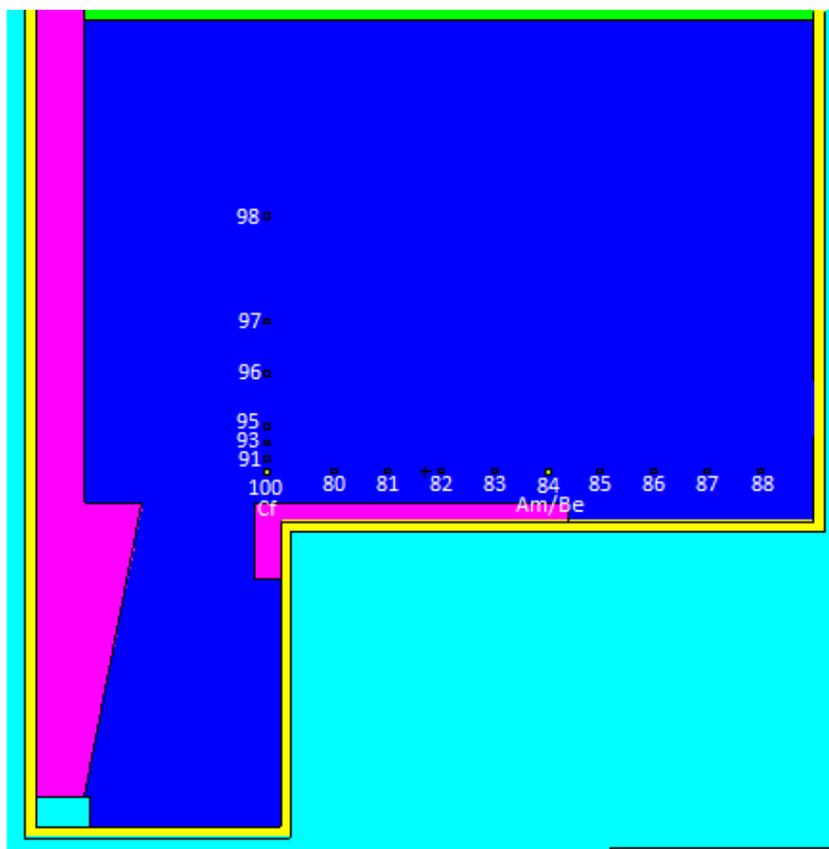


Figura 6.2: Disposición de las celdas detectoras en el modelo (alzado).

Nótese que en las figuras se ha omitido la representación de algunas de las celdas cercanas a las fuentes en favor de la claridad de la representación.

Las celdas y superficies correspondientes a la geometría para la caracterización se muestran en el *Anexo I: Input de MCNP, modelización de la geometría*.

## 6.1.2 Fuente

### 6.1.2.1 Posición de las fuentes

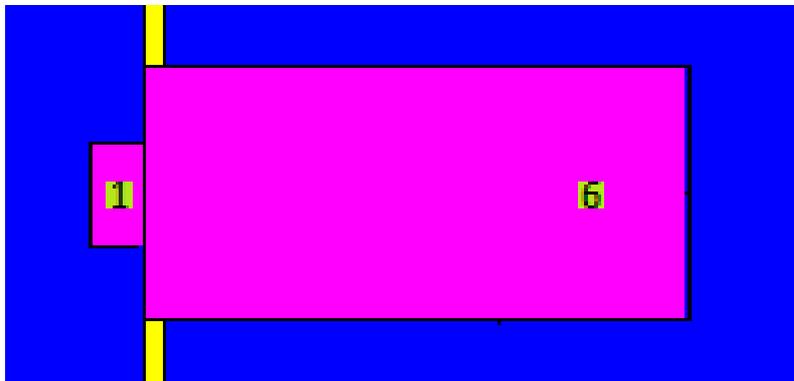
La fuente de  $^{252}\text{Cf}$  se coloca en la posición 1 del almacén de fuentes, ya que es la única que puede ocupar dada la geometría del portafuente, y la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  se coloca en la posición 6 del almacén de fuentes, por ser la posición más alejada y alineada con la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , lo que facilitará la observación de la contribución de cada fuente al campo neutrónico. Una visualización de las posiciones de las fuentes en el modelo se muestran en la y la , y las coordenadas se recogen en la Tabla 6-2.

### 6.1.2.2 Probabilidad de las fuentes

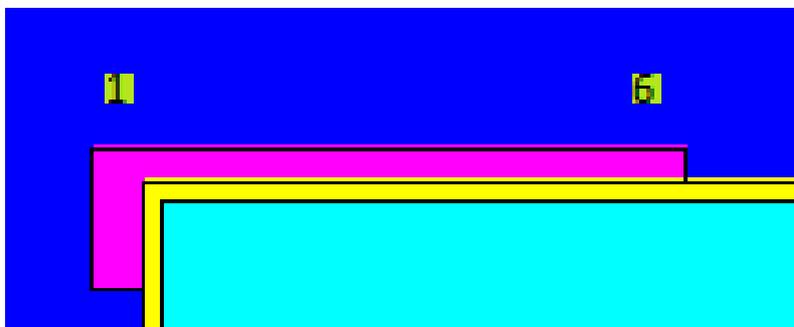
Los valores actuales de las tasas de emisión de las fuentes y las intensidades relativas correspondientes se recogen en la Tabla 6-2.

**Tabla 6-2: Posición, tasa de emisión actual e intensidad relativa actual de las fuentes para la caracterización.**

	Posición	(x, y, z) (cm)	Tasa emisión actual (n/s)	Intensidad relativa (%)
$^{252}\text{Cf}$	1	(0, 29,5, -98)	4,00E8	97,3
$^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$	6	(0, -23, -98)	1,11E7	2,7



**Figura 6.3: Posiciones del almacén de fuentes (planta).**



**Figura 6.4: Posición de las fuentes (alzado).**

### 6.1.3 Tallies

En la caracterización se va a usar dos tipos de tallies: el mesh tally tipo 1 y el tally F4.

#### 6.1.3.1 Mesh tallies

El mesh tally tipo 1 mide la fluencia neutrónica media normalizada por el número de partículas emitidas por la fuente a lo largo, ancho y alto de la piscina en un mallado rectangular tridimensional con espaciado de 1 cc que abarca la zona de irradiación de la piscina (ver Figura 6.5). Proporciona los resultados en  $\text{cm}^{-2}$ .

Estos datos se utilizarán para estudiar la distribución tridimensional de la fluencia neutrónica en el interior de la piscina.

La especificación de los mesh tallies se muestra en el *Anexo IX: Input de MCNP, mesh tallies para la caracterización*.

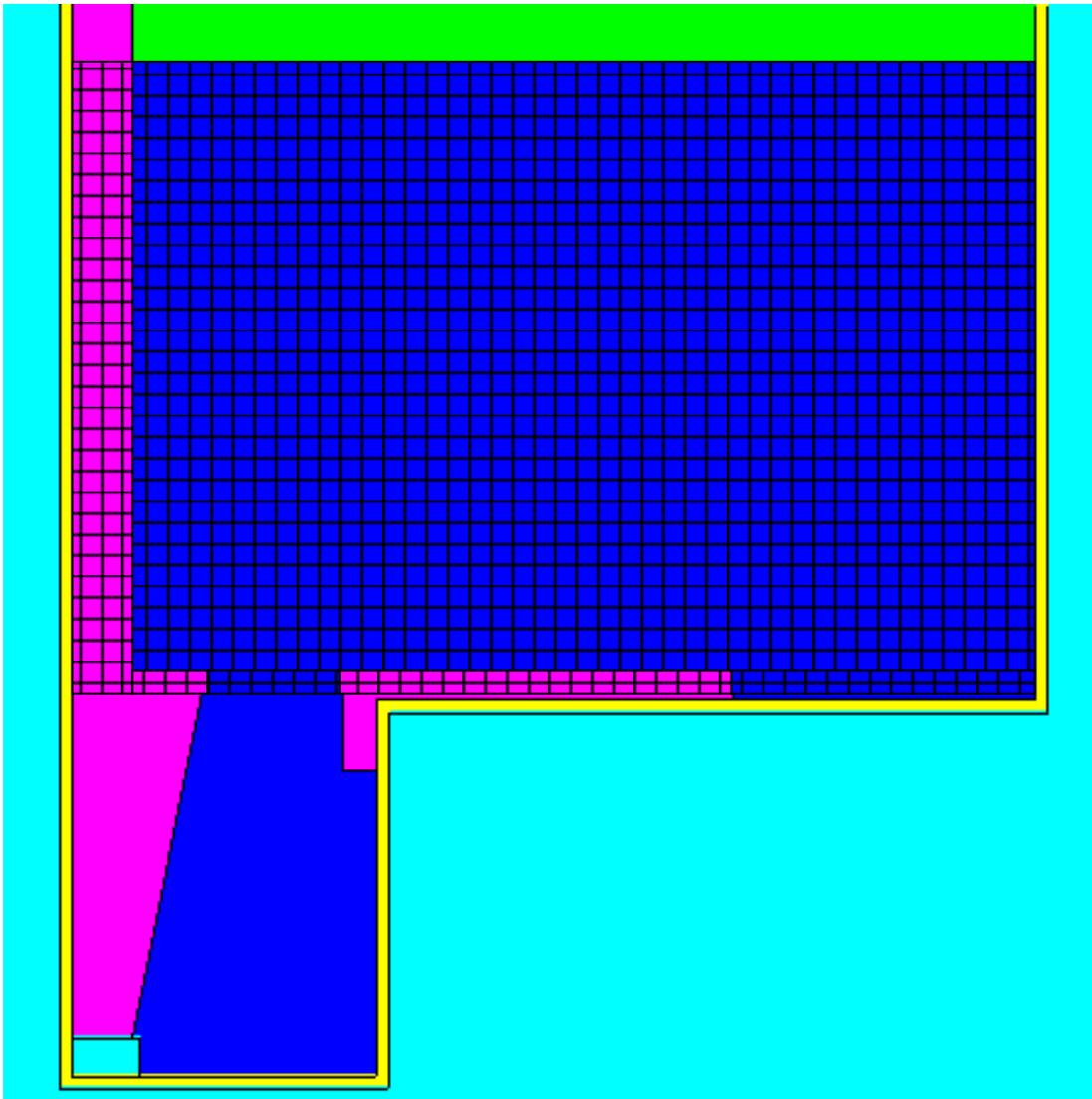


Figura 6.5: Mallado de los mesh tallies implementados en el modelo.

### 6.1.3.2 Tallies F4

Los tallies tipo F4 medirán la fluencia neutrónica en las celdas detectoras. Estos datos son los que se utilizarán para estudiar cómo varía la fluencia y los espectros neutrónicos a lo largo, ancho y alto de la piscina en función de la distancia a las fuentes.

Se utilizará un tally F4 en cada una de las celdas detectoras descritas en el apartado 6.1.1.1. Este tipo de tally mide la fluencia neutrónica normalizada por el número de partículas emitidas por la fuente, en  $\text{cm}^{-2}$ .

Los tallies medirán en un rango de energías de 0 a 100 MeV, y para poder visualizar los espectros se divide este rango en 200 intervalos espaciados logarítmicamente mediante un tally de energía. Los tallies F4 proporcionarán resultados en cada intervalo y en el rango total de energías.

Para estudiar la variación del espectro neutrónico en las distintas dimensiones se usan las siguientes celdas detectoras y tallies:

- A lo ancho de la piscina (eje x): celdas detectoras 7X y 100, tallies F7X4 y F004.
- A lo largo de la piscina (eje y): celdas detectoras 8X y 100, tallies F8X4 y F004.
- A lo alto de la piscina (eje z): celdas detectoras 9X y 100, tallies F9X4 y F004.

La especificación de los tallies F4 se muestra en el *Anexo X: Input de MCNP, tallies para la caracterización*. (Notación: 7X y F7X4 representan el conjunto de celdas y tallies detectores dispuestos a lo largo del eje x, siendo X = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Análogo para los ejes y y z).

### 6.1.4 Reducción de varianza y miscelánea

Con el objetivo de optimizar el tiempo de cálculo empleado en las simulaciones, se aplican las siguientes técnicas de truncamiento:

- La zona relevante para estudiar los campos neutrónicos dentro de la piscina del LPN se limita a la piscina, el hormigón que la rodea y el equipamiento que contiene. Por tanto se puede considerar que sea nula la importancia del escaso número de partículas que llegan al interior del laboratorio, habiendo previamente abandonado el interior de la piscina y atravesado la tapa de blindaje.
- MCNP invierte mucho tiempo de cálculo en el transporte de electrones, partículas que no tienen interés para el estudio que nos ocupa. Por tanto se puede considerar nula la importancia de estas partículas en todo el laboratorio.

## 6.2 Simulaciones

Para llevar a cabo la caracterización, se realiza una serie de cuatro simulaciones, cada una orientada a conseguir un objetivo concreto mediante adaptaciones específicas del modelo (ver Tabla 6-3).

En la Tabla 6-4 se muestra un resumen de las adaptaciones realizadas en el modelo que son comunes a todas las simulaciones.

**Tabla 6-3: Simulaciones realizadas para la caracterización.**

Simulación	Objetivo	Opción	Descripción	Valor
1	Distribución fluencia	Mesh tally	Todo el rango energético	1
2	Variación fluencia y espectros	Tallies F4	Celdas detectoras a lo ancho	F7X4, F004
3			Celdas detectoras a lo largo	F8X4, F004
4			Celdas detectoras a lo alto	F9X4, F004

**Tabla 6-4: Opciones de simulación comunes a todas las simulaciones para la caracterización.**

Descripción	Opciones	Valor
Geometría	Huelgo (mm)	5
	Hueco raíles	Con
	Almacén fuentes	Con
	Muesca	Con
	Lanzadera	Con
Fuentes	Probabilidad	0.973 0.027
	Posición <sup>252</sup> Cf	1
	Posición <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	6
Importancia	Electrones	Nula
	Exterior piscina	Nula

### 6.3 Distribución tridimensional de fluencia neutrónica

El objetivo de este apartado es estudiar la distribución general tridimensional de la fluencia en la zona de irradiación de la piscina.

Para ello, se representan gráficamente los resultados proporcionados por el mesh tally tipo 1, tal y como se describió en el apartado 6.1.3.1, a partir de la simulación 1 que se detalla en la Tabla 6-4. Concretamente, se representan tres cortes transversales de la piscina, según los planos que contienen la fuente de <sup>252</sup>Cf (ver Figura 6.6, Figura 6.7 y Figura 6.8).

Nótese que en estas figuras se presentan los resultados en dos magnitudes distintas:

- Fluencia neutrónica (cm<sup>-2</sup>sp<sup>-1</sup>): Son los resultados proporcionados directamente por MCNPX, que están normalizados por el número de partículas emitidas por la fuente (*per source particle, sp*). Nótese que estos resultados son independientes del tiempo, dado que son válidos sea cual sea la tasa de emisión de las fuentes.
- Tasa de fluencia neutrónica o flujo neutrónico (cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>): Son los resultados obtenidos teniendo en cuenta la tasa de emisión actual de las fuentes, por lo que representa la irradiación neutrónica real presente actualmente en la piscina del LPN.

Se puede observar como la distribución de la fluencia neutrónica presenta valores máximos en las posiciones donde se encuentran las fuentes, registrándose en estos puntos tasas de fluencia neutrónica del orden de  $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  y  $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  para las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  respectivamente. Estos resultados son coherentes con las tasas de emisión actuales de las fuentes.

A partir de estos valores máximos, se observa como la fluencia decrece a medida que nos alejamos de las fuentes, presentando este decrecimiento una simetría aproximadamente esférica, perturbada únicamente en los límites físicos de la piscina, donde la radiación neutrónica interactúa con los materiales estructurales de la piscina, y en la zona de la piscina que se encuentra entre las dos fuentes, debido a que en esta zona, la superposición de los campos neutrónicos generados por cada una de las fuentes se produce, lo suficientemente cerca de ambas, como para que las fluencias neutrónicas sean mayores que en puntos equivalentes pero fuera de esta zona intermedia.

Esto es coherente con la realidad, dado que la intensidad de la radiación decrece con la distancia al cuadrado a una fuente puntual, modificándose este comportamiento por la interacción con el medio y los materiales circundantes.

Así, la tasa de fluencia neutrónica decrece rápidamente desde los valores máximos expuestos hasta valores de aproximadamente  $10 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  en los límites de la piscina más cercanos a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  y hasta  $0,001 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  en los más alejados.

En las representaciones gráficas, los espacios en blanco dentro de la zona de irradiación se deben a que el código no cuenta con estadística suficiente como para proporcionar resultados en estas zonas. Sin embargo, dada la rápida disminución de la tasa de fluencia neutrónica a medida que aumenta la distancia a las fuentes, estas zonas no serán de excesivo interés para la irradiación de materiales, ya que las tasas de fluencias serán muy pequeñas, requiriendo tiempos de exposición muy grandes.

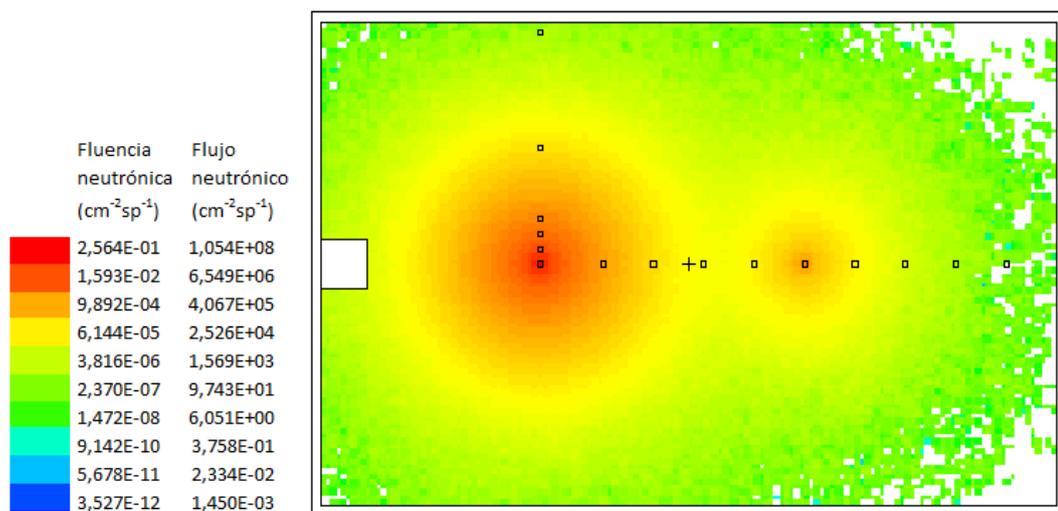


Figura 6.6: Distribución de la fluencia neutrónica en la zona de irradiación de la piscina, corte según el plano  $z = -98 \text{ cm}$ .

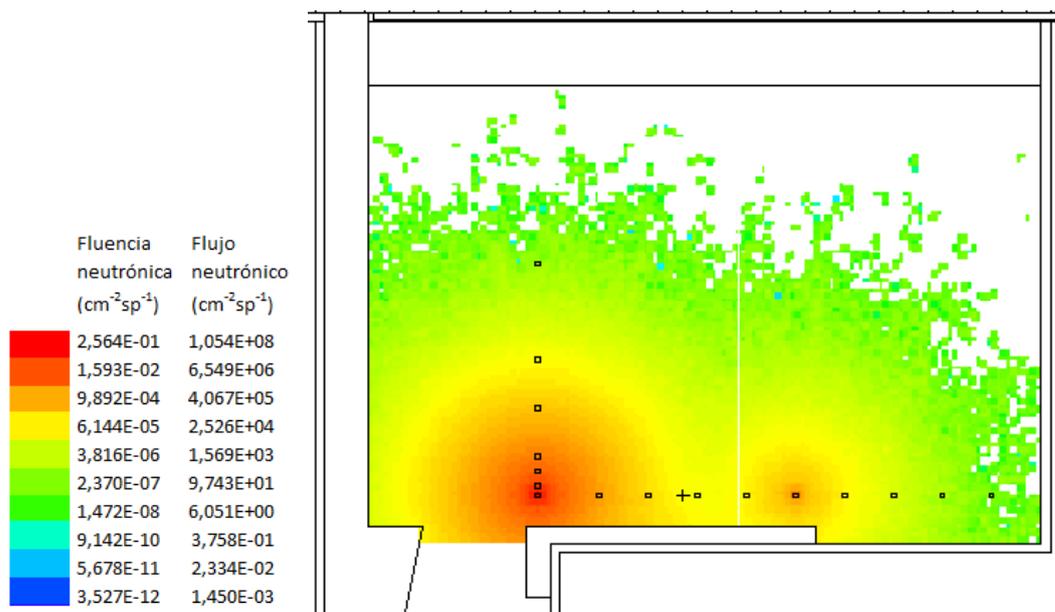


Figura 6.7: Distribución de la fluencia neutrónica en la zona de irradiación de la piscina, corte según el plano  $x = 0$ .

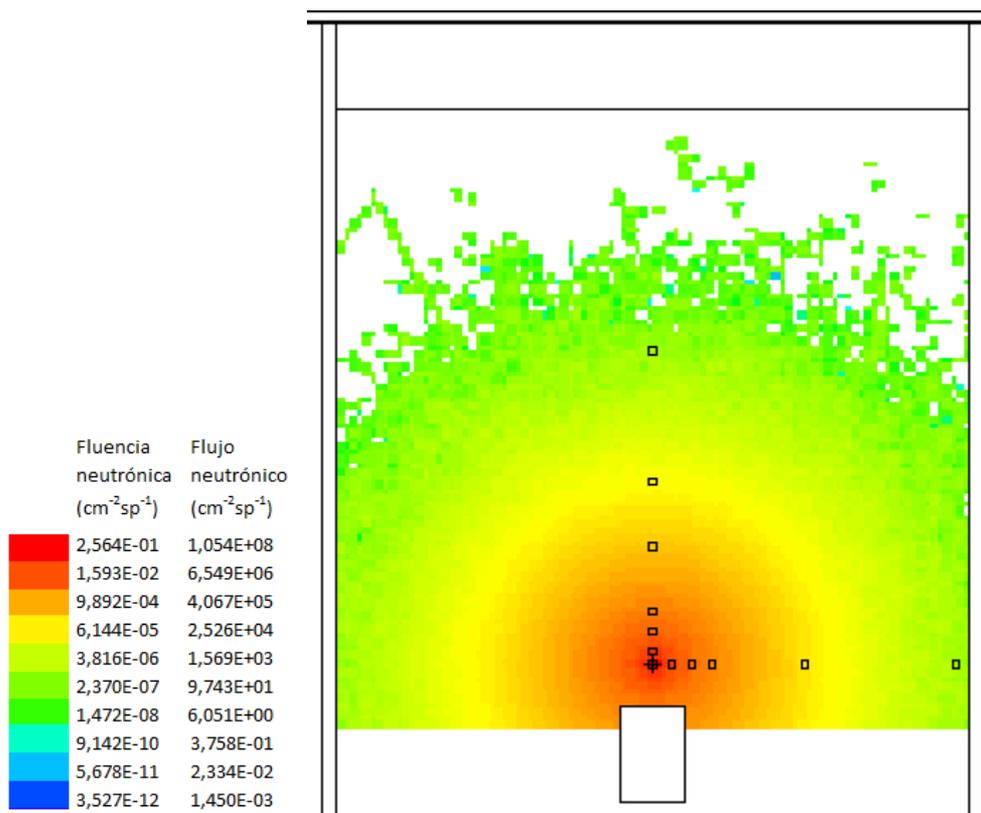


Figura 6.8: Distribución de la fluencia neutrónica en la zona de irradiación de la piscina, corte según el plano  $y = 29.5$  cm.

## 6.4 *Análisis preliminar*

El objetivo de este apartado es realizar un análisis preliminar del espectro neutrónico generado por las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  en la piscina del LPN, así como del proceso que es necesario seguir para representar los resultados proporcionados por MCNP de manera adecuada para poder realizar una interpretación de los mismos.

Para ello, se escoge una celda detectora de referencia que no esté ni demasiado cerca ni demasiado lejos de las fuentes, y fuera de la zona intermedia entre las fuentes, como por ejemplo, la celda detectora 92.

### 6.4.1 Representación tabular de resultados

El output de MCNP proporciona el espectro debido a las fuentes neutrónicas en forma de un conjunto de fluencias neutrónicas,  $\Phi_i$ , en unos determinados intervalos de energía, es decir, la fluencia neutrónica de los neutrones con energías entre  $E_i$  y  $E_{i-1}$ :

$$\Phi_i = \int_{E_{i-1}}^{E_i} \Phi_E dE$$

donde  $\Phi_E$  es la fluencia neutrónica espectral. El conjunto de fluencias neutrónicas está normalizado para ser por partícula de la fuente, es decir para una intensidad total de la fuente  $B=1\text{s}^{-1}$ :

$$\sum_{i=1}^n B_i = 1 \text{ s}^{-1}$$

Por ejemplo, en la Figura 6.9 siguiente se muestran parte de los resultados del tally 924, que mide la fluencia neutrónica en la celda detectora 92. La primera columna representa los intervalos de energía (MeV), especificados con el tally energía y la segunda columna presenta la fluencia neutrónica  $\Phi_i$  ( $\text{cm}^{-2}\text{sp}^{-1}$ ) que corresponde al intervalo de energía  $E_i-E_{i-1}$ , calculados por MCNPX.

### 6.4.2 Representación gráfica de resultados

El conjunto de valores de fluencia neutrónica son los datos físicos básicos para medidas y cálculos, sin embargo, son inapropiados para la representación gráfica del espectro, dado que sus valores dependes de los intervalos de energía elegidos arbitrariamente.

Si el espectro es continuo, la representación más común es la fluencia neutrónica espectral,  $\Phi_E=d\Phi/dE$ , vs. la energía,  $E$ , si la escala del eje x es lineal, o  $d\Phi/d(\ln E/E_0)$  si la escala es logarítmica.

```

cell 92
energy
1.0000E-09 7.21703E-06
1.1350E-09 1.54811E-06
1.2882E-09 3.31221E-06
1.4622E-09 1.92448E-06
1.6596E-09 3.48958E-06
1.8836E-09 4.08210E-06
2.1380E-09 5.68877E-06
2.4266E-09 7.60754E-06
2.7542E-09 8.22091E-06
3.1261E-09 1.08785E-05
3.5481E-09 1.58113E-05
4.0272E-09 1.59181E-05
4.5709E-09 2.78414E-05
5.1880E-09 3.25541E-05
5.8884E-09 3.66511E-05
6.6834E-09 5.12264E-05
7.5858E-09 5.80066E-05
8.6099E-09 7.85151E-05
9.7724E-09 9.43370E-05
1.1092E-08 1.35038E-04
1.2589E-08 1.34984E-04
1.4289E-08 1.77104E-04
1.6218E-08 2.14068E-04
1.8408E-08 2.33688E-04
2.0893E-08 2.87886E-04
2.3714E-08 3.26924E-04
2.6915E-08 3.61387E-04
3.0549E-08 4.29976E-04

```

**Figura 6.9: Presentación tabular de los resultados, tal y como se muestran en el output de MCNPX.**

Teniendo en cuenta que  $d\Phi/d(\ln E/E_0) = E \cdot d\Phi/dE = E \cdot \Phi_E$ , el espectro puede ser dibujado de manera que áreas iguales bajo la curva representen fluencias neutrónicas iguales. En este caso, dada la presentación tabular de los datos como se ha explicado en el apartado anterior, el espectro es discreto. Por tanto, las curvas serán histogramas que reflejan el conocimiento restringido de la forma espectral. En una gráfica con el eje de abscisas lineal, la ordenada se deriva como  $\Phi_E = \Delta\Phi/\Delta E = \Phi_E/(E_i - E_{i-1})$ . En una gráfica con el eje de abscisas logarítmico, la ordenada se deriva como  $E_n \Phi_E = \Phi_i/\ln(E_i/E_{i-1})$ .

De acuerdo con estos criterios, en la Figura 6.10 se muestra el espectro neutrónico resultante en la celda 92.

### 6.4.3 Análisis preliminar del espectro neutrónico

Este espectro neutrónico tiene regiones claramente diferenciadas: un pico de neutrones térmicos (0.001 eV - 0.1 eV), una región de fondo neutrónico (0.1 eV - 0.01 MeV) y un pico de neutrones rápidos (0.01 MeV - 10 MeV).

#### 6.4.3.1 Pico de neutrones rápidos

Las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  emiten neutrones rápidos con una distribución energética como la que se muestra en la Figura 6.11. Este es el origen del pico de neutrones rápidos observado en el espectro.

Espectro preliminar

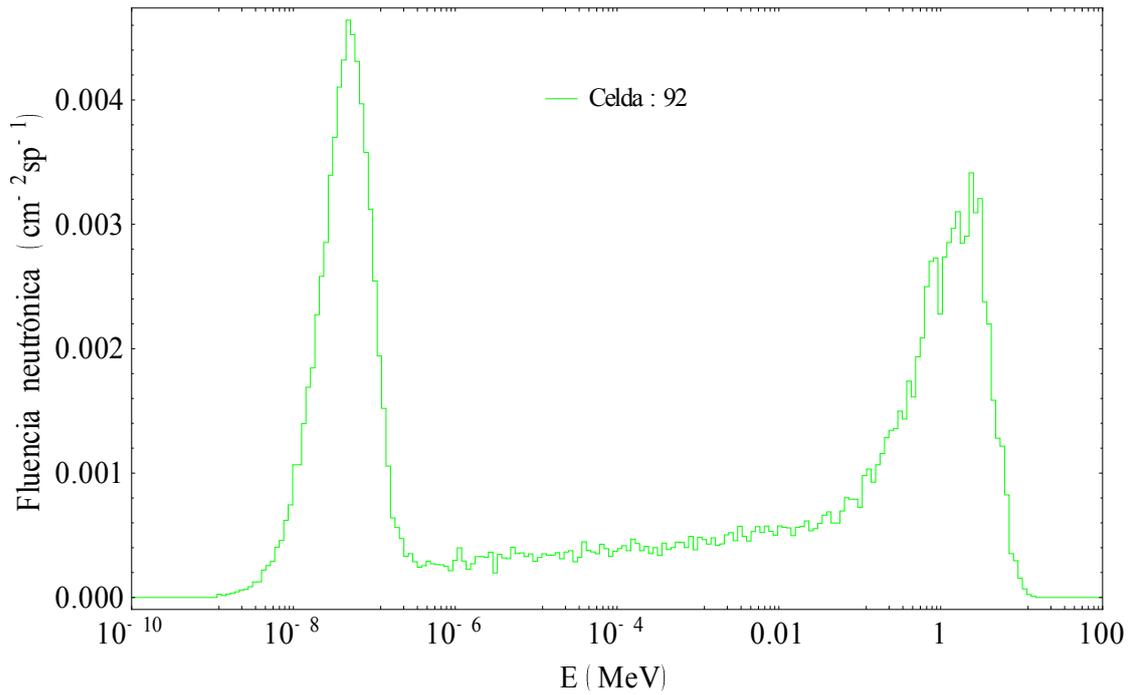


Figura 6.10: Espectro neutrónico en la celda 92.

Debido a la presencia simultánea de ambas fuentes, la distribución energética de los neutrones rápidos resultará de la superposición de los espectros característicos de ambas fuentes, tal y como se puede apreciar si se comparan la Figura 6.10 con la Figura 6.11.

Espectros Cf- 252 y Am- 241/ Be- 9

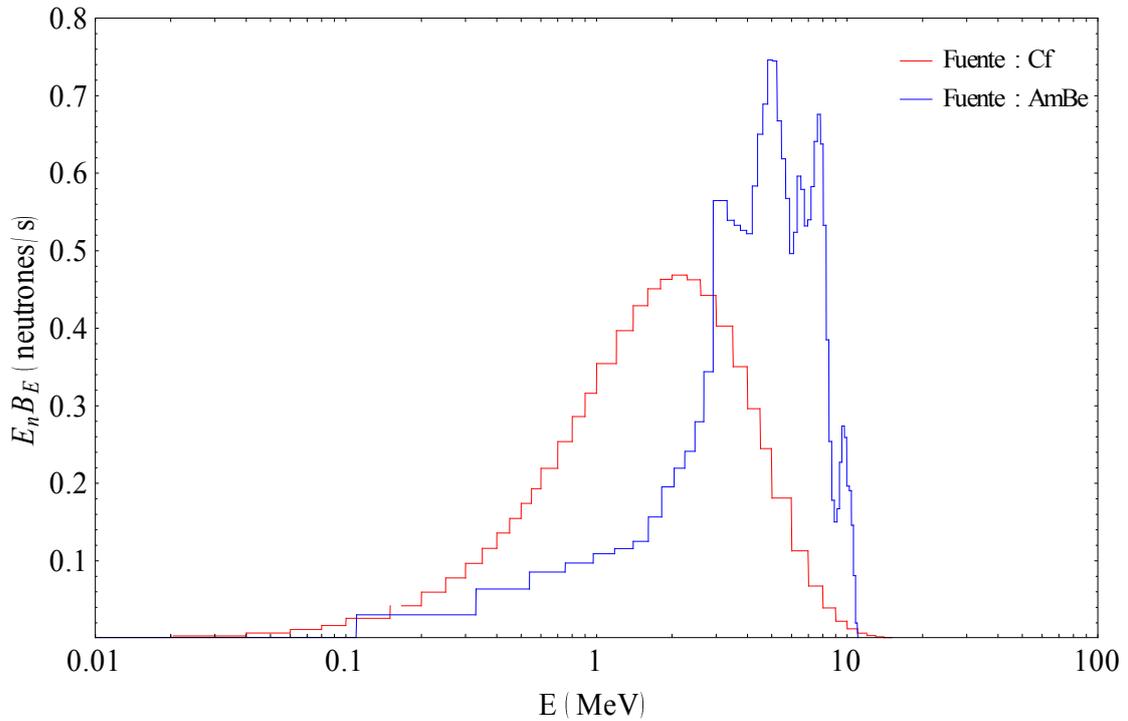


Figura 6.11: Espectros neutrónicos de referencia de las fuentes de <sup>252</sup>Cf y de <sup>241</sup>Am-<sup>9</sup>Be.

### **6.4.3.2 Fondo de neutrones**

Si se coloca una fuente de neutrones en un moderador de agua ligera relativamente grande, como es el caso que estamos estudiando, la mayoría de los neutrones rápidos emitidos por la fuente serán dispersados por los núcleos de hidrógeno. Una pequeña fracción serán dispersados por el oxígeno, y una fracción mucho más pequeña serán dispersados por los materiales circundantes.

Como consecuencia de estas colisiones, los neutrones van perdiendo energía. Este es el origen del fondo de neutrones observados en el espectro entre los dos picos.

### **6.4.3.3 Pico de neutrones térmicos**

Después de un determinado número de colisiones, los neutrones alcanzan la energía cinética media de los átomos o moléculas del medio, pasando a ser neutrones térmicos. Este es el origen del pico de neutrones térmicos observado en el espectro, así como del fondo de neutrones de energías intermedias.

La forma del pico de neutrones térmicos se ajusta a la distribución de Maxwell-Boltzman, que rige la distribución energética de los neutrones a bajas energías. Este pico presenta su máximo aproximadamente en 0,04 eV, que corresponde a una temperatura de unos 35°C aproximadamente, lo cual es coherente con la realidad dado que el agua de la piscina se mantiene a una temperatura más o menos constante de unos 30°C mediante un sistema de recirculación y refrigeración.

### **6.4.3.4 Efecto de la distancia a las fuentes**

Por otro lado, la mayoría de los neutrones emitidos por la fuente serán capturados por los núcleos de hidrógeno después de la moderación, principalmente en la región de la energía térmica. Una pequeña fracción de neutrones serán capturados antes de la moderación, y una fracción mucho más pequeña será capturado por el oxígeno en el agua, materiales de aparatos y materiales de la fuente. Algunos neutrones también abandonarán el moderador.

A la vista de estos aspectos, el efecto de la distancia a las fuentes debe sentirse principalmente en el tamaño de los picos y en la forma del pico de neutrones rápidos. El tamaño de los picos debe disminuir con la distancia a las fuentes, a medida que más neutrones rápidos son dispersados y más neutrones térmicos son capturados, y la forma del pico de neutrones rápidos debe aproximarse más al espectro característico del  $^{252}\text{Cf}$  o del  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  en función de la distancia relativa a ambas fuentes.

En regiones cercanas a las fuentes, el tamaño del pico de neutrones rápidos será mayor que el pico de neutrones térmicos, dado que en estas regiones solo los neutrones emitidos con menores energías alcanzan la termalización. En regiones lejanas a las fuentes la situación será inversa.

### 6.4.4 Desarrollo de un modelo de interacción de los neutrones con la materia

Considérese una fuente puntual que emite  $N$  neutrones; asumiendo la propagación isótropa de estos, la fluencia total que se mediría a una distancia  $x$  de dicha fuente sería:

$$\phi = N \frac{1}{4\pi x^2}$$

Si se introduce esta fuente puntual en un medio material, la propagación y atenuación del campo neutrónico vendrá condicionada ahora por la manera en que los neutrones interaccionen con las moléculas de dicho medio.

Supongamos que un neutrón con energía  $E_1$  y sección eficaz macroscópica de interacción con las moléculas del medio  $\Sigma_1$  es emitido desde la fuente; recorrida una distancia  $x$ , la probabilidad de que éste no haya interactuado con una molécula del medio es:  $e^{-\Sigma_1 x}$ , y por lo tanto, la probabilidad de que sí haya interactuado es:  $(1 - e^{-\Sigma_1 x})$ . Para una sección eficaz de 0,1 cm, esto se puede ver gráficamente de la siguiente manera:

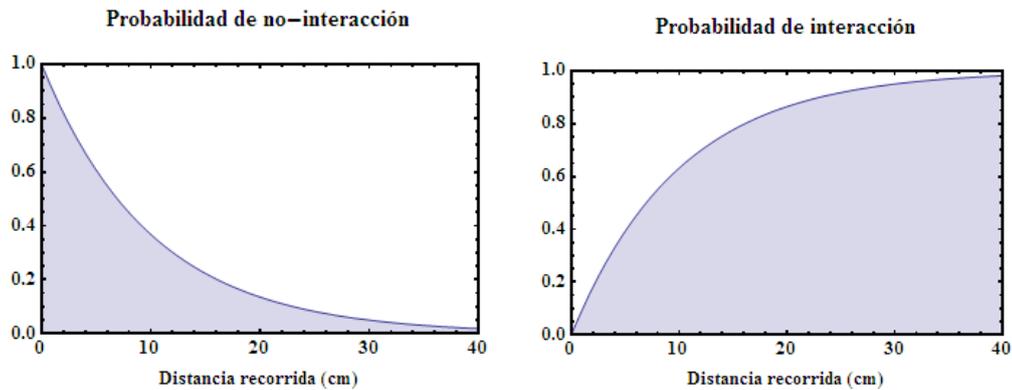


Figura 6.12: Probabilidades de interacción de un neutrón.

Así pues, si se asume que la fuente solamente emite neutrones con energía  $E_1$ , la cantidad de neutrones que no han interactuado con el medio y que por lo tanto conservan su energía será  $N e^{-\Sigma_1 x}$ , y la fluencia de estos neutrones rápidos seguirá la expresión:

$$\phi = N \frac{e^{-\Sigma_1 x}}{4\pi x^2}$$

Supóngase ahora que este neutrón ha interactuado ya con una molécula del medio y su energía ha disminuido de  $E_1$  a  $E_2$ ; la probabilidad de que se propague sin interactuar con el medio será ahora  $e^{-\Sigma_2 x}$ , donde  $\Sigma_2$  es la sección eficaz asociada a la nueva energía del neutrón. Si combinamos las probabilidades de no interacción e interacción, la probabilidad de que un neutrón emitido inicialmente por la fuente con energía  $E_1$  tenga una colisión inicial (reduciendo su energía a  $E_2$ ) y más tarde se propague sin interactuar con el medio será:  $(1 - e^{-\Sigma_1 x}) e^{-\Sigma_2 x}$ . Por lo tanto, la expresión de la fluencia de neutrones con energía  $E_2$  tomará la forma:

$$\phi = N \frac{(1 - e^{-\Sigma_1 x}) e^{-\Sigma_2 x}}{4\pi x^2}$$

Considerando n energías  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , y considerando también que un neutrón ha de sufrir una cadena de n-1 interacciones para llegar de la energía  $E_1$  a la energía  $E_n$ , la fluencia asociada a neutrones con energía  $E_n$  será:

$$\phi = N \frac{(1 - e^{-\Sigma_1 x}) (1 - e^{-\Sigma_2 x}) \dots (1 - e^{-\Sigma_{n-2} x}) (1 - e^{-\Sigma_{n-1} x}) e^{-\Sigma_n x}}{4\pi x^2}$$

Donde las  $\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_n$ , son las secciones eficaces asociadas a cada una de las energías  $E_1, E_2, \dots, E_n$ .

Considérese ahora los tres grupos de energías diferenciados en el apartado anterior para cada una de las regiones del espectro neutrónico. Los neutrones rápidos emitidos por la fuente, después de recorrer una determinada distancia alcanzan el rango de las energías térmicas, es decir, se termalizan; esto sucede, según el modelo presentado anteriormente, después de un número suficiente de colisiones, lo que genera en el camino un fondo de neutrones de energías intermedias. Así pues, la fluencia de neutrones rápidos será:

$$\phi = N \frac{e^{-\Sigma_{\text{rápido}} x}}{4\pi x^2}$$

Donde  $\Sigma_{\text{rápido}}$  es la sección eficaz efectiva que engloba todo el rango de energías de los neutrones rápidos. La fluencia de neutrones térmicos se aproxima como:

$$\phi = N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{\text{conversión}} x})^{\text{pasos}} e^{-\Sigma_{\text{térmico}} x}}{4\pi x^2}$$

Donde se ha considerado que “ *pasos* ” es el número de interacciones que un neutrón rápido necesita para termalizar, y que  $\Sigma_{\text{conversión}}$  es la sección eficaz efectiva de estas interacciones intermedias.  $\Sigma_{\text{térmico}}$  es la sección eficaz de atenuación de los neutrones térmicos.

Por último, la fluencia total será la suma de la fluencia de neutrones rápidos, neutrones de fondo, y neutrones térmicos. Como no se ha deducido una expresión para los neutrones de fondo, se aproxima la fluencia de estos como una fracción de la fluencia de los térmicos. Se ha comprobado con la simulación que ambas fluencias siguen un comportamiento con la distancia a la fuente muy similar, por lo que esta aproximación debería servir para su propósito. La expresión de la fluencia total queda:

$$\phi = N \left( \frac{e^{-\Sigma_{\text{rápido}} x}}{4\pi x^2} + \frac{(1 - e^{-\Sigma_{\text{conversión}} x})^{\text{pasos}} e^{-\Sigma_{\text{térmico}} x}}{4\pi x^2} (1 + \text{frac}) \right)$$

Donde “ *frac* ” da cuenta de la cantidad de neutrones de fondo obtenidos a partir de la distribución de neutrones térmicos.

## 6.5 Distribución de fluencia neutrónica a lo ancho de la piscina

El objetivo de este apartado es estudiar la distribución espacial de la fluencia y la variación del espectro del campo neutrónico generado por las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  a lo ancho de la piscina del LPN.

Para ello se realiza una simulación número 2 que se detallan en la Tabla 6-3. Los valores de la fluencia neutrónica para la distribución y los espectros se obtienen de los tallies F4 situados en las celdas detectoras distribuidas a lo ancho de la piscina. La disposición de las celdas detectoras se muestran en la Figura 6.1 y sus coordenadas en la Tabla 6-1. La disposición de las fuentes se muestra en la Figura 6.3 y la Figura 6.4 y sus coordenadas en la Tabla 6-2.

### 6.5.1 Efecto de la distancia a las fuentes en la fluencia neutrónica

En función del rango energético considerado, se distinguen tres tipos de fluencia:

- Fluencia total: Fluencia en todo el rango de energías considerado (0 - 100 MeV).
- Fluencia térmica: Fluencia en el rango de energías del pico térmico (0,001 eV – 0,1 eV).
- Fluencia característica: Fluencia en el rango de energías del pico de neutrones rápidos característico de las fuentes (0,01 a 10 MeV).

La fluencia neutrónica total, característica y térmica para cada celda detectora considerada a lo largo del eje x se muestran en la Tabla 6-5. La variación de la fluencia con la distancia a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  a lo ancho de la piscina se muestra en la Figura 6.13.

**Tabla 6-5: Fluencia neutrónica total, característica y térmica para las celdas detectoras lo largo del eje x.**

Celda detectora	$\Phi_{\text{total}}$ ( $\text{cm}^{-2}\text{sp}^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{\text{total}}$ ( $\text{cm}^{-2}\text{sp}^{-1}$ )	$\Phi_{\text{característica}}$ ( $\text{cm}^{-2}\text{sp}^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{\text{característica}}$ ( $\text{cm}^{-2}\text{sp}^{-1}$ )	$\Phi_{\text{térmica}}$ ( $\text{cm}^{-2}\text{sp}^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{\text{térmica}}$ ( $\text{cm}^{-2}\text{sp}^{-1}$ )
100	0,6394	0,0006	0,6167	0,0006	0,00932	0,00006
70	0,1077	0,0003	0,0900	0,0002	0,00912	0,00006
71	0,0379	0,0002	0,0228	0,0001	0,00878	0,00006
72	0,0225	0,0001	0,00998	0,00009	0,00791	0,00006
73	0,01585	0,00009	0,00525	0,00006	0,00718	0,00005
74	0,01178	0,00008	0,00312	0,00005	0,00619	0,00005
75	0,00903	0,00007	0,00195	0,00004	0,00529	0,00004
76	0,00416	0,00004	0,00061	0,00002	0,00290	0,00003
77	0,000145	0,000007	0,000009	0,000002	0,000123	0,000006
78	0,0000004	0,0000003	0	0	0,0000004	0,0000003

Variación de la fluencia neutrónica a lo ancho de la piscina

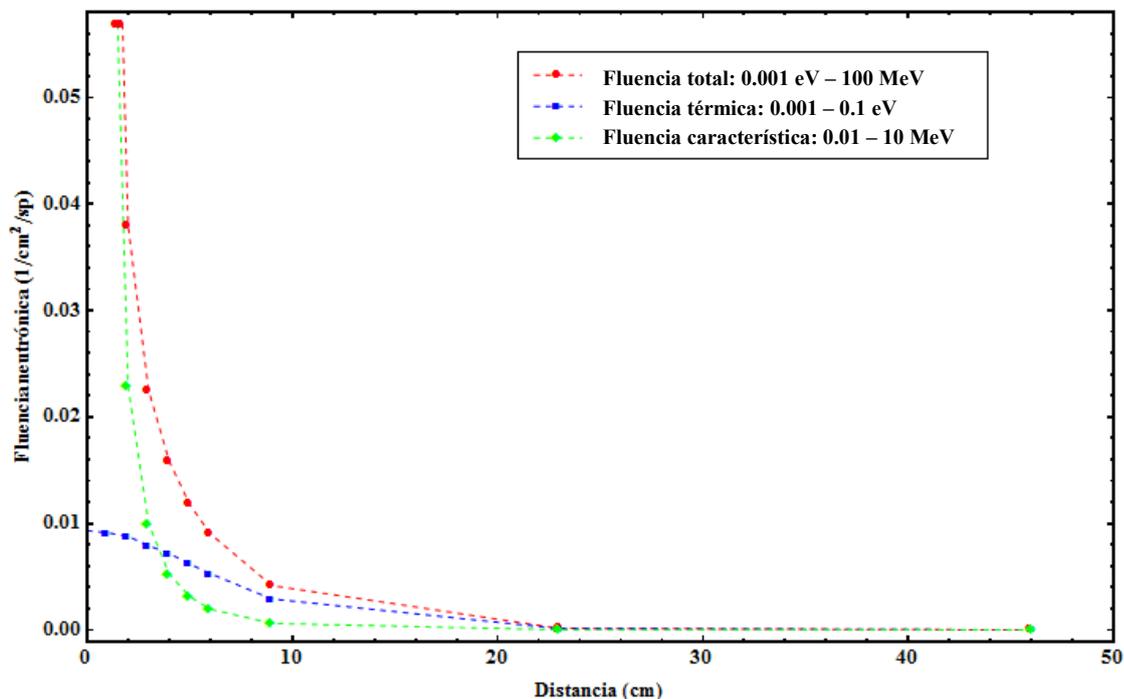


Figura 6.13: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  a lo ancho de la piscina.

### 6.5.1.1 Análisis cualitativo

Para analizar la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina, se va realizar un ajuste semi-fenomenológico de los datos obtenidos de las simulaciones, basándonos en el modelo para la interacción de los neutrones con la materia expuesto en el apartado de Fundamentos.

Nótese que existe un plano de simetría en  $x=0$ , por lo que solo se analiza el comportamiento en una de las mitades del ancho de la piscina. El comportamiento en la otra mitad es análogo.

En el caso que nos ocupa, se dispone de dos fuentes isotrópicas emitiendo en un medio moderador (el agua de la piscina), sin embargo se puede considerar como un caso de fuente única puntual si se tienen en cuenta el razonamiento que se expone a continuación: por un lado, las celdas detectoras están alineadas en el eje x con la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  a distancias de la misma desde 0 a 46 cm, y la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  se encuentra alineada en el eje y con la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  a 52 cm de la misma; por tanto, a medida que nos desplazamos en el eje x a lo ancho de la piscina nos estamos alejando de ambas fuentes simultáneamente. Además, la intensidad de la fuente (la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ ) con la que se encuentran alineadas las celdas detectoras es unas 36 veces mayor que la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .

Por tanto, al estudiar la distribución de fluencia a lo largo del eje x, se puede considerar como aproximación que se dispone de una única fuente situada en la posición de la fuente del <sup>252</sup>Cf.

Esta situación se ilustra en la Figura 6.6, la Figura 6.7 y la Figura 6.8. A medida que nos alejamos de la fuente de <sup>252</sup>Cf a lo ancho de la piscina, se puede observar cómo se mantiene la simetría esférica a medida que los neutrones emitidos por las fuentes se dispersan en el agua de la piscina. Nótese que esta simetría también se mantiene para el eje z, a lo alto de la piscina.

Los modelos para las fluencias, característica, térmica y total para una fuente única eran:

$$\phi_{característica} = N \frac{e^{-\Sigma_{rápido} x}}{4\pi x^2}$$

$$\phi_{térmica} = N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{conversión} x})^{pasos} e^{-\Sigma_{térmico} x}}{4\pi x^2}$$

$$\phi = N \left( \frac{e^{-\Sigma_{rápido} x}}{4\pi x^2} + \frac{(1 - e^{-\Sigma_{conversión} x})^{pasos} e^{-\Sigma_{térmico} x}}{4\pi x^2} (1 + frac) \right)$$

A partir de los datos de las simulaciones se obtienen los siguientes ajuste para las fluencias característica y térmica (Ver Figura 6.15):

$$\phi_{característica} = N \frac{e^{-\Sigma_{rápido} x}}{4\pi x^2} = \frac{1.8e^{-0.14x}}{4\pi x^2}$$

$$\phi_{térmica} = N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{conversión} x})^{pasos} e^{-\Sigma_{térmico} x}}{4\pi x^2} = \frac{1.8e^{-0.13x}(1 - e^{-0.16x})^{2.69.5}}{4\pi x^2}$$

Estos ajustes pueden parecer contradictorios si se tienen en cuenta que los resultados para la fluencia proporcionados por el tally tipo F4 están normalizados por el número de partículas emitidas por la fuente, por tanto, debería ser N=1. Sin embargo, esta contradicción se resuelve teniendo en cuenta que, al estar considerando la simplificación de una fuente puntual única en la aplicación de nuestro modelo de la interacción neutrónica con la materia, estos ajustes representan las fluencias característica y térmica debidas a una fuente equivalente que emite N=1,8 neutrones y que se encuentra inmersa en un medio material de sección eficaz efectiva de atenuación de  $\Sigma_{rápido} = 0,14 \text{ cm}^{-1}$  para el rango de neutrones rápidos, de  $\Sigma_{térmico} = 0,13$  para el rango de neutrones térmicos y de  $\Sigma_{conversión} = 0,16 \text{ cm}^{-1}$ .

### Ajuste de la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina

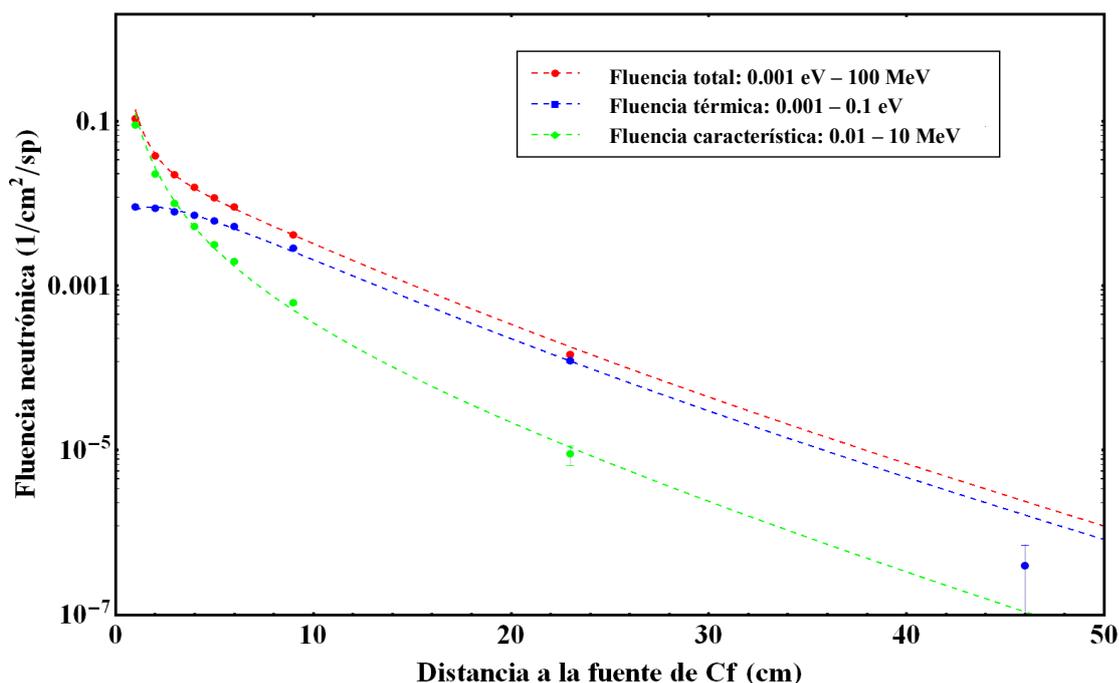


Figura 6.14: Ajustes realizados de los puntos experimentales para la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina.

Como puede observarse, para la fluencia característica el ajuste encaja con los datos de las simulaciones. Sin embargo, para la fluencia térmica, se observa que hay que introducir un factor de 9,5 para que el ajuste y los datos de las simulaciones coincidan, es decir, el comportamiento de los neutrones térmicos se ve relegado en el ajuste, pero hay un exceso de neutrones térmicos. Esto puede deberse a que la contribución a la medida de los neutrones térmicos en las celdas detectoras no proviene únicamente de los neutrones termalizados procedentes directamente de la fuente, sino también de aéreas adyacentes a la celda detectora. Por ello, denominaremos a este factor exceso de neutrones térmicos,  $\Delta_{t\acute{e}rminos}$ .

Si se aplica el modelo con estos parámetros a la distribución de la fluencia total se obtienen el ajuste:

$$\begin{aligned} \phi &= N \left( \frac{e^{-\Sigma_{r\acute{a}pido} x}}{4\pi x^2} + \frac{(1 - e^{-\Sigma_{conversi\acute{o}n} x})^{pasos} e^{-\Sigma_{t\acute{e}rmico} x} \Delta_{t\acute{e}rminos}}{4\pi x^2} (1 + frac) \right) \\ &= 1.8 \frac{e^{-0.14x}}{4\pi x^2} + \frac{(1 - e^{-0.16x})^{2.6} e^{-0.13x} 9.5}{4\pi x^2} 1.4 \end{aligned}$$

Como se puede comprobar, la fluencia se ajusta al comportamiento descrito por este modelo con los parámetros indicados.

### 6.5.1.2 Análisis cuantitativo

Observemos de nuevo la variación de las fluencias total, térmica y característica a lo ancho de la piscina. En ella se observan el punto de corte entre las fluencias térmica y característica, que indica que las fluencias característica y térmicas son iguales.

Esto subdivide la distribución de fluencia a lo ancho de la piscina en tres regiones:

- Región característica:
  - Esta región se extiende de 0 a 3,5 cm de la fuente aproximadamente.
  - En esta región la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes es mayor que la debida a los neutrones térmicos.
  - Esto se debe a que en esta región, próxima a las fuentes, sólo una pequeña parte de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes recorren la distancia suficiente para alcanzar la termalización.
- Región térmica:
  - Esta región se extiende de 3,5 a 48 cm de la fuente aproximadamente
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - Esto se debe a que, a medida que nos alejamos de las fuentes, la cantidad de neutrones rápidos emitidos por las fuentes que recorren la distancia suficiente para alcanzar la termalización aumenta. Recorrida la distancia suficiente, el numero de neutrones térmicos, superará al número de neutrones rápidos.

Ya que el caso objeto de estudio, de análisis de la distribución de la fluencia en el eje x, se puede tratar como una fuente puntual, se puede representar la fluencia multiplicada por la distancia a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  al cuadrado para poder analizar por separado el comportamiento de la fluencia debido a la propagación del campo en un medio material (el agua de la piscina) (ver Figura 6.15).

En función de esta grafica, la distribución de la fluencia neutrónica a lo ancho de la piscina se puede dividir en dos regiones:

- Región de termalización:
  - Esta región se extiende de aproximadamente de 0 a 9 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x.
  - Esta región se caracteriza por el aumento de la fluencia térmica a medida que nos alejamos de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  en la grafica  $\Phi \cdot r^2$  vs r.
  - Esto se debe a que, a medida que nos alejamos de las fuentes, la cantidad de neutrones rápidos emitidos por las fuentes que recorren la distancia suficiente para alcanzar la termalización aumenta.

- Es decir, en esta región predomina la termalización de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes sobre la atenuación de los neutrones térmicos.

**Variación de la fluencia neutrónica a lo ancho de la piscina**

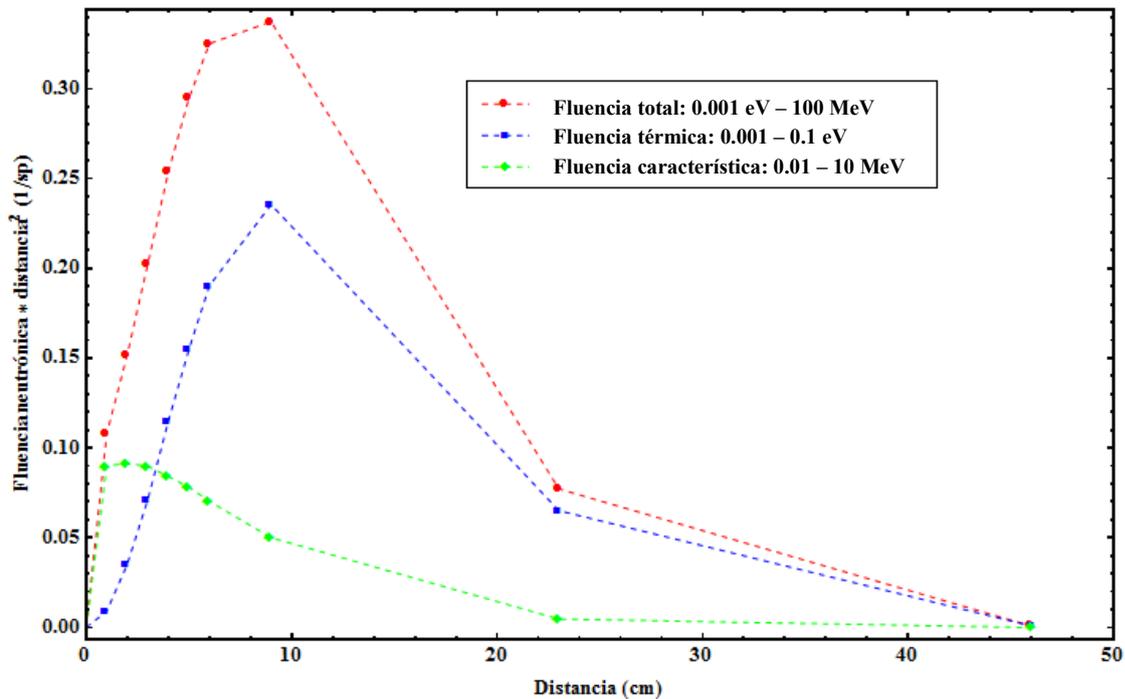


Figura 6.15: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de <sup>252</sup>Cf a lo ancho de la piscina, debida a la propagación en un medio material moderador.

- Región de atenuación:
  - Esta región se extiende de aproximadamente de 9 a 48 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x.
  - Esta región se caracteriza por la disminución de la fluencia térmica a medida que nos alejamos de la fuente de <sup>252</sup>Cf en la grafica  $\Phi \cdot r^2$  vs r.
  - Esto se debe a que, una vez que la mayor parte de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes se han termalizado, a medida que nos alejamos más de las fuentes, la cantidad de neutrones térmicos disminuye por atenuación con la distancia.
  - Es decir, en esta región predomina la atenuación de los neutrones térmicos sobre la termalización de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes.

En ambas regiones, la fluencia característica decrece según la ecuación de atenuación de neutrones rápidos.

Por tanto, la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina en función del tipo de radiación dominante y del comportamiento de la misma se puede dividir en tres regiones:

- Región característica de termalización:
  - En esta región la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes es mayor que la debida a los neutrones térmicos.
  - El decrecimiento de la fluencia vine marcado por la atenuación de los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - Esta región se extiende de 0 a 3,5 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente.
- Región térmica de termalización
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - El decrecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes, por lo que se ve ralentizado.
  - Esta región se extiende de 3,5 a 9 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente.
- Región térmica de atenuación
  - En esta región la fluencia debida mayoritariamente a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - El decrecimiento de la fluencia vienen marcado por la atenuación de los neutrones térmicos.
  - Esta región se extiende de 9 a 48 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente.

Estos análisis proporcionan una información somera sobre la distribución energética de las fluencia obtenidas. Para conocer con más detalle esta distribución energética se analiza el efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico.

### **6.5.2 Efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico**

Respecto a los espectros, el significado de los dos puntos significativos descritos en el apartado anterior se interpreta como sigue:

- El punto de corte entre las fluencias térmica y característica indica que los picos térmico y característico encierran la misma área. Si los picos térmico y característico tuviesen la misma forma, teniendo en cuenta que el rango de energías para el pico es de 0,193 eV y para el pico característico es de 9,99 MeV, esto se traduciría en que la altura del pico térmico sería unas dos veces mayor que la del pico característico. En el análisis que se realiza a continuación, cuando se

habla compara el tamaño de los picos térmico y característico nos estamos refiriendo al área de los mismos.

- El punto en el que la fluencia térmica presenta un máximo en la gráfica  $\Phi \cdot r^2$  vs  $r$ , indica el punto en el que el área del pico térmico relativa a la del pico característico pasa de crecer a decrecer. La variación en el tamaño relativo de los picos representa un cambio en la distribución energética de la fluencia a medida que nos alejamos de las fuentes.

Por tanto, atendiendo a la división realizada en el apartado anterior, se va a realizar un análisis cualitativo de la variación del espectro neutrónico a lo ancho de la piscina. Los espectros obtenidos en las celdas detectoras a lo largo del eje x se muestran en la Figura 6.16

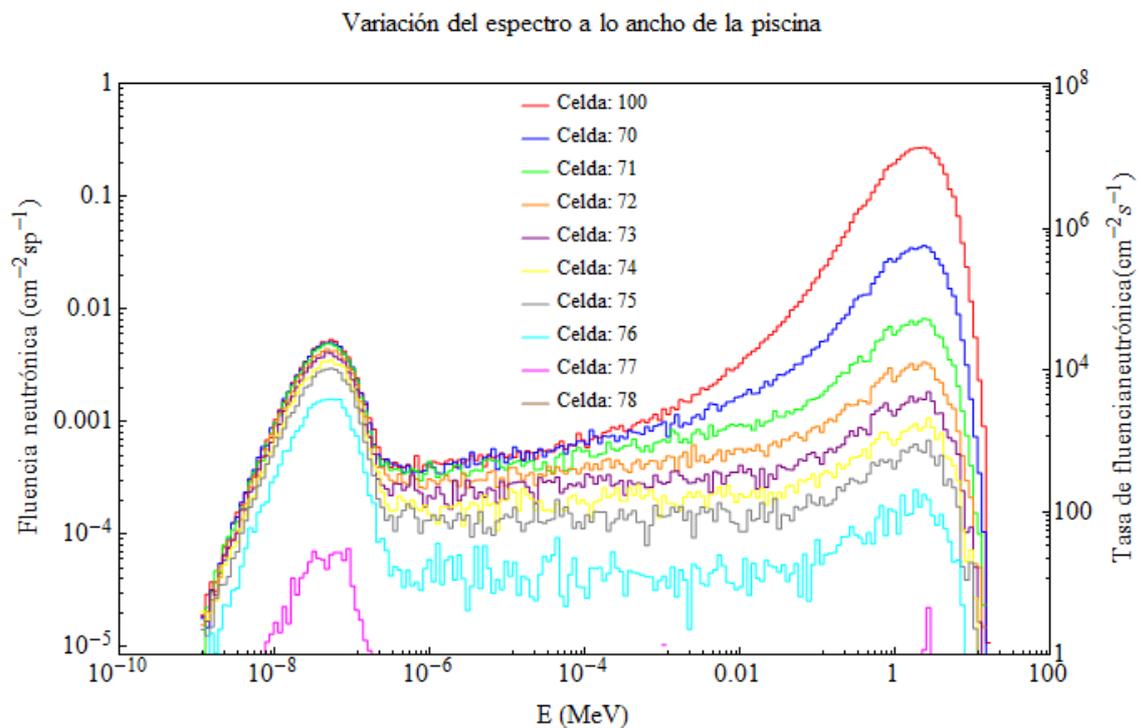


Figura 6.16: Variación del espectro neutrónico a lo ancho de la piscina (dimensión x).

- Región característica de termalización:
  - Esta región se extiende de 0 a 3,5 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente (celdas detectoras 100, 70 y 71). En esta región el pico característico es mucho mayor que el pico térmico.
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes es mayor que la debida a los neutrones térmicos.
  - En esta región el pico característico decrece rápidamente y el pico térmico decrece muy lentamente a medida que gran cantidad de neutrones rápidos emitidos por la fuente se atenúan y se termalizan.

- Esto se debe a que en esta región el decrecimiento de la fluencia viene marcado por la atenuación de los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
- Es decir, la distribución energética de la fluencia se desplaza desde el rango de energías de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes hacia el rango de energías propias de los neutrones térmicos.
- En esta región este desplazamiento se realiza rápidamente dado que la radiación dominante son los neutrones rápidos emitidos por las fuentes.
- Región térmica de termalización
  - Esta región se extiende de 3,5 a 9 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente (celdas detectoras de la 72 a la 76).
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - En esta región el pico característico decrece más lentamente y el pico térmico decrece más rápidamente.
  - Esto se debe a que en esta región el decrecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes, por lo que se ve ralentizado.
  - Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia energías térmicas se realiza más lentamente dado que la radiación dominante son los neutrones térmicos.
- Región térmica de atenuación
  - Esta región se extiende de 9 a 48 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente (celdas detectoras 77 y 78).
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida mayoritariamente a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - En esta región los picos característico y térmico decrecen más lentamente.
  - Esto se debe a que en esta región el decrecimiento de la fluencia vienen marcado por la atenuación de los neutrones térmicos y característicos.
  - Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia energías térmicas es prácticamente inapreciable, observándose solo la disminución de la amplitud del espectro.

- En el límite en el que se alcanza el extremo de la piscina, el pico característico prácticamente ha desaparecido y el pico térmico se ha reducido considerablemente.

En cuanto a la forma del pico característico, se aproxima a la superposición de los espectros del  $^{252}\text{Cf}$  y el  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ . Sin embargo, los neutrones rápidos emitidos por la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  son en general más energéticos que los neutrones emitidos por la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , sin embargo la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es 36 veces más intensa que la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , lo que justifica que el pico característico presente la forma característica del espectro del  $^{252}\text{Cf}$  en distancias cercanas a las fuentes (región característica de termalización), mientras que presenta la forma característica del espectro del  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  a mayores distancias de las fuentes.

## ***6.6 Distribución de fluencia neutrónica a lo largo de la piscina***

El objetivo de este apartado es estudiar la distribución espacial de la fluencia y la variación del espectro del campo neutrónico generado por las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  a lo largo de la piscina del LPN.

Para ello se realiza una simulación número 3 que se detallan en la Tabla 6-3. Los valores de la fluencia neutrónica para la distribución y los espectros se obtienen de los tallies F4 situados en las celdas detectoras distribuidas a lo ancho de la piscina. La disposición de las celdas detectoras se muestran en la Figura 6.1 y sus coordenadas en la Tabla 6-1. La disposición de las fuentes se muestra en la Figura 6.3 y la Figura 6.4 y sus coordenadas en la Tabla 6-2.

### **6.6.1 Efecto de la distancia a las fuentes en la fluencia neutrónica**

Se consideran los mismos rangos energéticos que en el apartado anterior. La fluencia neutrónica total, característica y térmica para cada celda detectora considerada a lo largo del eje y se muestran en la Tabla 6-6.

La variación de la fluencia con la distancia a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  a lo largo de la piscina se muestra en la Figura 6.17.

#### **6.6.1.1 Análisis cualitativo**

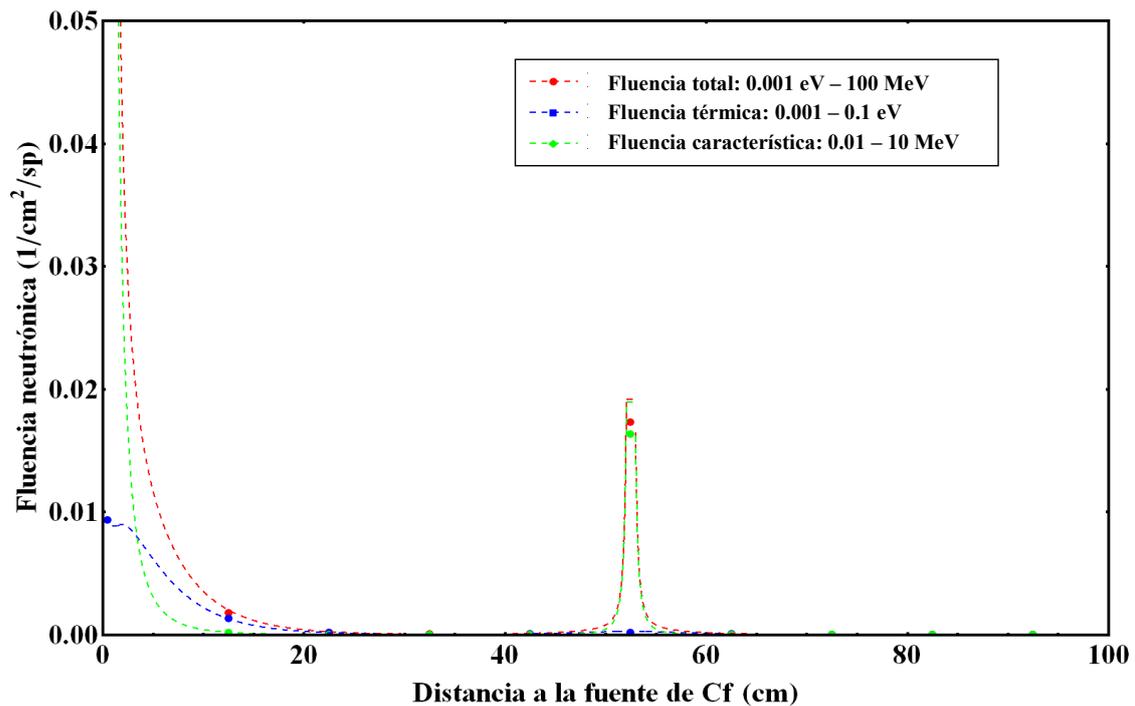
Para analizar la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina, se va realizar un ajuste semi-fenomenológico de los datos obtenidos de las simulaciones, basándonos en el modelo para la interacción de los neutrones obtenido en el apartado anterior.

En este caso, no se puede aplicar la aproximación de una única fuente puntual, dado que vamos a analizar la distribución de fluencia en el eje en el que se encuentran alineadas las fuentes, por lo que se rompe la simetrías esférica a lo largo de este eje, como se puede observar en la Figura 6.6, la Figura 6.7 y la Figura 6.8.

**Tabla 6-6: Fluencia neutrónica total, característica y térmica para las celdas detectoras lo largo del eje y.**

Celda detectora	$\Phi_{total}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{total}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Phi_{característica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{característica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Phi_{térmica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{térmica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )
100	0,6394	0,0003	0,6165	0,0003	0,00935	0,00003
80	0,00180	0,00002	0,000205	0,000007	0,00134	0,00001
81	0,000205	0,000005	0,000020	0,000002	0,000160	0,000003
82	0,000046	0,000002	0,0000025	0,0000008	0,000037	0,000002
83	0,000078	0,000003	0,000016	0,000002	0,000050	0,000002
84	0,01734	0,00006	0,01636	0,00006	0,000191	0,000005
85	0,000077	0,000004	0,000017	0,000002	0,000050	0,000002
86	0,000011	0,000001	0,0000019	0,0000007	0,0000084	0,0000009
87	0,000003	0,0000006	0	0	0,0000019	0,0000004
88	0,00000005	0,00000003	0	0	0,00000005	0,00000002

**Variación de la fluencia neutrónica a lo largo de la piscina**



**Figura 6.17: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de <sup>252</sup>Cf a lo largo de la piscina.**

La fluencia en la piscina resulta de la superposición de las fluencias debidas a las fuentes de <sup>252</sup>Cf y <sup>241</sup>Am-<sup>9</sup>Be, y dado que se ha comprobado en el análisis a lo ancho de la piscina que los resultados de las simulaciones son coherentes con el modelo de interacción neutrónica desarrollado en el apartado anterior, lo que se va a hacer es aplicar el mismo modelo con los parámetros obtenidos para el caso de una única fuente a las dos fuentes, cada uno pesado con la intensidad relativa correspondiente a cada fuente, es decir:

$$\phi = Ir_{Cf} \phi(y) + Ir_{Am/Be} \phi(y - d_{Am/Be})$$

$$\phi = 0.973 \phi(y) + 0.027 \phi(y - 52.2)$$

Por tanto, los modelos para las fluencias característica y térmica quedan, ajustados con los datos obtenidos de las simulaciones quedan:

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{característica}} &= 0.973 N \frac{e^{-\Sigma_{\text{rápido}} y}}{4\pi y^2} + 0.027 N \frac{e^{-\Sigma_{\text{rápido}} |y-52.5|}}{4\pi |y-52.5|^2} \\ &= 0.973 \frac{1.8e^{-0.12y}}{4\pi y^2} + 0.027 \frac{1.8e^{-0.12 |y-52.5|}}{4\pi |y-52.5|^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi_{\text{térmica}} &= 0.973 N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{\text{conversión}} y})^{pasos} e^{-\Sigma_{\text{térmico}} y} \Delta_{\text{térmicos}}}{4\pi y^2} \\ &\quad + 0.027 N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{\text{conversión}} |y-52.5|})^{pasos} e^{-\Sigma_{\text{térmico}} |y-52.5|} \Delta_{\text{térmicos}}}{4\pi |y-52.5|^2} \\ &= 0.973 \frac{1.8e^{-0.12y} (1 - e^{-0.16y})^{2.69.5}}{4\pi y^2} \\ &\quad + 0.027 \frac{1.8e^{-0.12 |y-52.5|} (1 - e^{-0.16 |y-52.5|})^{2.69.5}}{4\pi |y-52.5|^2} \end{aligned}$$

Como se puede comprobar, solo se ha tenido que modificar ligeramente el valor de la sección eficaz macroscópica efectiva para neutrones rápidos para que el modelo se ajuste a los resultados de las simulaciones. Si se aplica el modelo con estos parámetros a la distribución de la fluencia total se obtienen el ajuste:

$$\begin{aligned} \phi &= 0.973 \left[ N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{\text{conversión}} y})^{pasos} e^{-\Sigma_{\text{térmico}} y} \Delta_{\text{térmicos}}}{4\pi y^2} + N \frac{e^{-\Sigma_{\text{rápido}} y}}{4\pi y^2} \right] \\ &\quad + 0.027 \left[ N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{\text{conversión}} |y-52.5|})^{pasos} e^{-\Sigma_{\text{térmico}} |y-52.5|} \Delta_{\text{térmicos}}}{4\pi |y-52.5|^2} \right. \\ &\quad \left. + N \frac{e^{-\Sigma_{\text{rápido}} |y-52.5|}}{4\pi |y-52.5|^2} \right] \\ &= 0.973 \left[ \frac{1.8e^{-0.13y} (1 - e^{-0.16y})^{2.69.5}}{4\pi y^2} 1.4 + \frac{1.8e^{-0.12y}}{4\pi y^2} \right] \\ &\quad + 0.027 \left[ \frac{1.8e^{-0.13 |y-52.5|} (1 - e^{-0.16 |y-52.5|})^{2.69.5}}{4\pi |y-52.5|^2} 1.4 + \frac{1.8e^{-0.12 |y-52.5|}}{4\pi |y-52.5|^2} \right] \end{aligned}$$

Como se puede comprobar en la Figura 6.18, la fluencia se ajusta al comportamiento descrito por este modelo con los parámetros indicados.

### Variación de la fluencia neutronica a lo largo de la piscina

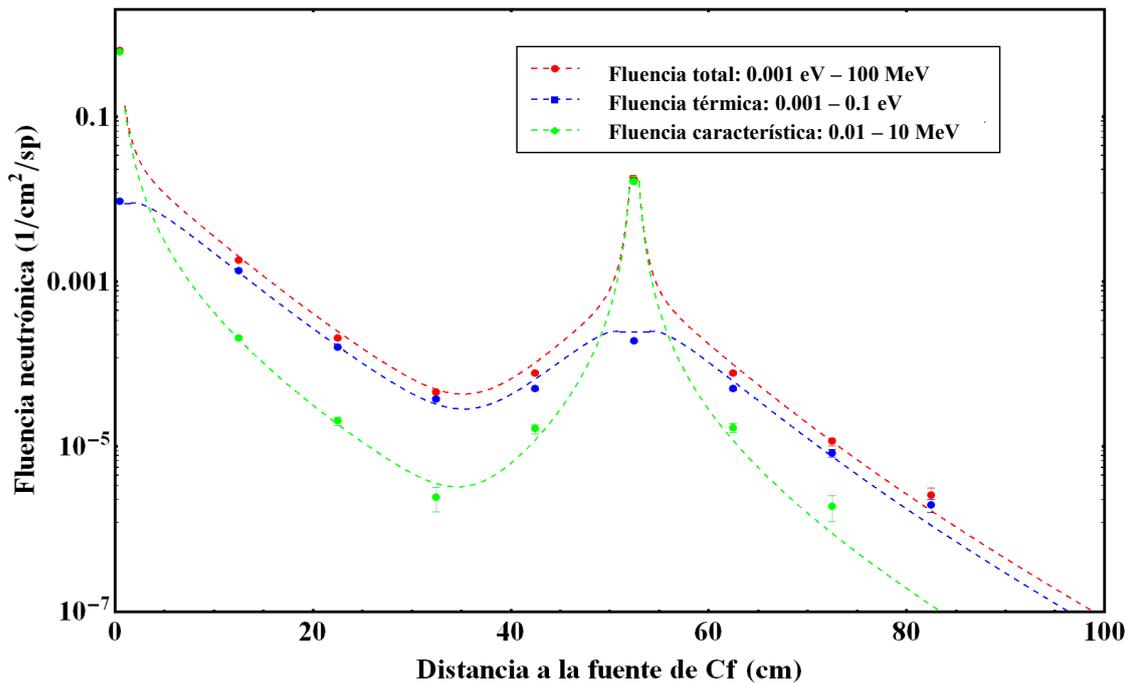


Figura 6.18: Ajustes realizados de los puntos experimentales para la distribución de la fluencia a lo largo de la piscina.

#### 6.6.1.2 Análisis cuantitativo

En este caso, se observan las mismas regiones que las distinguidas en el caso del eje x, pero alrededor de cada una de las dos fuentes. El comportamiento de la fluencia en estas regiones alrededor de cada fuente es análogo al descrito para el caso anterior con dos matices:

- El comportamiento en torno a cada una de las fuentes estará modulado por las diferentes intensidades relativas de cada fuente.
- Entre ambas fuentes existe una región de solapamiento en la que el comportamiento se ve modificado respecto al de las fuentes individuales. Esta zona de solapamiento abarca desde unos 30 cm hasta unos 40 cm de distancia a la fuente de <sup>252</sup>Cf.

Atendiendo a los mismos razonamientos que se realizaron en el caso anterior para analizar la distribución de la fluencia, se puede observar que para el caso del eje y, se pueden distinguir 8 regiones:

- Región característica de termalización en torno a la fuente de <sup>252</sup>Cf:
  - En esta región la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes es mayor que la debida a los neutrones térmicos, principalmente los de la fuente de <sup>252</sup>Cf.

- En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es mayor que la fluencia debida a la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ , por lo que la fluencia decrece.
- El decrecimiento de la fluencia viene marcado por la atenuación de los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
- Esta región se extiende de 0 a 3,5 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente.
- Región térmica de termalización en torno a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ :
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es mayor que la fluencia debida a la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ , por lo que la fluencia decrece.
  - El decrecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes, por lo que decrece más lentamente.
  - Esta región se extiende de 3,5 a 9 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente.
- Región térmica de atenuación en torno a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ :
  - En esta región la fluencia debida mayoritariamente a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es mayor que la fluencia debida a la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ , por lo que la fluencia decrece.
  - El decrecimiento de la fluencia viene marcado por la atenuación de los neutrones térmicos y característicos.
  - Esta región se extiende de 9 a 30 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente.
- Región térmica de solapamiento
  - En esta región la fluencia debida mayoritariamente a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - En esta región se superponen las fluencias debidas al  $^{252}\text{Cf}$  y al  $\text{Am}/\text{Be}$  de valores similares, es decir, se están superponiendo las regiones térmicas de atenuación de ambas fuentes, por lo que se observa como primero la fluencia sigue decreciendo pero comienza a aumentar cuando nos aproximamos a la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ .

- Por el mismo motivo, los valores de la fluencia en esta región son mayores de lo que correspondería a las regiones térmicas de atenuación de ambas fuentes por separado.
- Esta región se extiende de unos 30 a unos 43 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente.
- Región térmica de termalización en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ :
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es menor que la fluencia debida a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , y nos estamos acercando a dicha fuente, por lo que la fluencia crece.
  - El crecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes, por lo que se ve ralentizado.
  - Esta región se extiende de unos 43 a unos 49 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente.
- Región característica de termalización en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ :
  - En esta región la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes es mayor que la debida a los neutrones térmicos, principalmente los de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es menor que la fluencia debida a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , encontrándose además la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  en el centro de esta región, por lo que la fluencia primero crece y luego decrece.
  - El crecimiento y el decrecimiento de la fluencia viene marcado por la atenuación de los neutrones rápidos característicos de las fuentes, principalmente la de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , por lo que crece más rápidamente que en la región anterior.
  - Esta región se extiende de unos 49 a unos 56 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente.
- Región térmica de termalización en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ :
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es menor que la fluencia debida a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , y nos estamos alejando de dicha fuente por lo que la fluencia decrece.

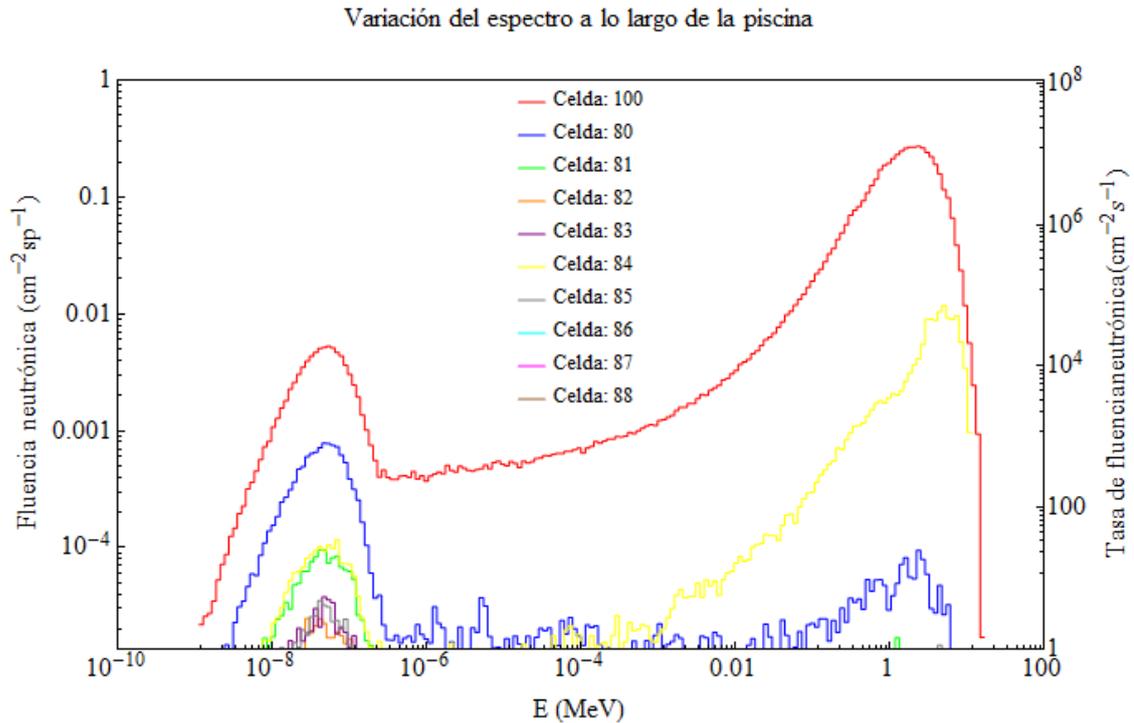
- El decrecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes, por lo que decrece más lentamente.
- Esta región se extiende de unos 56 a unos 62 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente.
- Región térmica de atenuación en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ :
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es menor que la fluencia debida a la fuente de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ , y nos estamos alejando de dicha fuente, por lo que la fluencia decrece.
  - El decrecimiento de la fluencia vienen marcado por la atenuación de los neutrones térmicos y característicos.
  - Esta región se extiende de unos 62 a unos cm de distancia de la fuente hasta el extremo de la piscina.

Estos análisis proporcionan una información somera sobre la distribución energética de las fluencia obtenidas. Para conocer con más detalle esta distribución energética se analiza el efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico.

### **6.6.2 Efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico**

Partiendo de la división realizada en el apartado anterior, se va a realizar un análisis cualitativo de la variación del espectro neutrónico a lo largo de la piscina, aplicando los mismos razonamientos que se aplicaron para el caso de la variación del espectro a lo ancho de la piscina.

- Región característica de termalización en torno a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ :
  - Esta región se extiende de 0 a 3,5 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje y aproximadamente (celdas detectoras 100, ver Figura 6.19).
  - En esta región el pico característico es mucho mayor que el pico térmico.
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes es mayor que la debida a los neutrones térmicos.
  - En esta región la forma del pico característico se asemeja a la forma del espectro del  $^{252}\text{Cf}$ .



**Figura 6.19: Variación del espectro neutrónico a lo largo de la piscina (dimensión y).**

- Esto se debe a que en esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es mayor que la fluencia debida a la fuente de Am/Be, por lo que la fluencia decrece.
- En esta región el pico característico decrece muy rápidamente y el pico térmico apenas decrece, debido a la gran cantidad de neutrones rápidos emitidos por las fuentes que se atenúan y termalizan.
- Esto se debe a que el decrecimiento de la fluencia viene marcado por la atenuación de los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
- Es decir, la distribución energética de la fluencia se desplaza desde el rango de energías de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes, principalmente por la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , hacia el rango de energías propias de los neutrones térmicos.
- En esta región este desplazamiento se realiza rápidamente dado que la radiación dominante son los neutrones rápidos característicos del  $^{252}\text{Cf}$ .
- Región térmica de termalización en torno a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ :
  - Esta región se extiende de 3,5 a 9 cm de distancia de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  aproximadamente.
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.

- Esto se debe a que en esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
- En esta región la forma del pico característico se asemeja más a la forma del espectro del  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  (suposición por analogía con el caso anterior).
- Esto se debe a que en esta región, a pesar de ser la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  mayor que la fluencia debida a la fuente de Am/Be, los neutrones rápidos característicos de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  son más energéticos que los de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ .
- En esta región el pico característico decrece más lentamente y el pico térmico decrece más rápidamente, debido a que la cantidad de neutrones rápidos emitidos por las fuentes que se atenúan y termalizan es menor.
- Esto se debe a que en esta región el decrecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes, por lo que decrece más lentamente.
- Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia energías térmicas se realiza más lentamente dado que la radiación dominante son los neutrones térmicos.
- Región térmica de atenuación en torno a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ :
  - Esta región se extiende de 9 a 30 cm de distancia de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  (celdas detectoras 80 y 81).
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.
  - En esta región la fluencia debida mayoritariamente a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - En esta región la forma del pico característico se asemeja más a la forma del espectro del  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .
  - Esto se debe a que en esta región, a pesar de ser la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  mayor que la fluencia debida a la fuente de Am/Be, los neutrones rápidos característicos de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  son más energéticos que los de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ .
  - En esta región los picos característico y térmico decrecen más lentamente.
  - Esto se debe a que en esta región el decrecimiento de la fluencia vienen marcado por la atenuación de los neutrones térmicos y característicos.
  - Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia energías térmicas es prácticamente inapreciable, observándose solo la disminución de la amplitud del espectro.

- Región térmica de solapamiento
  - Esta región se extiende de unos 30 a unos 43 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente (celdas detectoras 82 y 83).
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida mayoritariamente a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - En esta región la forma del pico característico se asemeja más a la forma del espectro del  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .
  - En esta región el pico característico y el pico térmico pasan de decrecer a crecer.
  - Esto se debe a que en esta región se superponen las fluencias debidas al  $^{252}\text{Cf}$  y al Am/Be de valores similares, por lo que se observa como primero la fluencia sigue decreciendo pero comienza a aumentar cuando nos aproximamos a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .
  - Es decir, en esta región se está produciendo un desplazamiento de la distribución energética de la fluencia desde las energías térmicas a las energías rápidas características de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .
- Región térmica de termalización en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ :
  - Esta región se extiende de unos 43 a unos 49 cm de distancia de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ .
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de las fuentes.
  - En esta región la forma del pico característico se asemeja más a la forma del espectro del  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es menor que la fluencia debida a la fuente de Am/Be.
  - En esta región el pico característico y el pico térmico crecen más rápidamente.
  - Esto se debe a que en esta región el crecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes.
  - Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia las energías rápidas características de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  se realiza más rápidamente.

- Región característica de termalización en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ :
  - Esta región se extiende de unos 49 a unos 56 cm de distancia de la fuente a lo largo del eje x aproximadamente (celda detectora 84).
  - En esta región el pico característico es mayor que el pico térmico, y la forma del pico característico se asemeja más a la forma del espectro del  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ .
  - Esto se debe a que en esta región la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes es mayor que la debida a los neutrones térmicos, principalmente los de la fuente de Am/Be.
  - En esta región el pico característico pasa de crecer muy rápidamente a decrecer muy rápidamente, y el pico térmico pasan de crecer muy lentamente a decrecer muy lentamente.
  - Esto se debe a que en esta región el crecimiento y el decrecimiento de la fluencia viene marcado por la atenuación de los neutrones rápidos característicos de las fuentes, principalmente la de Am/Be.
  - Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia las energías rápidas características de la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  se realiza más rápidamente se realiza muy rápidamente, y al sobrepasar la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  el desplazamiento se invierte, volviendo a termalizarse.
- Región térmica de termalización en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ :
  - Esta región se extiende de unos 56 a unos 62 cm de distancia de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  (celda detectora 85).
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - En esta región la forma del pico característico se asemeja más a la forma del espectro del  $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$  (suposición por analogía con el caso anterior).
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es menor que la fluencia debida a la fuente de Am/Be.
  - En esta región el pico característico decrece más lentamente y el pico térmico decrece más rápidamente, debido a que la cantidad de neutrones rápidos emitidos por las fuentes que se atenúan y termalizan es menor.
  - El decrecimiento de la fluencia viene marcado por la termalización de los neutrones emitidos por las fuentes, por lo que decrece más lentamente que en la región anterior.

- Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia energías térmicas se realiza más lentamente dado que la radiación dominante son los neutrones térmicos.
- Región térmica de atenuación en torno a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ :
  - Esta región se extiende de unos 62 a unos cm de distancia de la fuente hasta el extremo de la piscina (celdas detectoras 86, 87 y 88).
  - En esta región el pico térmico es mayor que el pico característico.
  - En esta región la fluencia debida a neutrones térmicos es mayor que la fluencia debida a los neutrones rápidos característicos de la fuentes.
  - En esta región la forma del pico característico se asemeja más a la forma del espectro del  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .
  - En esta región, la fluencia debida a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  es menor que la fluencia debida a la fuente de Am/Be.
  - En esta región los picos característico y térmico decrecen más lentamente.
  - El decrecimiento de la fluencia vienen marcado por la atenuación de los neutrones térmicos y característicos.
  - Es decir, en esta región el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia hacia energías térmicas es prácticamente inapreciable, observándose solo la disminución de la amplitud del espectro.

## ***6.7 Distribución de fluencia neutrónica a lo alto de la piscina***

El objetivo de este apartado es estudiar la distribución espacial de la fluencia y la variación del espectro del campo neutrónico generado por las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  a lo alto de la piscina del LPN.

Para ello se realiza una simulación número 4 que se detallan en la Tabla 6-3. Los valores de la fluencia neutrónica para la distribución y los espectros se obtienen de los tallies F4 situados en las celdas detectoras distribuidas a lo ancho de la piscina. La disposición de las celdas detectoras se muestran en la Figura 6.1 y sus coordenadas en la Tabla 6-1. La disposición de las fuentes se muestra en la Figura 6.3 y la Figura 6.4 y sus coordenadas en la Tabla 6-2.

### **6.7.1 Efecto de la distancia a las fuentes en la fluencia neutrónica**

Se consideran los mismos rangos energéticos que se han tomado hasta ahora. Dada la simetría del problema, los resultados deberían ser análogos a los obtenidos para el eje x. Vamos a presentar los resultados para comprobar si esto se cumple.

La fluencia neutrónica total, característica y térmica para cada celda detectora considerada a lo largo del eje z se muestran en la Tabla 6-7. La variación de la fluencia neutrónica a lo alto de la piscina se muestra en la Figura 6.20.

Se comprueba que estos resultados tienen una desviación respecto a los resultados del eje x de apenas un 3%. Por tanto se puede afirmar que la distribución de la fluencia es totalmente análoga a la distribución obtenida para el eje z.

A la vista de esto, el análisis de los resultados realizados en el caso de la variación a lo ancho de la piscina el eje x son aplicables directamente a este caso, por lo que se va a omitir dicho análisis y se van a presentar directamente los resultados finales.

A partir de los datos de las simulaciones se obtiene el siguiente ajuste para la fluencia característica (ver Figura 6.21):

$$\Phi_{\text{característica}} = N \frac{e^{-\Sigma_{car}}}{4\pi x^2} = \frac{1.8e^{-0.125x}}{4\pi x^2}$$

A partir de los datos de las simulaciones se obtiene el siguiente ajuste para la fluencia térmica (Ver Figura 6.21):

$$\Phi_{\text{térmica}} = N \frac{(1 - e^{-\Sigma_{conv}x})^P e^{-\Sigma_t \Delta n_t}}{4\pi x^2} = \frac{1.8e^{-0.135x} (1 - e^{-0.16x})^{2.69.5}}{4\pi x^2}$$

La expresión cuasi-fenomenológica que describe la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina del LPN queda:

$$\begin{aligned} \phi &= N \frac{e^{-\Sigma_{car}} + (1 - e^{-\Sigma_{conv}x})^P e^{-\Sigma_t \Delta n_t}}{4\pi x^2} F_f \\ &= 1.8 \frac{e^{-0.125x} + e^{-0.135x} (1 - e^{-0.16x})^{2.69.5}}{4\pi x^2} 1.4 \end{aligned}$$

### 6.7.2 Efecto de la distancia a las fuentes en el espectro neutrónico

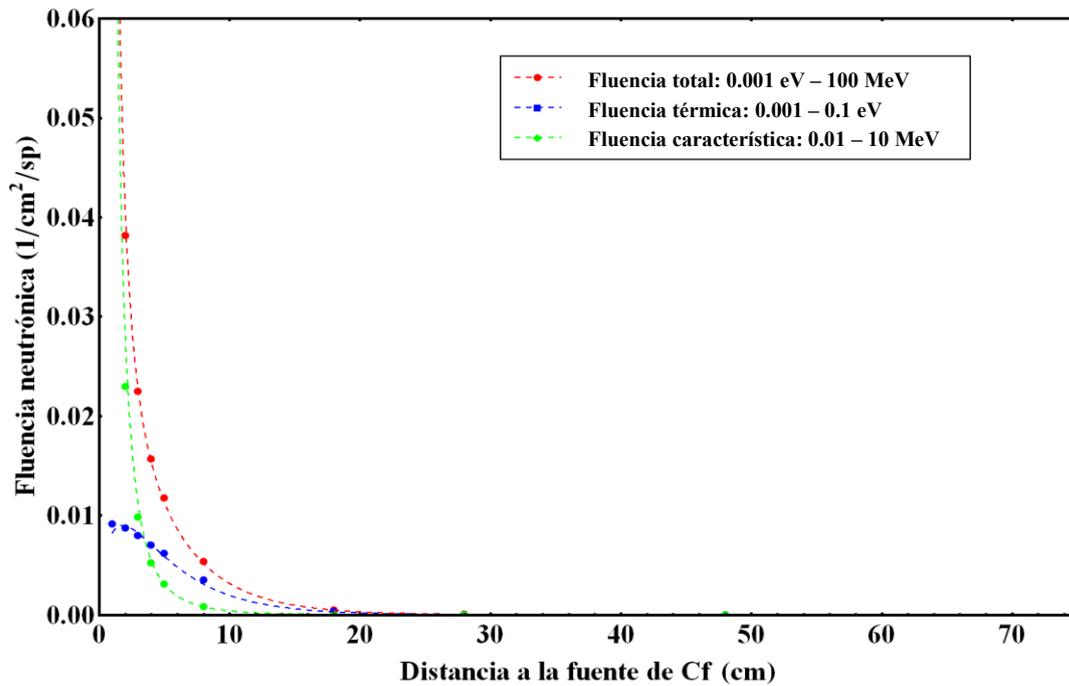
Los espectros resultantes se recogen en la Figura 6.22. Puede observarse que los espectros son análogos a los del eje x (Nótese que los que difieren es por resultar de medidas de la fluencia a distancias distintas de la fuente de <sup>252</sup>Cf).

Por tanto, la variación del espectro neutrónico a lo alto de la piscina presenta un comportamiento análogo al descrito para el eje x a lo ancho de la piscina.

**Tabla 6-7: Fluencia neutrónica total, característica y térmica para las celdas detectoras lo largo del eje z.**

Celda detectora	$\Phi_{total}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{total}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Phi_{característica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{característica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Phi_{térmica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )	$\Delta\Phi_{térmica}$ ( $cm^{-2}sp^{-1}$ )
100	0,6394	0,0002	0,6167	0,0006	0,00932	0,00006
80	0,1077	0,0003	0,0898	0,0003	0,00918	0,00006
81	0,0381	0,0002	0,0229	0,0001	0,00875	0,00006
82	0,0225	0,0001	0,009847	0,00009	0,00796	0,00006
83	0,01569	0,00001	0,005219	0,00006	0,00702	0,00005
84	0,01175	0,00008	0,00310	0,00005	0,00620	0,00005
85	0,00535	0,00005	0,00086	0,00003	0,00353	0,00003
86	0,000475	0,00001	0,000045	0,000006	0,00038	0,00001
87	0,000056	0,000005	0,000011	0,000003	0,000039	0,000003
88	0,0000001	0,0000005	0	0	0,0000014	0,0000005

**Variación de la fluencia neutrónica a lo alto de la piscina**



**Figura 6.20: Variación de la fluencia neutrónica total, térmica y característica con la distancia a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  a lo alto de la piscina.**

### Ajustes de la distribución de la fluencia neutrónica a lo alto de la piscina

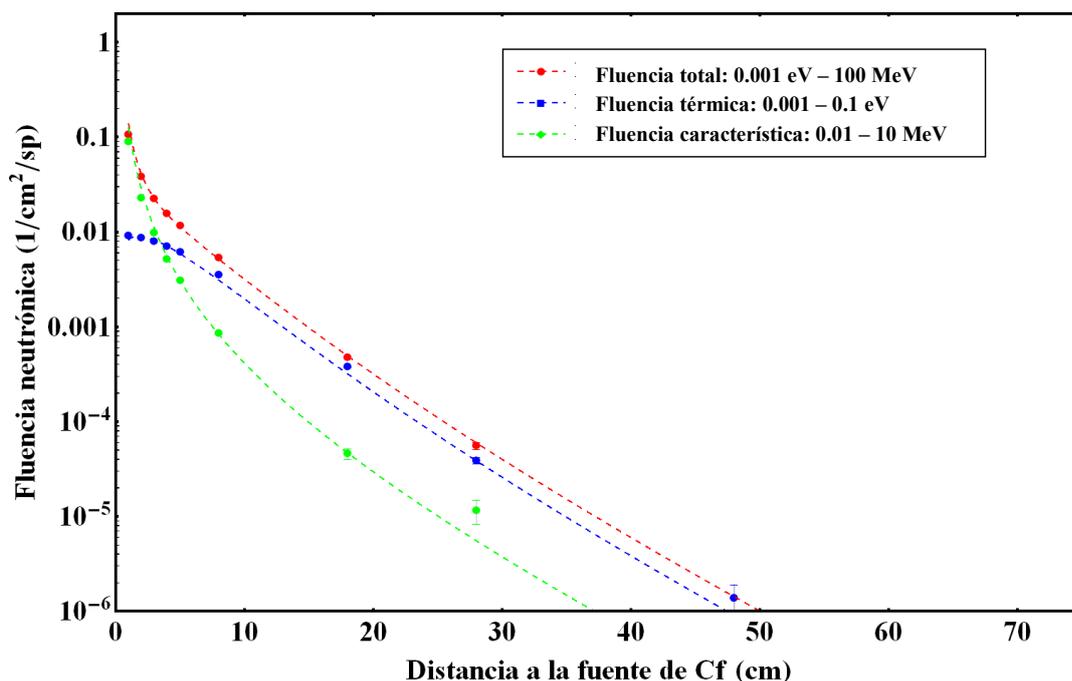


Figura 6.21: Ajustes realizados de los puntos experimentales para la distribución de la fluencia a lo alto de la piscina.

### Variación del espectro a lo alto de la piscina

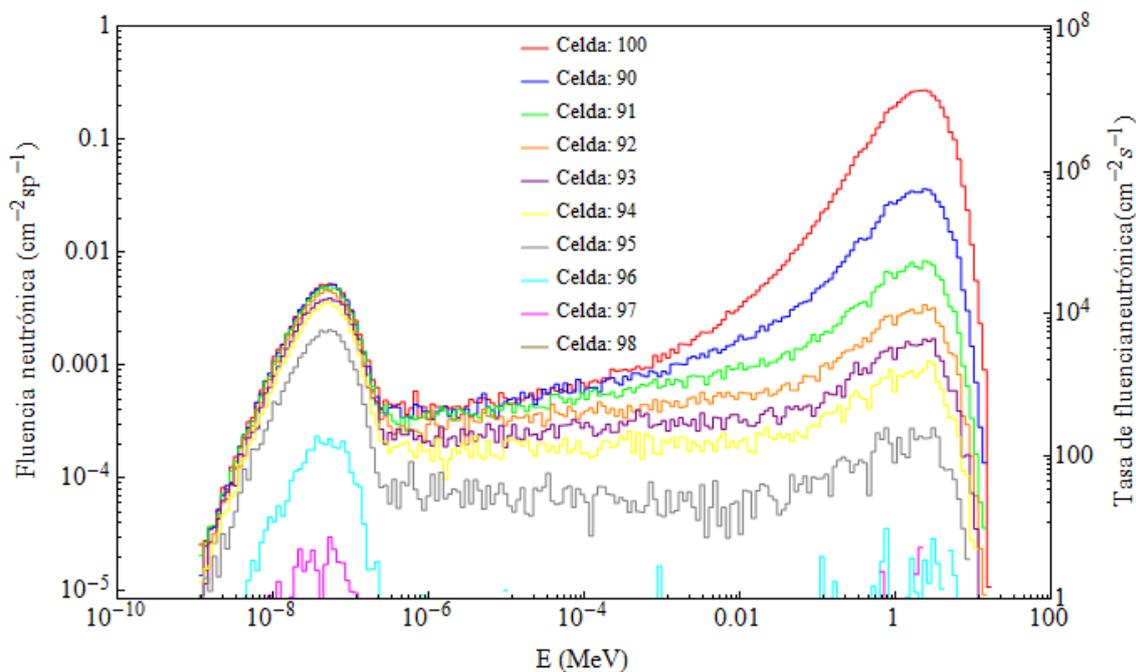


Figura 6.22: Variación del espectro neutrónico a lo alto de la piscina (dimensión z).

## Capítulo 7.

# Ejemplo de aplicación a la irradiación de materiales

Tal y como se describió al inicio de este documento, la caracterización de la piscina del LPN era necesaria dado que uno de los posibles servicios del LPN era permitir la irradiación neutrónica de materiales en el interior de la piscina, para posteriormente poder analizar las consecuencias en las propiedades de los materiales.

En este apartado, vamos a ilustrar brevemente y en primera aproximación como aplicar la caracterización de la piscina del LPN para la irradiación de materiales. Para ello vamos a realizar una estimación somera del tiempo de irradiación necesario en la piscina para satisfacer las necesidades de un hipotético cliente del LPN.

Supongamos que un cliente del laboratorio quiere someter una muestra pequeña de material de  $1 \text{ cm}^2$  de superficie a X horas de irradiación neutrónica, a un flujo de Y n/s con un rango energético  $\Delta E$ , para un determinado rango de energías, para posteriormente comprobar el cambio en las propiedades del material.

En función del rango de energías deseado, elegiremos la posición, r, de irradiación del material en la piscina que presente la distribución energética de la fluencia más similar al rango de energías demandado. Por ejemplo, si el cliente desea someter su material a:

- Principalmente neutrones rápidos: colocaremos la muestra en las regiones características de termalización alrededor de cada fuente, dado que son las que presentan mayores fluencias rápidas características de las fuentes con fluencias térmicas muy pequeñas. En función del rango de neutrones rápidos se elegirá la zona característica de termalización de una fuente u otra.
  - Principalmente neutrones rápidos de 0,1 a 2 MeV: colocaremos la muestra en la región correspondiente a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , muy próxima a la fuente.
  - Principalmente neutrones rápidos de 2 a 10 MeV: colocaremos la muestra en la región correspondiente a la fuente de  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$ , muy próxima a la fuente.
  - Principalmente neutrones rápidos de 0,1 a 10 MeV: colocaremos la muestra en la región correspondiente a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , más alejada de la fuente.

- Principalmente neutrones térmicos: en función de lo restrictivo que se haya de ser con los neutrones rápidos, colocaremos la muestra en:
  - Regiones de térmicas de termalización, dado que son las que presentan mayores fluencias térmicas con fluencias rápidas características de las fuentes pequeñas.
  - Regiones térmicas de atenuamiento, muy alejada de las fuentes, dado que a pesar de presentar fluencias muy pequeñas, la fluencia característica en ellas llega a ser prácticamente nula.

A partir de los datos proporcionados por el cliente, se puede estimar la irradiación neutrónica del rango de energía deseado que debe recibir la muestra como:

$$N_{\Delta E}[n] = Y[n s^{-1}] \cdot X[h] \cdot 3600 [h s^{-1}]$$

Una vez elegida la posición, r, se utiliza la caracterización de la piscina desarrollada en este trabajo para estimar la fluencia a la que va a estar sometida la muestra por encontrarse en dicha posición, que será:

$$\Phi(r)[cm^{-2}sp^{-1}]$$

Dada la aproximación en tres grupos de energía considerada en la caracterización, las fluencias térmica y característica a la que se verá sometida la muestra serán:

$$\Phi_{\text{característica}}(r)[cm^{-2}sp^{-1}]$$

$$\Phi_{\text{térmica}}(r)[cm^{-2}sp^{-1}]$$

Conocida la irradiación neutrónica del rango de energía deseado que debe recibir la muestra que debe recibir la muestra, se puede estimar el tiempo de irradiación necesario en la piscina del LPN, t, a partir de la expresión:

$$N_i[n] = \Phi_i \cdot B[n s^{-1}] \cdot t[h] \cdot 3600[h s^{-1}]$$

donde i representa el rango de energías para el que se quiere calcular el tiempo de irradiación, y donde B es la tasa de emisión de las fuentes en el instante de tiempo en el que se realiza la irradiación, y que ha día de hoy es  $B=4,111E08 s^{-1}$ .

Nótese que se está suponiendo que la tasa de emisión de las fuentes se mantienen constante durante el tiempo de irradiación. Dado que la vida media,  $t_{1/2}$ , es de 2,65 años para el  $^{252}\text{Cf}$  y de 432 años para el  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , y teniendo en cuenta que la actividad de las fuentes decrecen según la ley de desintegración radiactiva, se puede asegurar que:

- Si el tiempo de irradiación es menor que dos semanas, la disminución de la intensidad de las fuentes es menor del 1%.
- Si el tiempo de irradiación es menor que dos mese y medio, la disminución de la intensidad de las fuentes es menor del 5%.
- Si el tiempo de irradiación es menor que cinco meses y dos semanas, la disminución de la intensidad de las fuentes es menor del 10%.

## Capítulo 8.

### Conclusiones

En este estudio se ha caracterizado la piscina de almacenamiento de fuentes neutrónicas de calibración del LPN en términos de la fluencia neutrónica (o equivalentemente, de la tasa de fluencia neutrónica) y el espectro neutrónico que se encuentran en el interior de la misma debido a la presencia de las fuentes. Esta caracterización se realiza de manera general, analizando la distribución espacial tridimensional de la fluencia, y de manera específica en tres direcciones de especial interés en la piscina, es decir, a lo ancho, largo y alto de la piscina (siempre con referencia a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , por ser la fuente limitante), en las cuales se analiza de manera detallada cómo varía la fluencia neutrónica con la distancia, así como la variación de la distribución energética de la fluencia, es decir, el espectro.

La fluencia neutrónica presenta una distribución tridimensional con simetría aproximadamente esférica alrededor de cada una de las fuentes, perturbada únicamente en los límites físicos de la piscina y en la zona de la piscina que se encuentra entre las dos fuentes, presentando unos valores para la tasa de fluencia neutrónica máximos del orden de  $10^8 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  y  $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  en las posiciones de las fuentes de  $^{252}\text{Cf}$  y  $^{241}\text{Am}$ - $^9\text{Be}$  respectivamente, y unos valores mínimos de aproximadamente  $10 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  en los límites de la piscina más cercanos a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  y hasta  $0,001 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  en los más alejados.

En cuanto al comportamiento detallado de la variación de la fluencia a lo ancho, largo y alto de la piscina, un resumen de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 8-1, la Tabla 8-2 y la Tabla 8-3 respectivamente.

La distribución energética de la fluencia, es decir, el espectro, a medida que nos alejamos de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  a lo ancho y a lo alto de la piscina se desplaza desde el rango de energías de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes, de entre 0,01 a 10 MeV, hacia el rango de energías propias de los neutrones térmicos (0,01 a 1 eV). Este desplazamiento se realiza rápidamente en zonas próximas a la fuente (de 0 a 3,5 cm de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ ), y se ralentiza a medida que nos alejamos de la misma (de 3,5 a 9 cm de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ ), hasta ser prácticamente inapreciable una vez que se han termalizado la mayor parte de los neutrones rápidos emitidos por las fuentes (de 9 cm de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  hasta el extremo de la piscina) (Nótese que cuando se habla en términos de velocidad de desplazamiento del espectro neutrónico, no se está refiriendo a una velocidad temporal, sino a una velocidad de variación respecto a la distancia).

Además, el valor de la fluencia neutrónica, y equivalentemente la tasa de fluencia neutrónica, disminuye a medida que nos alejamos de la fuente por el efecto atenuante de la distancia. La fluencia disminuye según la atenuación de neutrones rápidos de 0 a 3,5 cm de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , según la termalización de neutrones rápidos emitidos por las fuentes de 3,5 a 9 cm de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , y según la atenuación de los neutrones térmicos de 9 cm de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  hasta el extremo de la piscina.

En cuanto a la distribución energética de la fluencia, es decir, el espectro, a medida que nos alejamos de la fuente a lo largo de la piscina, se desplaza desde el rango de energías de los neutrones rápidos emitidos por la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , de entre 0,01 a 10 MeV, hacia el rango de energías propias de los neutrones térmicos (0,01 a 1 eV). Este desplazamiento se realiza rápidamente en zonas próximas a la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  y se ralentiza a medida que nos alejamos de la misma.

Sin embargo, a medida que nos separamos de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$ , nos estamos acercando a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , por lo que se produce una inversión del desplazamiento de la distribución energética de la fluencias, esta vez desde las energías térmicas hacia las energías rápidas características de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ . Este desplazamiento se realiza lentamente a medida que nos acercamos a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , y se acelera en regiones próximas a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .

Una vez que se ha superado la posición de la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , el desplazamiento de la distribución energética de la fluencia térmica vuelve termalizarse a medida que nos alejamos de ambas fuentes. Este desplazamiento se realiza rápidamente en zonas próximas a la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , y se ralentiza a medida que nos alejamos de ambas, hasta ser prácticamente inapreciable una vez que nos hemos separado lo suficiente de la ambas fuentes.

Además, el valor de la fluencia neutrónica, y equivalentemente la tasa de fluencia neutrónica, disminuye a medida que nos alejamos de ambas fuentes por el efecto atenuante de la distancia. La disminución es más lenta a medida que nos alejamos de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  por esta fuente unas 36 veces más intensa que la fuente de  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ .

En la zona intermedia entre ambas fuentes aparece una zona de solapamiento cuyo efecto es ralentizar el decrecimiento de la fluencia de ambas fuentes, registrándose fluencias mayores que a las mismas distancias en las zonas exteriores a las fuentes.

En todos los casos, la forma del pico característico viene dada por la superposición de los espectros del  $^{252}\text{Cf}$  y el  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ , presentando la forma característica del espectro del  $^{252}\text{Cf}$  de 0 a 3,5 cm de la fuente de  $^{252}\text{Cf}$  y la forma característica del espectro del  $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$  a mayores distancias de la fuente. La forma del pico de neutrones térmicos se ajusta a la distribución de Maxwell-Boltzman, con su máximo alrededor de la temperatura a la que se encuentra el agua de la piscina, unos 30 °C.

Así, la piscina del LPN queda caracterizada en función de la fluencia y el espectro neutrónico que se encuentra en el interior de la misma debido a la presencia de las fuentes neutrónicas de caracterización.

Por último, se ha mostrado como aplicar los resultados obtenidos en la caracterización de la piscina para la irradiación de materiales, dado que es uno de los servicios a prestar por el LPN, servicio que pretende colaborar en el desarrollo de materiales resistentes al daño por irradiación en el diseño de instalaciones experimentales y en plantas conceptuales nucleoelectricas de fusión.

La caracterización realizada en este estudio, es sólo la primera fase de la caracterización de la piscina del LPN. Como ya se comentó al inicio del presente documento, en posteriores fases, se podría analizar la influencia en estos resultados de las distintas posiciones que pueden ocupar las fuentes dentro de la piscina del LPN, y también se podría realizar una comprobación de los resultados obtenidos mediante una comparación experimental usando, por ejemplo, la técnica de activación de las láminas de oro.

Así mismo, y con respecto a los resultados obtenidos en este estudio, se podrían revisar las hipótesis asumidas y adoptar hipótesis más detalladas. Por ejemplo, la consideración de las fuentes como puntuales y emisoras únicamente de neutrones, son hipótesis que sería de interés revisar y detallar para estudiar con detalle la fluencia y el espectro neutrónico en zonas muy próximas a las fuentes, del orden de cm, dado que a estas distancias la geometría y las partículas secundarias emitidas por las fuentes son significativas. La consideración de la geometría finita de las fuentes llevaría también a tener que incorporar al estudio otro aspecto, como es la anisotropía de las fuentes.

Por otra parte, para otro tipo de servicios del LPN, como puede ser la calibración de instrumentos y detectoras en la bancada con las fuentes en posición de irradiación, podría interesar, extender este estudio de la caracterización, de la piscina al interior del laboratorio en general. El modelo desarrollado se podría aplicar sin más que considerar las posiciones de las fuentes, dado que una se encontraría en la posición de irradiación en la parte superior de la lanzadera (y no en la posición de almacenamiento, sumergida en la piscina, que se ha considerado en este estudio) y revisando las hipótesis de geometría simplificada que se han considerado para el edificio del laboratorio (se podría detallar la geometría del mismo añadiendo la bancada de irradiación, la puerta de entrada al bunker y otros detalles).

Sin embargo, como primera aproximación este estudio es más que suficiente, dando una buena idea de los valores de tasa de fluencia neutrónica que se van a encontrar en distintos puntos de la piscina así como del espectro neutrónico, y permitiendo valorar, por ejemplo, qué tipo de aplicaciones se podrían llevar a cabo en la instalación.

**Tabla 8-1: Resumen de los resultados obtenidos para la distribución de la fluencia a lo ancho de la piscina.**

Región	Rango de distancia a fuente <sup>252</sup> Cf (cm)		Rango de fluencia total (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia total (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		Comportamiento dominante	Distribución energética dominante
Característica de termalización	0,5	3,5	0,634	0,0180	2,606·10 <sup>8</sup>	7,400·10 <sup>6</sup>	Atenuación neutrones rápidos	Neutrones rápidos característicos
Térmica de termalización	3,5	9	0,0180	0,00412	7,400·10 <sup>6</sup>	1,694·10 <sup>6</sup>	Termalización de neutrones rápidos	Neutrones térmicos
Térmica de atenuación	9	48	0,00412	0,0000004	1,694·10 <sup>6</sup>	164,4	Atenuación	Neutrones térmicos

Región	Rango de fluencia característica (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia característica (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		Distribución energética característica dominante	Rango de Fluencia térmica (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia térmica (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	
Característica de termalización	0,631	0,00716	2,594·10 <sup>8</sup>	2,943·10 <sup>6</sup>	<sup>252</sup> Cf	0,00624	0,00780	2,565·10 <sup>6</sup>	3,207·10 <sup>6</sup>
Térmica de termalización	0,00716	0,000501	2,943·10 <sup>6</sup>	2,060·10 <sup>5</sup>	Am-241/Be9	0,00780	0,00258	3,207·10 <sup>6</sup>	1,061·10 <sup>6</sup>
Térmica de atenuación	0,000501	0	2,060·10 <sup>5</sup>	0	Am-241/Be9	0,00258	0,0000004	1,061·10 <sup>6</sup>	164,4

**Tabla 8-2: Resumen de los resultados obtenidos para la distribución de la fluencia a lo largo de la piscina.**

Región	Rango de distancia a fuente <sup>252</sup> Cf (cm)		Rango de fluencia total (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia total (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		Comportamiento dominante	Distribución energética dominante
Región característica de termalización en torno a la fuente de <sup>252</sup> Cf	0,5	3,5	0,639	0,0185	2,627·10 <sup>8</sup>	7,605·10 <sup>6</sup>	Decrecimiento por atenuación neutrones rápidos	Neutrones rápidos característicos
Región térmica de termalización en torno a la fuente de <sup>252</sup> Cf	3,5	9	0,0185	0,00443	7,605·10 <sup>6</sup>	1,821·10 <sup>6</sup>	Decrecimiento por termalización de neutrones rápidos	Neutrones térmicos
Región térmica de atenuación en torno a la fuente de <sup>252</sup> Cf	9	30	0,00443	0,000066	1,821·10 <sup>6</sup>	2,713·10 <sup>4</sup>	Decrecimiento por atenuación	Neutrones térmicos
Región térmica de solapamiento	30	43	0,000066	0,0173	2,713·10 <sup>4</sup>	7,112·10 <sup>6</sup>	Decrecimiento y crecimiento por solapamiento	Neutrones térmicos
Región térmica de termalización en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	43	49	0,000116	0,000515	4,769·10 <sup>4</sup>	2,117·10 <sup>5</sup>	Decrecimiento por termalización de neutrones rápidos	Neutrones térmicos
Región característica de termalización en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	49	56	0,000515	0,000513	2,117·10 <sup>5</sup>	2,109·10 <sup>5</sup>	Decrecimiento por atenuación neutrones rápidos	Neutrones rápidos característicos
Región térmica de termalización en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	56	62	0,000513	0,000110	2,109·10 <sup>5</sup>	4,522·10 <sup>4</sup>	Decrecimiento por termalización de neutrones rápidos	Neutrones térmicos
Región térmica de atenuación en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	62	102,5	0,000110	0	4,522·10 <sup>4</sup>	0	Decrecimiento por atenuación	Neutrones térmicos

(Continuación Tabla 8-2)

Región	Rango de fluencia característica (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia característica (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		Distribución energética característica dominante	Rango de Fluencia térmica (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia térmica (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	
Región característica de termalización en torno a la fuente de <sup>252</sup> Cf	0,617	0,00747	2,536·10 <sup>8</sup>	3,071·10 <sup>6</sup>	<sup>252</sup> Cf	0,00935	0,0079	3,844·10 <sup>6</sup>	3,248·10 <sup>6</sup>
Región térmica de termalización en torno a la fuente de <sup>252</sup> Cf	0,00747	0,000584	3,071·10 <sup>6</sup>	2,401·10 <sup>5</sup>	<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,0079	0,00275	3,248·10 <sup>6</sup>	1,131·10 <sup>6</sup>
Región térmica de atenuación en torno a la fuente de <sup>252</sup> Cf	0,000584	0,000005	2,401·10 <sup>5</sup>	2,056·10 <sup>3</sup>	<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,00275	0,000044	1,131·10 <sup>6</sup>	1,809·10 <sup>4</sup>
Región térmica de solapamiento	0,000005	0,0163	2,056·10 <sup>3</sup>	6,701·10 <sup>6</sup>	<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000044	0,000191	1,809·10 <sup>4</sup>	7,852·10 <sup>4</sup>
Región térmica de termalización en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000014	0,000208	5,755·10 <sup>3</sup>	8,551·10 <sup>4</sup>	<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000073	0,000220	3,001·10 <sup>4</sup>	9,044·10 <sup>4</sup>
Región característica de termalización en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000208	0,000208	8,551·10 <sup>4</sup>	8,551·10 <sup>4</sup>	<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000220	0,000219	9,044·10 <sup>4</sup>	9,003·10 <sup>4</sup>
Región térmica de termalización en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000208	0,000014	8,551·10 <sup>4</sup>	5,755·10 <sup>3</sup>	<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000219	0,000069	9,003·10 <sup>4</sup>	2,837·10 <sup>4</sup>
Región térmica de atenuación en torno a la fuente de <sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000014	0	5,755·10 <sup>3</sup>	0	<sup>241</sup> Am- <sup>9</sup> Be	0,000069	0	2,837·10 <sup>4</sup>	0

**Tabla 8-3: Resumen de los resultados obtenidos para la distribución de la fluencia a lo alto de la piscina.**

Región	Rango de distancia a fuente <sup>252</sup> Cf (cm)		Rango de fluencia total (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia total (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		Comportamiento dominante	Distribución energética dominante
Característica de termalización	0,5	3,5	0,640	0,0182	2,631·10 <sup>8</sup>	7,482·10 <sup>6</sup>	Atenuación neutrones rápidos	Neutrones rápidos característicos
Térmica de termalización	3,5	9	0,0182	0,00403	7,482·10 <sup>6</sup>	1,657·10 <sup>6</sup>	Termalización de neutrones rápidos	Neutrones térmicos
Térmica de atenuación	9	48	0,00403	0,0000001	1,657·10 <sup>6</sup>	41,11	Atenuación	Neutrones térmicos

Región	Rango de fluencia característica (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia característica (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )		Distribución energética característica dominante	Rango de Fluencia térmica (cm <sup>-2</sup> sp <sup>-1</sup> )		Rango de tasa fluencia térmica (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	
Característica de termalización	0,631	0,00754	2,594·10 <sup>8</sup>	3,100·10 <sup>6</sup>	<sup>252</sup> Cf	0,00624	0,0076	2,565·10 <sup>6</sup>	3,124·10 <sup>6</sup>
Térmica de termalización	0,00754	0,000574	3,100·10 <sup>6</sup>	2,360·10 <sup>5</sup>	Am-241/Be9	0,0076	0,00247	3,124·10 <sup>6</sup>	1,015·10 <sup>6</sup>
Térmica de atenuación	0,000574	0	2,360·10 <sup>5</sup>	0	Am-241/Be9	0,00247	0,0000001	1,015·10 <sup>6</sup>	41,11

## Capítulo 9. Referencias

### **Publicaciones**

- [1] J. Sanz. *Seguridad e impacto medioambiental de instalaciones de fusión nuclear. Metodología de análisis y aplicaciones*. UNED/DIE-IN 5.0, Departamento de Ingeniería Energética. 2008.
- [2] N. J. Roberts, N. N. Moiseev and M. Králik. *Radionuclide neutron source characterization techniques*. IOP Publishing, Metrología 48, S239. 2011.
- [3] V. Lacoste, G. Taylor and S. Röttger. *Simulated workplace neutron fields*. IOP Publishing, Metrología 48, S304. 2011.

### **Documentación preceptiva LPN**

- [4] CIEMAT. *IR-33: Laboratorio de patrones neutronicos. Memoria descriptiva*. 2012.
- [5] CIEMAT. *IR-33: Laboratorio de patrones neutronicos. ES*. 2012.
- [6] CIEMAT. *IR-33: Laboratorio de patrones neutronicos. Verificación de la instalación*. 2012.
- [7] CIEMAT. *P-LMRI-T-35 - Procedimiento de verificación inicial y periodica de las fuentes radiactivas del Laboratorio de Patrones Neutronicos*. 2012.
- [8] CIEMAT. *P-LMRI-T-36 - Procedimiento de verificación de sistemas e instalaciones del Laboratorio de Patrones Neutronicos*. 2012.
- [9] CIEMAT. *P-LMRI-T-38 - Procedimiento de almacenamiento de fuentes radiactivas del Laboratorio de Patrones Neutronicos*. 2012.

### **Normas estándar**

- [10] ISO 2919:2012. *Radiological protection - Sealed radioactive sources - General requirements and classification*. 2012.
- [11] ISO 8529-1:2001. *Reference neutron radiations - Part I: Characteristics and methods of production*. 2001.
- [12] ISO 12789-1:2008. *Simulated workplace neutron fields - Part I: Characteristics and methods of production*. 2008.
- [13] ISO 14152:2001. *Neutron radiation protection shielding - Design principles and considerations for the choice of appropriate materials*. 2001.
- [14] ISO 17025:2005. *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. 2005.
- [15] SAE J403-200912. *Chemical composition of SAE carbon steels*. 2009.
- [16] ASTM C637-09. *Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete*. 2009.

### **Software**

- [17] D. B. Pelowitz. *MCNPX User's manual. Version 2.7.0*. Los Alamos National Laboratory. 2011.
- [18] S. M. Girard. *MCNP - A general Monte Carlo n-particle transport code, version 5. Volume I: theory and overview*. Los Alamos National Laboratory. 2008.
- [19] S. M. Girard. *MCNP - A general Monte Carlo n-particle transport code, version 5. Volume III: developer's guide*. Los Alamos National Laboratory. 2008.
- [20] J. K. Shultis, R. E. Faw. *An MCNP primer*. Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University. 2011.
- [21] M. Herman, A. Trkov. *ENDF-6 Formats Manual*. National Nuclear Data Center. 2010.
- [22] A.L. Schwarz , R.A. Schwarz, and L.L. Carter. *MCNP/MCNPX Visual Editor Computer Code Manual*. Visual Editor Consultants. 2008.
- [23] Wolfram Research Inc. *Wolfram Mathematica 9 - Documentation center*. <http://reference.wolfram.com/mathematica/guide/Mathematica.html>. 2013.
- [24] J. J. Kelly. *Essential Mathematica for Students of Science*. Department of Physics, University of Maryland. 2006.

### **Planos técnicos LPN**

- [25] Arraela S.L. *ARR-001-01-11 - Compuerta*. 2012.
- [26] Arraela S.L. *ARR-008-01-11 - Compuerta en posicion de cierre*. 2012.
- [27] ENWESA Operaciones. *PEC-9279-100.11.02 - LPN CIEMAT. Despiece: lanzadera. Portacápsulas*. 2011.
- [28] ENWESA Operaciones. *PEC-9279-100.11.04 - LPN CIEMAT. Despiece carro lanzadera. Capsulas soporte fuente*. 2011.
- [29] ENWESA Operaciones. *PEC-9279-100.11.05 - LPN CIEMAT. Despiece carro lanzadera. Capsulas soporte fuentes*. 2011.
- [30] ENWESA Operaciones. *PEC-9279-100.11.08 - LPN CIEMAT. Despiece: suplemento. Carro porta-capsulas lanzadera*. 2011.
- [31] Intecsa-Inarsa. *ER-03 - Estado reformado: planta baja. Usos superficies, cotas y niveles*. 2012.
- [32] Intecsa-Inarsa. *ER-07 - Estado reformado: secciones y detalles constructivos I*. 2012.
- [33] Intecsa-Inarsa. *ER-10 - Detalles constructivos: puerta del bunker y tapa del almacen de fuentes*. 2012.



97 2 -1 -97 imp:n=1 \$Celda detectora eje z  
 98 2 -1 -98 imp:n=1 \$Celda detectora eje z  
 c  
 200 0 41 imp:n=0 \$Universo  
 201 0 -52 : -53 : -54 : -55 : -56 imp:n=0 \$Celda exclusión hormigón

c Cartas de superficies

c -----  
 10 rpp -70 70 -95 95 2.5 25.5 \$Tapa hormigón  
 11 rpp -70 70 -95 95 0.5 2.5 \$Tapa acero  
 c  
 20 rpp -48 48 -73 73 -13 0 \$Aire piscina  
 21 rpp -48 48 -73 73 -166 -13 \$Agua piscina  
 22 rpp -50 50 -75 75 -168 0 \$Polietileno piscina  
 c  
 30 rpp -5 5 63 73 -166 -160 \$Lanzadera hormigón  
 31 rpp -5 5 64 73 -160 400 \$Lanzadera estructura  
 32 trc 0 64 -160 0 0 55.5 0 11 \$Lanzadera antorcha cono  
 33 py 64 \$Lanzadera antorcha plano de corte  
 c  
 40 rpp -375 375 -350 550 0 800 \$Aire laboratorio  
 41 rpp -500 500 -475 675 -228 860 \$Hormigón laboratorio  
 c  
 50 rpp -50 50 -75 27 -168 -108 \$Sup. exclus. piscina: polietileno  
 51 rpp -50 50 -75 25 -168 -110 \$Sup. exclus. piscina: hormigón  
 52 rpp -500 500 135 675 -228 -90 \$Sup. exclus. hormigón: izquierda  
 53 rpp 110 500 -135 135 -228 -90 \$Sup. exclus. hormigón: superior  
 54 rpp -110 110 -135 -35 -228 -170 \$Sup. exclus. hormigón: centro  
 55 rpp -500 -110 -135 135 -228 -90 \$Sup. exclus. hormigón: inferior  
 56 rpp -500 500 -475 -135 -228 -90 \$Sup. exclus. hormigón: derecha  
 57 rpp -9.1 9.1 63.2 95 0.5 25.5 \$Sup. exclus. tapa: muesca  
 58 rpp 54 62 -75 73 -6 10 \$Sup. exclus. tapa: raíl 1  
 59 rpp -62 -54 -75 73 -6 10 \$Sup. exclus. tapa: raíl 2  
 c  
 60 rpp -12 12 -27 27 -108 -104.5 \$Almacén fuentes plancha  
 61 rpp -5 5 27 32 -119 -104.5 \$Almacén fuentes antorcha  
 c  
 100 rpp -0.5 0.5 29 30 -98.5 -97.5 \$Celda detectora eje fuente Cf  
 c  
 90 rpp -0.5 0.5 29 30 -97.5 -96.5 \$Celda detectora eje z  
 91 rpp -0.5 0.5 29 30 -96.5 -95.5 \$Celda detectora eje z  
 92 rpp -0.5 0.5 29 30 -95.5 -94.5 \$Celda detectora eje z

93	rpp	-0.5	0.5	29	30	-94.5	-93.5	\$Celda detectora eje z
94	rpp	-0.5	0.5	29	30	-93.5	-92.5	\$Celda detectora eje z
95	rpp	-0.5	0.5	29	30	-90.5	-89.5	\$Celda detectora eje z
96	rpp	-0.5	0.5	29	30	-80.5	-79.5	\$Celda detectora eje z
97	rpp	-0.5	0.5	29	30	-70.5	-69.5	\$Celda detectora eje z
98	rpp	-0.5	0.5	29	30	-50.5	-49.5	\$Celda detectora eje z

c Origen de coordenadas: A nivel del suelo en el centro geométrico de la piscina

## 10.2 Anexo II: Input de MCNP, modelización de los materiales

c Cartas de materiales

c -----

c Acero al carbón AISI-C1024 7.85g/cc (fracción másica)

m1 26054 -0.05739 \$Fe-54  
26056 -0.90060 \$Fe-56  
26057 -0.02090 \$Fe-57  
26058 -0.00301 \$Fe-58  
6000 -0.0022 \$C natural  
25055 -0.0150 \$Mn-55  
15031 -0.0004 \$P-31  
16000 -0.0005 \$S natural

c Agua 1g/cc (fracción másica)

m2 1001 -0.11111 \$H-1  
8016 -0.88889 \$O-16

c Polietileno 0.93g/cc (fracción másica)

m3 1001 -0.144 \$H-1  
6000 -0.856 \$C natural

c Aire 1.225mg/cc (fracción másica)

m4 7014 -0.754 \$N-14  
8016 -0.232 \$O-16  
18040 -0.014 \$Ar-40

c Hormigón armado ordinario 2.15g/cc y 0.5% H en peso (fracción másica)

m5 1001 -0.005 \$H-1  
26054 -0.0015 \$Fe-54  
26056 -0.0229 \$Fe-56  
26057 -0.00053 \$Fe-57  
26058 -0.00007 \$Fe-58  
8016 -0.511 \$O-16  
14000 -0.352 \$Si natural  
20000 -0.044 \$Ca natural  
13027 -0.034 \$Al-27  
11023 -0.029 \$Na-23

c Aluminio

m6 13027 1 \$Al-27

### ***10.3 Anexo III: Input de MCNP, modelización del tratamiento físico***

```
c Cartas de tratamiento físico
c -----
c Se transportan neutrones y fotones
mode n p
c Tratamiento físico neutrones: por defecto
phys:n 100 0 0 -1 -1 0 0
c Tratamiento físico fotones: por defecto
phys:p 100 0 0 0 1 0 0
```

### ***10.4 Anexo IV: Input de MCNP, modelización de las fuentes***

```
c Cartas de fuente
c -----
c Fuentes puntuales: Cf-252 y Am-241/Be-9.
c Posición de las fuentes: dadas por la distribución D1.
c Partículas emitidas por las fuentes: ambas neutrones, distribución D2.
c Distribuciones energéticas de las fuentes: dadas por la distribución D3.
c
sdef pos=D1 par=fpos=D2 erg=fpos=D3
c
sc1 Distribución de posiciones de las fuentes: Cf #1 y Am/Be #6.
si1 l 0 29.5 -98 0 -23 -98 $Coordenadas (x,y,z) de las fuentes
sp1 d 0.973 0.027 $Tasa de emisión relativa de las fuentes
c
c Posiciones del almacén de fuentes:
c # x y: 1 0.0 +29.5 7 -8.6 +12.0 10 +8.6 +12.0
c 2 0.0 +17.0 8 -8.6 +2.0 11 +8.6 +2.0
c 3 0.0 + 7.0 9 -8.6 -8.0 12 +8.6 -8.0
c 4 0.0 - 3.0
c 5 0.0 -13.0
c 6 0.0 -23.0
c z: Fuentes a 98cm bajo el nivel del suelo, según planos.
c
sc2 Distribución de partículas emitidas por las fuentes: neutrones
ds2 l n n
c
sc3 Distribución energética de las fuentes: Cf D31 y Am/Be D32
ds3 s D31 D32
c
```

sc31 Distribución energética de la fuente de Cf.

si31 h 0 4.14E-07 1.00E-06 1.00E-05 5.00E-05 1.00E-04 2.00E-04  
4.00E-04 7.00E-04 1.00E-03 3.00E-03 6.00E-03 1.00E-02  
2.00E-02 4.00E-02 6.00E-02 8.00E-02 1.00E-01 1.50E-01  
2.00E-01 2.50E-01 3.00E-01 3.50E-01 4.00E-01 4.50E-01  
5.00E-01 5.50E-01 6.00E-01 7.00E-01 8.00E-01 9.00E-01  
1.00E+00 1.20E+00 1.40E+00 1.60E+00 1.80E+00 2.00E+00  
2.30E+00 2.60E+00 3.00E+00 3.50E+00 4.00E+00 4.50E+00  
5.00E+00 6.00E+00 7.00E+00 8.00E+00 9.00E+00 1.00E+01  
1.10E+01 1.20E+01 1.30E+01 1.40E+01 1.50E+01  
sp31 0 0 3.10E-10 1.11E-08 1.27E-07 2.76E-07 7.82E-07 2.21E-06  
4.53E-06 5.68E-06 5.51E-05 1.28E-04 2.30E-04 7.74E-04  
2.17E-03 2.80E-03 3.29E-03 3.68E-03 1.05E-02 1.21E-02  
1.33E-02 1.42E-02 1.49E-02 1.55E-02 1.60E-02 1.63E-02  
1.66E-02 1.68E-02 3.38E-02 3.39E-02 3.37E-02 3.33E-02  
6.46E-02 6.12E-02 5.73E-02 5.31E-02 4.88E-02 6.55E-02  
5.67E-02 6.33E-02 6.21E-02 4.68E-02 3.49E-02 2.58E-02  
3.30E-02 1.74E-02 9.01E-03 4.61E-03 2.33E-03 1.17E-03  
5.83E-04 2.88E-04 1.42E-04 6.94E-05

c

sc32 Distribución energética de la fuente de Am/Be.

si32 h 0 4.14E-07 1.10E-01 3.30E-01 5.40E-01 7.50E-01 9.70E-01  
1.18E+00 1.40E+00 1.61E+00 1.82E+00 2.04E+00 2.25E+00  
2.47E+00 2.68E+00 2.92E+00 3.11E+00 3.32E+00 3.54E+00  
3.75E+00 3.97E+00 4.18E+00 4.39E+00 4.61E+00 4.82E+00  
5.04E+00 5.25E+00 5.47E+00 5.68E+00 5.89E+00 6.11E+00  
6.32E+00 6.54E+00 6.75E+00 6.96E+00 7.18E+00 7.39E+00  
7.61E+00 7.82E+00 8.03E+00 8.25E+00 8.46E+00 8.68E+00  
8.89E+00 9.11E+00 9.32E+00 9.53E+00 9.75E+00 9.96E+00  
1.02E+01 1.04E+01 1.06E+01 1.08E+01 1.10E+01  
sp32 0 0 1.44E-02 3.34E-02 3.13E-02 2.81E-02 2.50E-02 2.14E-02  
1.98E-02 1.75E-02 1.92E-02 2.23E-02 2.15E-02 2.25E-02  
2.28E-02 2.95E-02 3.56E-02 3.69E-02 3.46E-02 3.07E-02  
3.00E-02 2.69E-02 2.86E-02 3.18E-02 3.07E-02 3.33E-02  
3.04E-02 2.74E-02 2.33E-02 2.06E-02 1.82E-02 1.77E-02  
2.04E-02 1.83E-02 1.63E-02 1.68E-02 1.68E-02 1.88E-02  
1.84E-02 1.69E-02 1.44E-02 9.68E-03 6.52E-03 4.26E-03  
3.67E-03 3.81E-03 5.06E-03 6.25E-03 5.52E-03 4.68E-03  
3.70E-03 2.78E-03 1.51E-03 3.63E-04

### 10.5 Anexo V: Input de MCNP, geometría para la validación

c Cartas de celdas

```

c -----
10  5 -2.15      -10 58 59          imp:n=1 $Tapa hormigón
11  1 -7.85      -11 58 59          imp:n=1 $Tapa acero
c
20  4 -0.001225 -20                imp:n=1 $Aire piscina
21  2 -1         -21 50            imp:n=1 $Agua piscina
22  3 -0.93      -22 #20 #21 51    imp:n=1 $Polietileno piscina
c
40  4 -0.001225 (-40 #10 #11) : -58 : -59          imp:n=1 $Aire laboratorio
41  5 -2.15      (-41 #40 #10 #11 #22 #20 #21 #71) : -51 imp:n=1 $Hormigón laboratorio
c
70  0  41                imp:n=0 $Universo
71  0 -52 : -53 : -54 : -55 : -56          imp:n=0 $Celda exclusión hormigón
    
```

c Cartas de superficies

```

c -----
10  rpp  -70      70    -95      95    2    25  $Tapa hormigón
11  rpp  -70      70    -95      95    0    2   $Tapa acero
c
20  rpp  -48      48    -73      73   -13    0  $Aire piscina
21  rpp  -48      48    -73      73  -166   -13  $Agua piscina
22  rpp  -50      50    -75      75  -168    0  $Polietileno piscina
c
40  rpp  -375     375   -350     550    0    800  $Aire laboratorio
41  rpp  -500     500   -475     675  -228   860  $Hormigón laboratorio
c
50  rpp  -50      50    -75      27  -168  -108  $Sup. exclus. piscina: polietileno
51  rpp  -50      50    -75      25  -168  -110  $Sup. exclus. piscina: hormigón
52  rpp  -500     500   135     675  -228  -90   $Sup. exclus. hormigón: izquierda
53  rpp  110      500   -135     135  -228  -90   $Sup. exclus. hormigón: superior
54  rpp  -110     110   -135     -35  -228  -170  $Sup. exclus. hormigón: centro
55  rpp  -500    -110   -135     135  -228  -90   $Sup. exclus. hormigón: inferior
56  rpp  -500     500   -475    -135  -228  -90   $Sup. exclus. hormigón: derecha
58  rpp   54      62    -75      73    -6    10  $Sup. exclus. tapa: raíl 1
59  rpp  -62     -54    -75      73    -6    10  $Sup. exclus. tapa: raíl 2
    
```

### ***10.6 Anexo VI: Input de MCNP, término fuente para la validación***

Cartas de fuente para la opción de fuentes distribuidas:

```

c Cartas de fuente
c -----
c Fuentes puntuales: Cf-252 y Am-241/Be-9.
c Posición de las fuentes: dadas por la distribución D1.
c Partículas emitidas por las fuentes: ambas neutrones, distribución D2.
c Distribuciones energéticas de las fuentes: dadas por la distribución D3.
c
sdef pos=D1 par=fpos=D2 erg=fpos=D3
c
sc1 Distribución de posiciones de las fuentes: Cf #4 y Am/Be #6.
si1 l 0 -3 -98 0 -23 -98 $Coordenadas (x,y,z) de las fuentes
sp1 d 0.98123 0.01877 $Tasa de emisión relativa de las fuentes

```

Cartas de fuente para la opción de fuentes distribuidas:

```

c Cartas de fuente
c -----
c Fuentes puntuales: Cf-252 y Am-241/Be-9.
c Posición de las fuentes: dadas por la distribución D1.
c Partículas emitidas por las fuentes: ambas neutrones, distribución D2.
c Distribuciones energéticas de las fuentes: dadas por la distribución D3.
c
sdef pos=D1 par=fpos=D2 erg=fpos=D3
c
sc1 Distribución de posiciones de las fuentes: Cf #4 y Am/Be #6.
si1 l 0 -3 -98 0 -23 -98 $Coordenadas (x,y,z) de las fuentes
sp1 d 1.0 0.0 $Tasa de emisión relativa de las fuentes

```

## ***10.7 Anexo VII: Input de MCNP, detectores puntuales para la validación***

c Cartas de tallies

c -----

fc105 Detector neutrones a 40 cm del borde de la piscina

f105:n -90 -25 100 30

fc115 Detector fotones a 40 cm del borde de la piscina

f115:p -90 -25 100 30

c

fc205 Detector neutrones a 70 cm del borde de la piscina

f205:n -120 -25 100 30

fc215 Detector fotones a 70 cm del borde de la piscina

f215:p -120 -25 100 30

c

fc305 Detector neutrones a 100 cm del borde de la piscina

f305:n -150 -25 100 30

fc315 Detector fotones a 100 cm del borde de la piscina

f315:p -150 -25 100 30

c

fc405 Detector neutrones a 150 cm del borde de la piscina

f405:n -200 -25 100 30

fc415 Detector fotones a 150 cm del borde de la piscina

f415:p -200 -25 100 30

c

fc505 Detector neutrones junto a lanzadera

f505:n 0 75 350 30

fc515 Detector fotones junto a lanzadera

f515:p 0 75 350 30

c

fc605 Detector neutrones a 30 cm de la lanzadera

f605:n 0 105 350 30

fc615 Detector fotones a 30 cm de la lanzadera

f615:p 0 105 350 30

c

fc705 Detector neutrones a 60 cm de la lanzadera

f705:n 0 135 350 30

fc715 Detector fotones a 60 cm de la lanzadera

f715:p 0 135 350 30

c

c Conversión a dosis: funciones de dosis estándar ANS-6.1.1-1977. Unidades microSv/h

df0 iu=2 fac=2.344E+15 log ic=20

### ***10.8 Anexo VIII: Input de MCNP, miscelánea para la validación***

```
c Cartas de miscelánea
c -----
nps 1000000 $ Terminar después de ejecutar 1 millón de historias de partículas
ctme 60     $ Terminar cuando se exceda 60 minutos de tiempo de ejecución
```

Los valores de corte que se muestran variarán en función de los requerimientos de cada simulación.

### ***10.9 Anexo IX: Input de MCNP, mesh tallies para la caracterización***

```
c Cartas de tallies
c -----
c Mesh tallies 11: malla rectangular de de 1cc, fluencia media (1/cm2·s),
c           tally de neutrones, parte no profunda piscina
tmesh
rmesh11:n flux
cora11 -48.0 95i 48.0
corb11 -73.0 145i 73.0
corc11 -108.0 94i -13.0
endmd
```

### ***10.10 Anexo X: Input de MCNP, tallies para la caracterización***

A lo ancho de la piscina (dimensión x).

c Cartas de tallies

c -----

c Tallies FXY4:

c Tallies de fluencia media de neutrones en celda XY

c Unidades (1/cm<sup>2</sup>), normalizado por partículas de la fuente

f004:n 100

f704:n 70

f714:n 71

f724:n 72

f734:n 73

f744:n 74

f754:n 75

f764:n 76

f774:n 77

f784:n 78

c

c Tally de energía: valido para todos los tallies FXY4

c Bins de energía: 100 bins desde 0 a 100 MeV

e 1.0E-09 199log 100.0

A lo largo de la piscina (dimensión y).

c Cartas de tallies

c -----

c Tallies FXY4:

c Tallies de fluencia media de neutrones en celda XY

c Unidades (1/cm<sup>2</sup>), normalizado por partículas de la fuente

f804:n 80

f814:n 81

f824:n 82

f834:n 83

f844:n 84

f854:n 85

f864:n 86

f874:n 87

f884:n 88

c

c Tally de energía: valido para todos los tallies FXY4

c Bins de energía: 100 bins desde 0 a 100 MeV  
e 1.0E-09 199log 100.0

A lo alto de la piscina (dimensión z).

c Cartas de tallies

c -----

c Tallies FXY4:

c Tallies de fluencia media de neutrones en celda XY

c Unidades (1/cm<sup>2</sup>), normalizado por partículas de la fuente

f004:n 100

f904:n 90

f914:n 91

f924:n 92

f934:n 93

f944:n 94

f954:n 95

f964:n 96

f974:n 97

f984:n 98

c

c Tally de energía: valido para todos los tallies FXY4

c Bins de energía: 100 bins desde 0 a 100 MeV  
e 1.0E-09 199log 100.0