

PROYECTO FINAL INTEGRADOR
INGENIERÍA NUCLEAR CON ORIENTACIÓN EN
APLICACIONES

**DESARROLLO DE MODELOS Y
COMPONENTES DE SIMULACIÓN
MONTECARLO PARA DISEÑO DE
EXPERIMENTOS DE IMÁGENES
DEPENDIENTES DE LA LONGITUD
DE ONDA DEL NEUTRÓN EN EL
INSTRUMENTO ASTOR DEL LAHN**

María José Cervantes

Director

Aureliano Tartaglione

Julio 2018

Instituto Dan Beninson
Universidad Nacional de San Martín
Comisión Nacional de Energía Atómica



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



Comisión Nacional
de Energía Atómica

A mis padres por entender mis ausencias

y

a Ale por entenderlo todo.

Agradecimientos

*Y en la calle codo a codo
somos mucho más que dos.*

Mario Benedetti.

Quiero agradecer principalmente a mi director Aureliano por su dedicación, paciencia y entusiasmo en la tarea de la enseñanza, por ser mi maestro y guía en mi inicio en la ciencia.

A mis compañeros del grupo ASTOR en especial a Salvador y Federico que supieron orientarme en mis eternas perdidas, y a Nicolás por ahorrarme los infinitos viajes.

A los que hacen el día a día del Beninson por hacer del Instituto nuestra casa, en especial a Ricardo por ser consejero, amigo y profesor.

A mis compañer@s que alegraron y aliviaron este camino.

A mi cuñada Yamil, mi referente en la ciencia, por sus charlas y consejos.

A mis amigas de la vida porque con ellas todo es más fácil.

A mi familia, la grande, la que siempre te abraza el corazón y muy especialmente a mis hermanos por darme refugio, amor y comprensión.

Resumen

Este Proyecto Final Integrador se realizó en el marco del diseño preliminar del instrumento de neutrografía ASTOR de LAHN.

Consistió por un lado en estudiar el diseño conceptual de la óptica de ASTOR con el fin de analizar su performance.

Y por el otro se estudió el rendimiento espectral del instrumento y se realizó la implementación de un dispositivo de selección de energía.

Estos estudios implicaron el desarrollo de modelos y componentes de simulación Monte Carlo.

En el Estudio del diseño de la óptica de se analizó el comportamiento del haz a lo largo del instrumento, se encontró el ancho efectivo de la fuente de neutrones y se verificaron los requerimientos impuestos sobre de ASTOR.

El estudio del rendimiento espectral de ASTOR implicó la implementación de una una fuente de neutrones dependiente de la energía y de un selector de velocidad.

Índice

Agradecimientos	III
Resumen	IV
1. Introducción	1
1.1. El reactor RA-10	1
1.2. El proyecto LAHN	4
1.3. ASTOR	6
1.4. Objetivos	7
2. El instrumento ASTOR	9
2.1. La técnica de neutrografía.	10
2.1.1. El instrumento de Neutrografía	11
2.1.2. Estado del arte en los instrumentos de Neutrografía	12
2.1.3. Óptica Neutrónica	13
2.1.4. Aspectos espectrales	17
2.1.5. Selector de velocidad	20
2.2. Descripción de ASTOR	22
2.2.1. Modos de operación y requerimientos de ASTOR	28
2.2.2. Óptica de ASTOR	30

2.2.3. Requerimientos espectrales de ASTOR	32
3. McStas	34
3.1. El Programa McStas	34
3.2. Componentes	36
3.2.1. Fuentes	36
3.2.2. Componentes ópticos	37
3.2.3. Detectores o monitores:	38
3.3. ASTOR en McStas	40
4. Estudio del diseño de la óptica de ASTOR	42
4.1. Comportamiento del haz a lo largo del instrumento	43
4.2. Estudio del ancho efectivo de la fuente de neutrones para el instrumento ASTOR	57
4.3. Verificación de la óptica del diseño conceptual de ASTOR . . .	64
5. Estudio de rendimiento espectral de ASTOR e implementa- ción de un sistema de selección de energía de neutrones	68
5.1. Desarrollo de una fuente dependiente de la energía	69
5.2. Implementación de un selector de velocidad	80
5.3. Análisis del rendimiento espectral de ASTOR	85
6. Conclusiones	92
A. Apéndice A	96
B. Apéndice B	102
Bibliografía	116

Índice de figuras

1.1. Esquema de los haces del Reactor RA-10.	3
1.2. Esquema del hall del reactor RA-10 con los instrumentos AS- TOR y ANDES	5
2.1. Instrumento típico de Neutrografía.	11
2.2. Esquema básico que describe la óptica de un instrumento de neutrografía.	14
2.3. Comparación entre el colimador ideal (izquierda) y el colima- dor real (derecha).	16
2.4. Mitad inferior de la forma interna para un colimador ajustado al haz	17
2.5. Sección eficaz total de materiales policristalinos	19
2.6. Esquema de un Selector de velocidad tipo turbina	20
2.7. Esquemas de un selector de velocidad con la ventana de trans- misión	21
2.8. Esquema ilustrativo del instrumento ASTOR	23
2.9. Esquema del RA-10 donde se observa la fuente fría de neutrones y los conductos de extracción	24
2.10. Esquema de los haces GF3 y GF4	25

2.11. Colimador secundario de ASTOR	26
2.12. Modos de operación y requerimientos de ASTOR	30
2.13. Valores teóricos de ASTOR	32
2.14. Espectro de longitud de ondas que se prevé para ASTOR	33
3.1. Esquema del modelado de un instrumento básico	36
3.2. Ejemplo de registro del detector PSD_monitor	39
3.3. Ejemplo de registro del detector Monitor_L	40
3.4. Esquema de la geometría de ASTOR	41
4.1. Esquema de las disposiciones de los detectores bidimensionales en el modelado del instrumento ASTOR.	45
4.2. Esquema del régimen de colimación $L/D=234$ del instrumento ASTOR.	46
4.3. Esquema del régimen de colimación $L/D=6000 \times 500$ del ins- trumento ASTOR.	47
4.4. Proyección del haz en tres dimensiones para las posiciones $L1=4.27$ m, $L2= 5.27$ m y $L3=5.67$ m.	49
4.5. Proyección del haz en tres dimensiones para las posiciones $L4=10$ m, $L2= 13$ m y $L3=17$ m.	50
4.6. Proyección del haz para las posiciones $L1=4.27$ m y $L4=10$ m en el régimen $L/D=234$	51
4.7. Proyección del haz para las posiciones $L1=4.27$ m y $L2=5.27$ m en el régimen $L/D=6000$	52
4.8. Esquematación del perfil horizontal y vertical de una proyec- ción del haz.	53

4.9. Perfiles horizontales en las posiciones $L_1=4.27$ m, $L_2=5.27$ m y $L_3=5.67$ m.	54
4.10. Perfiles horizontales en las posiciones de irradiación $L_4=10$ m, $L_5=13$ m y $L_6=17$ m.	54
4.11. Comparación de los perfiles horizontales en las posiciones de irradiación $L_6=17$ m para los regímenes de colimación $L/D=234$ y $L/D=6000$	56
4.12. Comparación de las proyecciones en las posiciones de irradiación $L_6=17$ m para los regímenes de colimación $L/D=234$ y $L/D=6000$	56
4.13. Esquema del área de máxima iluminación en pixeles.	59
4.14. Perfil horizontal en las posiciones $L_2=5.27$ m.	60
4.15. Perfiles horizontales en las posiciones $L_2=5.27$ m, para distintos anchos de fuente.	61
4.16. Neutrones totales registrados en función del ancho de la fuente para la posición $L_2=5.27$ m.	62
4.17. Perfiles horizontales en las posiciones $L_6=17$ m, para distintos anchos de fuente.	63
4.18. Perfil horizontal y vertical en la posición $L_6=17$ m para el régimen de colimación $L/D=234$	65
4.19. Perfiles horizontales en las posiciones $L_6=17$ m para el régimen de colimación $L/D=6000$	66
5.1. Esquema de grabado de track para ASTOR.	70
5.2. Sistema de ejes MCNP y ejes Fuente	72
5.3. Histogramas de posición (a)Histograma posición en X, (b) Histograma posición en Y,(c)Histograma posición en Z.	73

5.4. Histogramas de dirección (a)Histograma dirección en X, (b) Histograma dirección en Y,(c)Histograma dirección en Z.	75
5.5. Espectro de Energía	77
5.6. Espectro de energias y espectro acumulado	79
5.7. Comparación entre fuente 2018 y fuente Ptrac	80
5.8. Registros de los detectores "monitor_L" para distintas seleccion de λ <i>una fuente uniforme</i>	83
5.9. Grafica de fuente dependiente de la energía junto con los registros de seleccion de energía	85
5.10. Modelo de ASTOR con implementación del selector de velocidad y de la fuente depediente de la energía	86
5.11. Registros del monitor_L de la fuente de ASTOR y la seleccion de $\lambda = 4,5$ y $\lambda = 5,5\text{\AA}$	87
5.12. Proyeccion del haz a 17 m (a)Sin selector de velocidad, (b) $\lambda = 4,5$, (c) $\lambda = 5,5$	88
5.13.	89
5.14. Perfil horizontal del haz con y sin selector de velocidad	91
A.1.	97
A.2.	98
A.3.	99
A.4.	100
B.1.	104
B.2.	105
B.3.	106
B.4.	107

B.5.	108
B.6.	109
B.7.	110
B.8.	111
B.9.	112
B.10.	113
B.11.	114
B.12.	115

Índice de Tablas

1.1. Potencias y flujos de los principales reactores de investigación.	2
2.1. Tres instrumentos de primer nivel mundial	13
4.1. Posiciones y distancias seleccionadas para la evaluación.	45
4.2. Anchos efectivos para las distintas posiciones y regímenes.	64
4.3. Anchos efectivos para las distintas posiciones y regímenes.	66
4.4. Comparación de los FOV simulados con los valores teóricos L/D=234.	67
4.5. Comparación de los FOV simulados con los valores teóricos L/D=6000.	67
5.1. Coeficiente de correlación de Pearson para las distintas com- binaciones de las variables del estado de un neutron.	78
5.2. Parámetros del Selector de Velocidad ASTRIUM.	81
5.3. Frecuencia de rotacion para las longitudes de onda seleccionadas	82
5.4. Resolución y transmisión del selector ASTRIUM.	84
5.5. Area de máxima iluminación en las posiciones de irradiación para la simulación sin selector de velocidad y con las longitud de onda seleccionadas	89

Capítulo 1

Introducción

1.1. El reactor RA-10

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se encuentra en plena construcción del reactor nuclear multipropósito RA-10.

El RA-10 está emplazado en el Centro Atómico Ezeiza y tiene como principal objetivo incrementar la producción de radioisótopos para sostener la demanda a nivel nacional y regional, asegurando el suministro ininterrumpido, previendo el oportuno reemplazo del reactor RA-3, actualmente utilizado a tales fines.

Asimismo, la llegada del RA-10 sumará desarrollo tecnológico en el campo de los combustibles y materiales nucleares, mediante una facilidad de irradiación adecuada que permita incrementar y consolidar la experiencia que el país tiene en el área y expandiendo la oferta de servicios al mercado mundial.

El RA-10 también ofrecerá al sistema científico-tecnológico nacional nuevas capacidades basadas en técnicas neutrónicas avanzadas.

El RA-10 es un reactor tipo pileta que tendrá una potencia nominal de 30 MW y se espera que cuente con un ciclo de operación continua de 26 días;

utilizará agua liviana como moderador y refrigerante en caudal ascendente, y agua pesada como reflector. El núcleo es de diseño compacto con 19 elementos combustibles de bajo enriquecimiento tipo MTR. [1]

La potencia y flujo de neutrones que proveerá el reactor es comparable a los reactores más modernos del mundo. En la tabla (1.1) se detallan las potencias y flujos de los principales reactores de investigación del mundo.

	ILL [2]	FRMII[3]	ANSTO[4]	RA-10[5]
Potencia [MW]	57	20	20	30
Flujo térmico máximo[n/cm ² s]	1.5 10 ¹⁵	7 10 ¹⁴	3 10 ¹⁴	4 10 ¹⁴
Flujo frío promedio[n/cm ² s]	4 10 ¹⁴	1 10 ¹⁴	0.8 10 ¹⁴	1 10 ¹⁴

Tabla 1.1: Potencias y flujos de los principales reactores de investigación.

El reactor RA-10 contará con una fuente fría y una fuente térmica que proveerán, a través de ocho canales de extracción, un abanico de opciones espectrales para el montaje de instrumentos.

La fuente fría consiste en un moderador de deuterio líquido a 23 K que re-termaliza los neutrones provenientes del reflector, hasta que la distribución de sus energías se equilibra con la del medio.

El RA-10 dispondrá de ocho haces de neutrones dispuestos de forma tangencial al núcleo: cuatro fríos (GF1, GF2, GF3 y GF4) que emergen de la fuente fría a través de dos conductos de extracción y cuatro térmicos (GT1, GT2, GT3 y GT4) que emergen del reflector a través de otros dos conductos de extracción, esto se observa en la Figura (1.1).

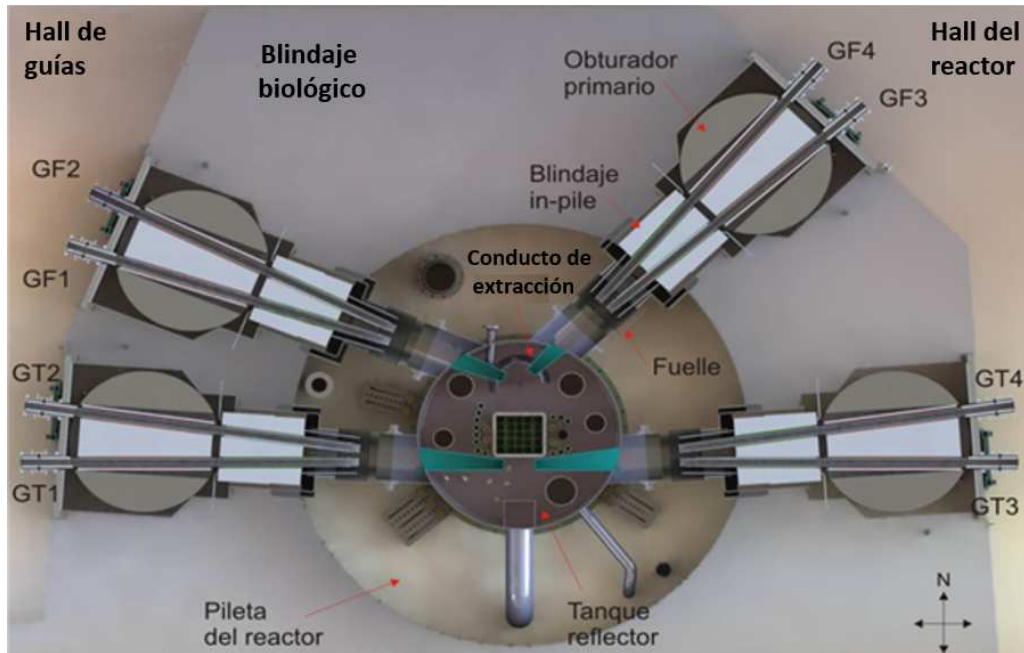


Figura 1.1: Esquema de los haces del Reactor RA-10.

Los haces térmicos (GT3 y GT4) y los haces fríos (GF3 y GF4) están destinados a su uso en el hall del reactor, mientras que el resto se dirige hacia el hall de guías, que contará con un amplio espacio para la instalación de una variedad de instrumentos.

Los haces ubicados en el hall del reactor no prevén la utilización de guías de neutrones. A su vez, los haces GT3 y GF4 están destinados a la instalación de instrumentos mientras que los haces GT4 y GF3 no serán utilizados en forma inmediata, por lo que inicialmente se colocará un tapón-blindaje en sus conductos respectivos dentro del obturador primario. [6]

Junto con el avance de la construcción del reactor RA-10, está en marcha el Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN) con el objeto de proveer haces de neutrones térmicos y fríos para aplicaciones en ciencia y tecnología. El LAHN se encuentra desarrollando los primeros instrumentos, que se pondrán en servicio conjuntamente con el arranque del reactor: el

difractómetro de neutrones (ANDES) y el neutrógrafo/tomógrafo (ASTOR).

1.2. El proyecto LAHN

El LAHN tiene como objetivo fundamental la explotación plena de los haces de neutrones provenientes del reactor RA-10 a través de la definición, diseño, construcción e implementación de instrumentos y la formación de operadores, técnicos y científicos. La primera etapa del proyecto LAHN incluye dos instrumentos de aplicación en investigación y desarrollo de materiales. Uno de ellos es un Escáner de Tensiones -Difractómetro Multipropósito: ANDES (Advanced Non-Destructive Evaluation of Stress) y el otro es un tomógrafo: ASTOR (Advanced System for TOMography and Radiography).[7]

En la Figura (1.2) se ilustra un plano del hall del reactor en la cual se observa la disposición de ambos instrumentos.

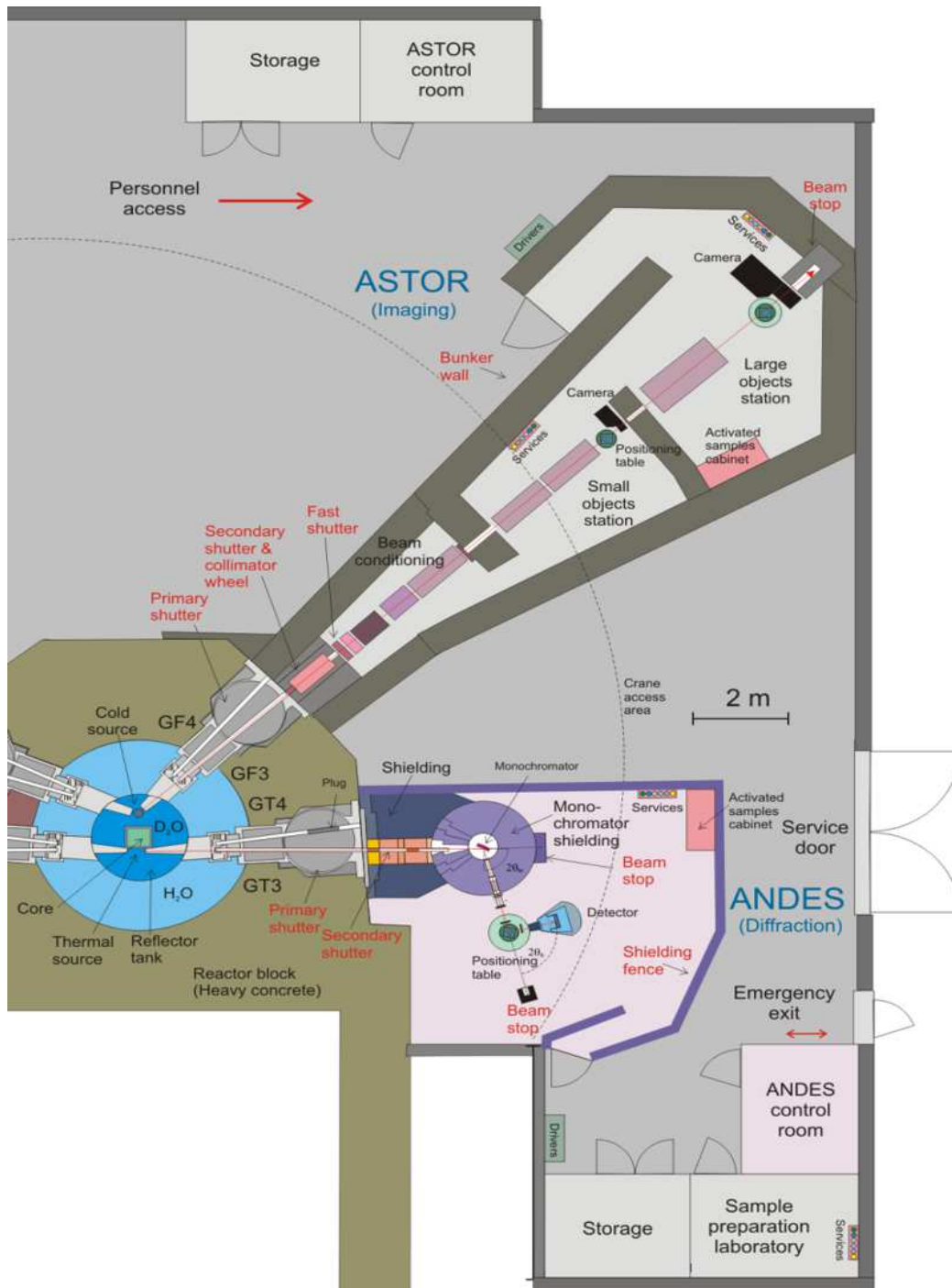


Figura 1.2: Esquema del hall del reactor RA-10 con los instrumentos ASTOR y ANDES

1.3. ASTOR

El instrumento ASTOR es un tomógrafo que tiene por finalidad la obtención de imágenes con neutrones fríos para la visualización de estructuras internas, procesos y propiedades físico/mecánicas de objetos y materiales de manera no invasiva y no destructiva.

Además de imágenes bidimensionales, en ASTOR se podrán reconstruir imágenes tridimensionales o tomografías de alta resolución, a partir de una secuencia de imágenes del objeto tomadas a distintos ángulos. A su vez - aprovechando la gran penetración de los neutrones- permitirá realizar experimentos con una múltiple variedad de condiciones físicas, provistas por distintos entornos de muestra.

ASTOR será un instrumento de alta performance en el estado del arte en la aplicación de las técnicas de imágenes con neutrones; se espera que sea un instrumento versátil y contará con distintas opciones de colimación y flujo de neutrones.

Además de los modos de operación convencionales para obtener imágenes de alta resolución espacial, alta resolución temporal y tomografías, el uso de un haz de neutrones fríos permitirá explotar técnicas que requieren la selección de neutrones por su longitud de onda.

En la actualidad ASTOR se encuentra finalizando su etapa de ingeniería preliminar y se espera que la ingeniería básica se desarrolle durante todo el 2019. [8]

1.4. Objetivos

Este Proyecto Final Integrador se realizó en el marco del diseño preliminar del instrumento de neutrografía ASTOR.

Tiene por finalidad el análisis de parte de la performance de ASTOR; en particular se realizó un primer estudio del diseño de la óptica y del rendimiento espectral implementando una fuente de neutrones y un método de selección de energía.

Para el cumplimiento de estos objetivos se desarrollaron modelos de simulación Monte Carlo con el programa McStas.

El estudio se separó en dos etapas definidas; en primer término, se realizó un análisis del diseño de la óptica, pretendiendo además aprender el correcto uso del programa McStas e incorporar los conocimientos con respecto al instrumento ASTOR.

Luego se realizó un estudio sobre el rendimiento espectral de ASTOR, que implicó la implementación y desarrollo de una fuente dependiente de la energía y de un dispositivo activo como un selector de velocidad.

Los estudios se diagramaron de modo tal que las tareas fueran incrementando su complejidad a medida que fueran realizadas.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera:

- En el Capítulo 2 se hace una descripción en detalle del instrumento ASTOR, destacando sus características particulares que son relevantes en los estudios realizados.
- En el Capítulo 3 se realiza una breve descripción de la herramienta utilizada -McStas- y de los modelos desarrollados para la geometría de

ASTOR.

- El Capítulo 4 se centra en los estudios respecto del diseño de la óptica.
- El Capítulo 5 se enfoca en los estudios relacionados con los aspectos espectrales de ASTOR y en la implementación de un sistema de selección de energía de neutrones.
- Finalmente, en el Capítulo 6 se realiza una exposición de las discusiones y conclusiones de los estudios realizados.

Capítulo 2

El instrumento ASTOR

Este capítulo se centra en la descripción del instrumento ASTOR y tiene como objetivo realizar una caracterización general a fin de facilitar la comprensión de los estudios realizados en los Capítulos 4 y 5.

Se divide el capítulo en dos secciones: en la primera sección se comienza con una breve explicación de la técnica de neutrografía y del estado de arte de los instrumentos existentes. Luego se realiza una descripción de los parámetros de la óptica neutrónica y de los aspectos espectrales de un neutrógrafo. Por último se realiza una descripción de un selector de velocidad que es uno de los ejes del Capítulo 5.

En la segunda sección se realiza una descripción detallada del instrumento ASTOR, seguidamente se exponen los modos de operación y los requerimientos impuestos sobre el instrumento tanto de la óptica como espectrales.

2.1. La técnica de neutrografía.

La técnica de radiografía con neutrones o “neutrografía” es análoga a la radiografía con rayos X. Consiste en irradiar una muestra con un haz colimado de neutrones y registrar en dos dimensiones la variación espacial de la intensidad del haz transmitido a través de la misma. La técnica también permite realizar tomografías a partir de la reconstrucción de una secuencia de imágenes del objeto tomadas a distintos ángulos [9].

La neutrografía moderna aprovecha las características únicas de los neutrones, y en las técnicas más avanzadas incluso una combinación de estas, a saber:

- No poseen carga eléctrica por lo que no interactúan con los campos eléctricos o de Coulomb, sino que interactúan con los núcleos atómicos, lo que los vuelve particularmente penetrantes en materiales pesados.
- Poseen momento magnético permitiendo estudiar materiales con propiedades y fases magnéticas.
- Son fuertemente dispersados o absorbidos por elementos livianos como el hidrógeno, el oxígeno o el litio.
- Los neutrones tienen comportamientos muy distintos entre elementos adyacentes de la tabla periódica, inclusive entre distintos isótopos de un mismo elemento.

La combinación de todas estas propiedades en un haz hace de la radiografía con neutrones una técnica única para estudiar de modo no destructivo la estructura interna de los objetos y las propiedades magnéticas de los materiales.

2.1.1. El instrumento de Neutrografía

Los instrumentos de neutrografía cuentan con cuatro elementos fundamentales: una fuente, un colimador, un objeto a estudiar y un detector. En la Figura (2.1) se muestra un esquema de un instrumento tipo.

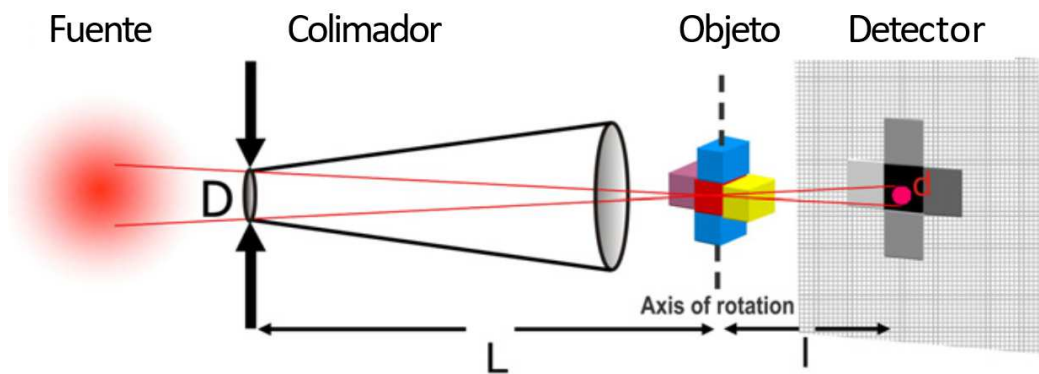


Figura 2.1: Instrumento típico de Neutrografía.

Una fuente de neutrones puede ser un reactor nuclear donde los neutrones son extraídos del núcleo.

Los colimadores se utilizan para reducir la penumbra y mejorar la performance del instrumento. El objetivo del colimador es conformar un haz cuasi-paralelo de neutrones a la vez que le confiere características geométricas. Estas características geométricas se expresan mediante la relación L/D , donde D es el diámetro de la apertura del colimador y L es la longitud desde la apertura al detector. [10]

El método moderno más difundido de detección consiste en emplear placas centelladoras [11], que al absorber neutrones emiten luz visible. El centellador es observado a través del uso de cámaras digitales especialmente pensadas para este fin, conocidas como cámaras CCD o CMOS de tipo científico. [12]

2.1.2. Estado del arte en los instrumentos de Neutrografía

El crecimiento de la demanda de instalaciones de haces de neutrones que implementan instrumentos de radiografía con neutrones, vino de la mano con la aparición y paulatina mejora de la performance de las cámaras para el registro de imágenes digitales. La historia de la neutrografía y sus avances se encuentra explicada en [13].

Muchos de los instrumentos más modernos han ido mejorando su diseño e incorporando nuevas tecnologías en forma continua.

Los instrumentos de imágenes con neutrones pueden funcionar tanto en haces con espectros de neutrones térmicos [14], rápidos [15] o fríos [16].

El uso de un tipo de espectro u otro en esta clase de instrumentos, ofrece ventajas y desventajas. Sin embargo, los instrumentos que funcionan en haces con espectros de neutrones fríos extienden las aplicaciones de la técnica permitiendo la selección de energía en el rango de neutrones de longitud de onda larga (típicamente por encima de 3 Å) manteniendo flujos suficientemente altos. Por esta razón los instrumentos de imágenes en haces de neutrones fríos son los que en muchos laboratorios de haces se han tratado de implementar en los últimos diez años [17][18][19].

Todos los instrumentos de primer nivel internacional cuenta con diversos regímenes o modos de operación que implican la selección de valores de colimación L/D diversos, a fin de adaptar el compromiso entre resolución espacial y flujo incidente en cada problema particular.

La Tabla (2.1) presenta los tres instrumentos que definen el estado del arte en los instrumentos de neutrografía.

País	Instrumento	Espectro	L/D	FOV	Flujos
Alemania	ANTARES	Frío	200-400-800- 8000	35x35	$1 \cdot 10^8$
Suiza	ICON	Frío	150-300-600-1200-12000	25x25	$2 \cdot 10^7$
Australia	DINGO	Térmico	500-1000	20x20	$4,5 \cdot 10^7$

Tabla 2.1: Tres instrumentos de primer nivel mundial

En nuestro país existe un instrumento de imágenes por neutrones instalado en el reactor RA-6 del Centro Atómico Bariloche. Este instrumento tiene un flujo térmico de $2,4 \cdot 10^6 n/cm^2s$ y una resolución espacial máxima de ~ 120 micrones. [20]

También en el RA-3 se han realizado estudios para la caracterización del haz para el uso de neutrografía, y se han comenzado a realizar neutrografías experimentales. El flujo térmico en la facilidad del RA-3 es de $3,4 \cdot 10^6 n/cm^2s$ y la resolución espacial máxima de ~ 700 micrones. [21]

Con el surgimiento del proyecto RA-10 se espera contar con un instrumento de imágenes con neutrones de clase mundial, de alta versatilidad y capaz de afrontar las mayores exigencias de futuros usuarios del país y del mundo. Se espera que cuente con un flujo máximo de $\sim 10^8 n/cm^2s$. [22]

2.1.3. Óptica Neutrónica

La óptica neutrónica de un instrumento de radiografía de neutrones consiste en tratar de observar con un detector la mayor parte de una fuente de neutrones, a través de una apertura o pinhole.

En la Figura (2.2) se representa un esquema básico que describe la óptica de un instrumento de radiografía con neutrones, donde se observan los parámetros geométricos.

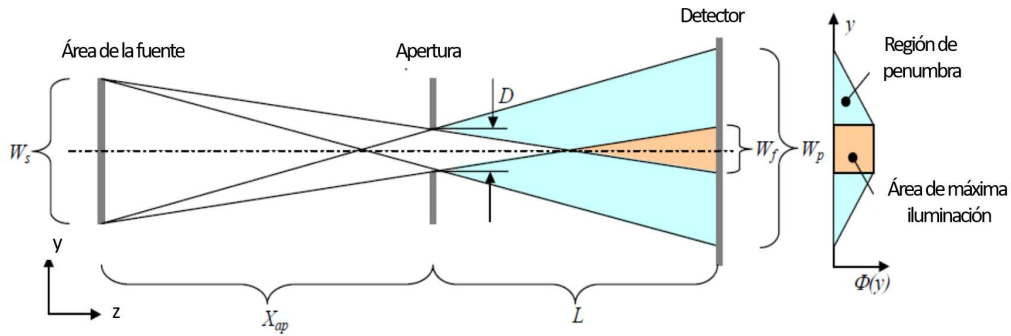


Figura 2.2: Esquema básico que describe la óptica de un instrumento de neutrografía.

Parámetros principales:

- Colimación:

La divergencia del haz está definida por el diámetro de la apertura D y la distancia de este al detector L . Normalmente se define como L/D y es uno de los parámetros principales que permiten describir un instrumento ya que su valor sintetiza el grado de colimación del haz. Se busca que los neutrones alcancen el detector definiendo un haz con la menor divergencia posible, lo que equivale a valores altos de L/D .

- Área de máxima iluminación:

El diámetro de la apertura y la distancia desde ésta al detector, no sólo definen el grado de colimación del haz, sino que también determinan el tamaño del área de máxima iluminación. El área de máxima iluminación FOV (por sus siglas en inglés, *field of view*), es el tamaño del área de iluminación uniforme, y viene dada por la Ecuación (2.1).

$$W_f = \frac{(-D + W_s)}{X_{ap}}(X_{ap} + L) - W_s \quad (2.1)$$

Donde W_f es el área de máxima iluminación; W_s es el tamaño de la

fuelle, X_{ap} la distancia de la fuente a la apertura o *pinhole*. [9]

- Resolución intrínseca:

La resolución espacial intrínseca del instrumento da cuenta de la nitidez de una imagen, por un haz transmitido a través de un objeto, debido a factores geométricos.

La resolución del instrumento se encuentra relacionada con el grado de colimación del haz de neutrones. Si la fuente de radiación no es puntual sino que tiene un diámetro D , un punto de la muestra que se encuentra a una distancia l del detector y suponiendo que la distancia fuente-muestra es mucho mayor que la distancia entre la muestra y el detector, entonces, la resolución intrínseca se puede expresar por la Ecuación (2.2). [9]

$$d = \frac{l}{L/D} \quad (2.2)$$

Un haz bien colimado (es decir, con baja divergencia) es por lo tanto un requisito previo fundamental para lograr una alta resolución espacial.

- Flujo:

El flujo integrado de neutrones incidente sobre el objeto es determinante para estimar el tiempo mínimo requerido para realizar una imagen. El flujo sobre el detector Φ es inversamente proporcional a la colimación del haz, de acuerdo al flujo de neutrones en la apertura y viene dado por la Ecuación (2.1.3).

$$\Phi = \frac{\Phi_s}{16(L/D)^2} \quad (2.3)$$

Donde Φ_s es el flujo de neutrones en la apertura.

Por lo expuesto anteriormente tanto el tamaño, la ubicación y la forma de la apertura definen la resolución espacial de la instalación, el tamaño del área de máxima iluminación y el flujo de neutrones.

Se deduce de las ecuaciones que el flujo y resolución espacial no son posibles de maximizar simultáneamente debido a su dependencia con L/D de manera inversa. Es decir que no es posible satisfacer una condición de máximo flujo y máxima resolución espacial. Por lo tanto, elegir la relación L/D para una instalación es siempre un compromiso entre alta intensidad (alta relación señal/ruido) y alta resolución.

2.1.3.1. Colimador ideal

El colimador ideal es una geometría óptima donde un haz que comienza de forma cuadrada en la fuente de neutrones, confluye en forma circular en la apertura o *pinhole*, y continúa hasta hacerse nuevamente cuadrada en el detector, donde solo se proyecta FOV , es decir con el colimador ideal no existe la región penumbra. El colimador ideal es un concepto teórico. La diferencia entre el colimador ideal y el colimador real se observa en la Figura (2.3)

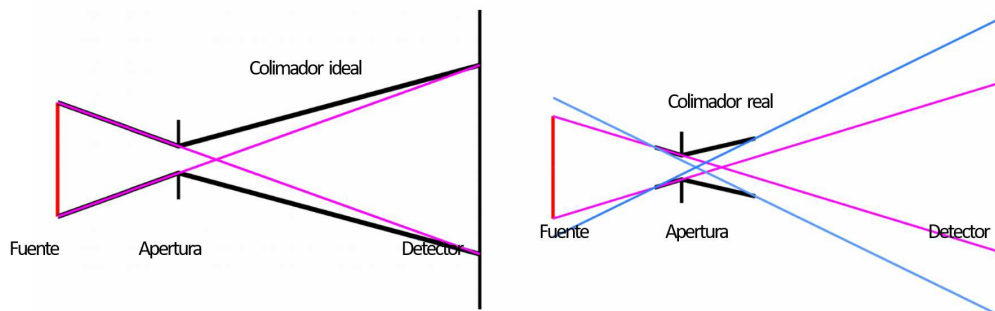


Figura 2.3: Comparación entre el colimador ideal (izquierda) y el colimador real (derecha).

En la Figura (2.4) se observa una sección de un colimador ideal donde queda de manifiesto los cambios en la forma que comienza de forma cuadrada y confluye en forma circular este es el concepto de colimador ajustado al haz "beam adjusted" [23].

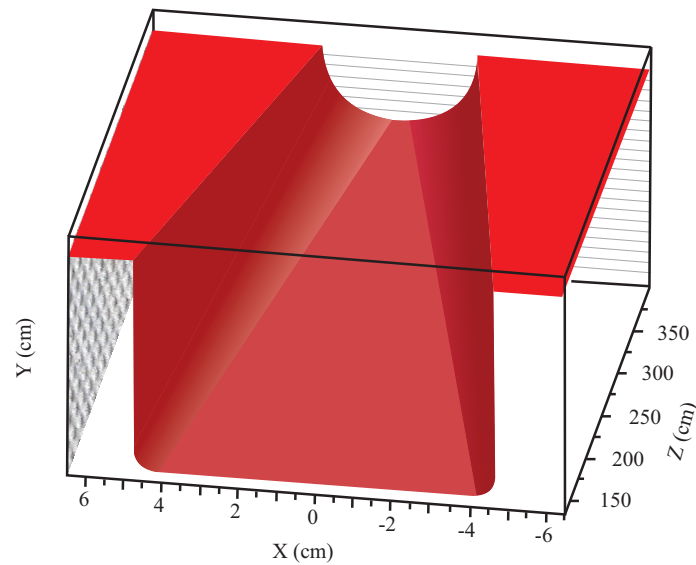


Figura 2.4: Mitad inferior de la forma interna para un colimador ajustado al haz

2.1.4. Aspectos espectrales

El espectro de neutrones representa el flujo diferencial de neutrones en función de la energía o de la longitud de onda.

Los flujos de neutrones más utilizados para la obtención de imágenes, son policromáticos, es decir, poseen un amplio rango de energías.

En la mayoría de los casos, se utilizan neutrones termalizados, que poseen una distribución de tipo maxwelliana alrededor de la energía correspondiente a la temperatura del moderador. La utilización de haces rápidos se justifica

para lograr una mayor penetración en la muestra.

Sin embargo, el uso de neutrones fríos, pese a una menor penetración, cuenta con importantes ventajas:

- Genera un mayor contraste entre elementos livianos y pesados debido a la mayor diferencia relativa de sección eficaz en este rango de energías.
- Produce una mayor resolución espacial, debido al uso de placas detectoras más delgadas porque la eficiencia de absorción en los centelladores es mayor en este rango.
- Cuenta con la posibilidad de implementar distintas técnicas de contraste a través de la utilización de dispositivos que permiten monocromar el haz.

Estas técnicas sirven para examinar la variación espacial en la microestructura o el estado físico del material. La presencia de texturas cristalográficas en materiales policristalinos puede revelarse utilizando haces con longitudes de onda bien definidas ~ 2 . Esto es posible debido a que la mayoría de los materiales policristalinos de interés poseen cambios bruscos en su sección eficaz, llamados cortes de Bragg, para longitudes de onda entre 2 \AA y 6 \AA . [24][25][26]

Para poder utilizar esta técnica el espectro debe poseer una proporción alta de neutrones de longitudes de onda mayor a 2 \AA (espectro frío). En la Figura (2.5) se grafica la sección eficaz total de materiales poli cristalinos. [27]

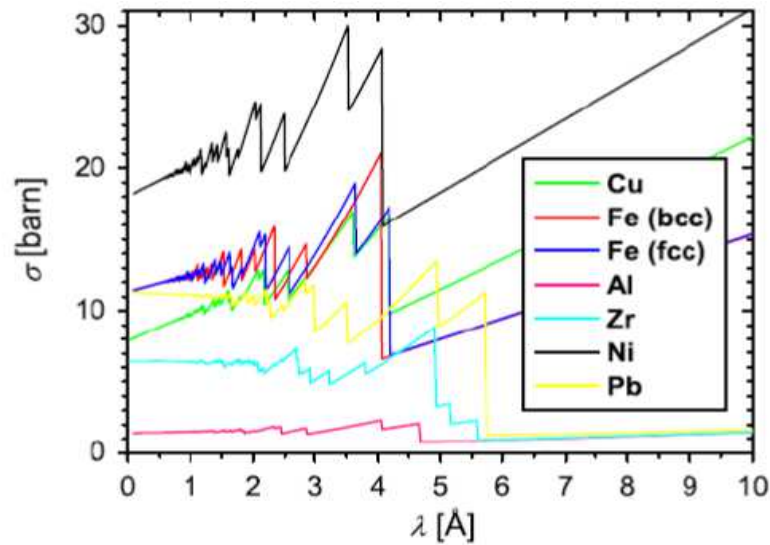


Figura 2.5: Sección eficaz total de materiales policristalinos

Las técnicas de imagen que dependen de la selección de la longitud de onda de los neutrones, para ser implementadas en un haz continuo como el de un reactor, requieren del uso de dispositivos para la selección de la energía estos pueden ser: selector de velocidades, doble monocromador, arreglos de chopper o filtros en el haz transmitido que permiten separar las componentes de dispersión de bajo ángulo.

Los dispositivos se clasifican en activos y pasivos: entre los pasivos se encuentran los filtros como por ejemplo el berilio, que por su sección eficaz remueve del haz aquellos neutrones con longitudes de onda menores a 4 \AA .

Dentro de los dispositivos activos se encuentran los selectores de velocidad tipo turbina o de doble cristal, estos dispositivos permiten seleccionar un rango de longitudes de onda acotado, la diferencia fundamental entre ellos es el flujo de neutrones resultante y la resolución con la que se logra la selección.

Los haces monocromáticos producidos por selectores de velocidad o cristales monocromadores, están caracterizados por la energía o longitud de onda

medias. Al emplear un dispositivo de selección de velocidades interesa no sólo el valor de longitud de onda más probable que tiene el espectro saliente, sino también su resolución $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$.

2.1.5. Selector de velocidad

Un selector de velocidad de neutrones es un dispositivo que permite que los neutrones de una velocidad, o energía, definida pasen a través de él, mientras que absorbe los demás neutrones produciendo un haz de neutrones monocromático.

Un selector de velocidad tipo turbina es un cilindro con un sistema de álabes helicoidales girando sobre su eje a una frecuencia constante ω que varia dependiendo de la selección de la velocidad de los neutrones requerida. En la Figura(2.6) se esquematiza un selector de velocidad.

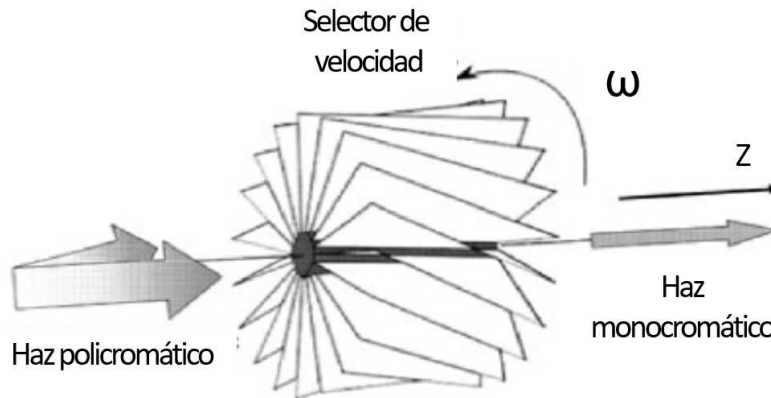


Figura 2.6: Esquema de un Selector de velocidad tipo turbina

Los parámetros típicos de un selector de velocidad son la longitud del tambor giratorio L , el radio R y la trayectoria helicoidal que se caracteriza por un ángulo de inclinación α que representa la diferencia angular entre

el álabe a la entrada y el álabe a la salida. Esto se puede observar en la Figura(2.7)

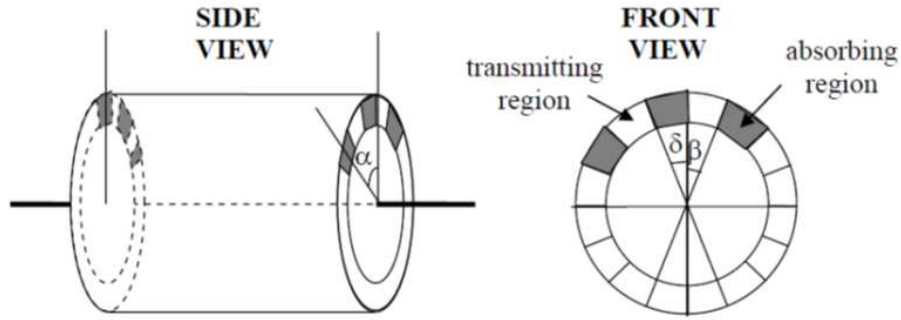


Figura 2.7: Esquemas de un selector de velocidad con la ventana de transmisión

Igualando el tiempo que tardan los neutrones en recorrer la distancia L hasta el tiempo que tarda el selector para girar el ángulo α da una relación entre la longitud de onda de neutrones λ y la velocidad de rotación ω que viene dada por la Ecuación (2.4).[28]

$$\lambda = \frac{\alpha h}{L m_n \omega} \quad (2.4)$$

Donde h es la constante de Planck, y m_n es la masa de neutrones. Por lo tanto, la selección de la energía o longitud de onda que se requiera para un experimento dependerá de la velocidad de rotación del selector de velocidad.

El cilindro del selector de velocidad está construido de un material con una sección transversal de alta absorción para los neutrones, de modo que los neutrones de longitud de onda no seleccionada serán absorbidos en el cuerpo del selector.

Debido a las limitaciones físicas de los materiales y motores, que limitan

la velocidad máxima de rotación del selector, estos dispositivos sólo son útiles para neutrones relativamente lentos o fríos.

- Transmisión del selector

El porcentaje de neutrones de la longitud de onda seleccionada que se transmitirán dependerá de la proporción de área descubierta de la cara de entrada. Se definen dos ángulos: β es el ángulo que subtiende la ventana de transmisión y δ es el ángulo correspondiente a la región absorbente entre dos ventanas transmisoras. (Figura(2.7)).

Entonces la transmisión viene dada por la Ecuación (2.5).

$$T = \frac{\beta}{\beta + \delta} \quad (2.5)$$

- Resolución

Debido a que la ranura tiene un ancho finito los neutrones de una longitud de onda no seleccionada pueden también transmitirse. La resolución viene dada por la Ecuación (2.6):

$$R = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (2.6)$$

2.2. Descripción de ASTOR

ASTOR se instalará sobre el haz GF4 que es uno de los haces fríos del RA-10; y estará orientado hacia el hall del reactor. Si bien inicialmente ASTOR fue pensado para instalarse en el conducto GF3 finalmente, como parte del diseño conceptual, se dispuso su ubicación en el GF4. Una de las razones por las cuales se eligió GF4 es por la disminución de la tasa de dosis por fotones directos provenientes de la fuente; esto se manifiesta en una mejora prevista

de la relación señal/ruido del instrumento.

En la Figura (2.8) se presenta una ilustración de ASTOR.

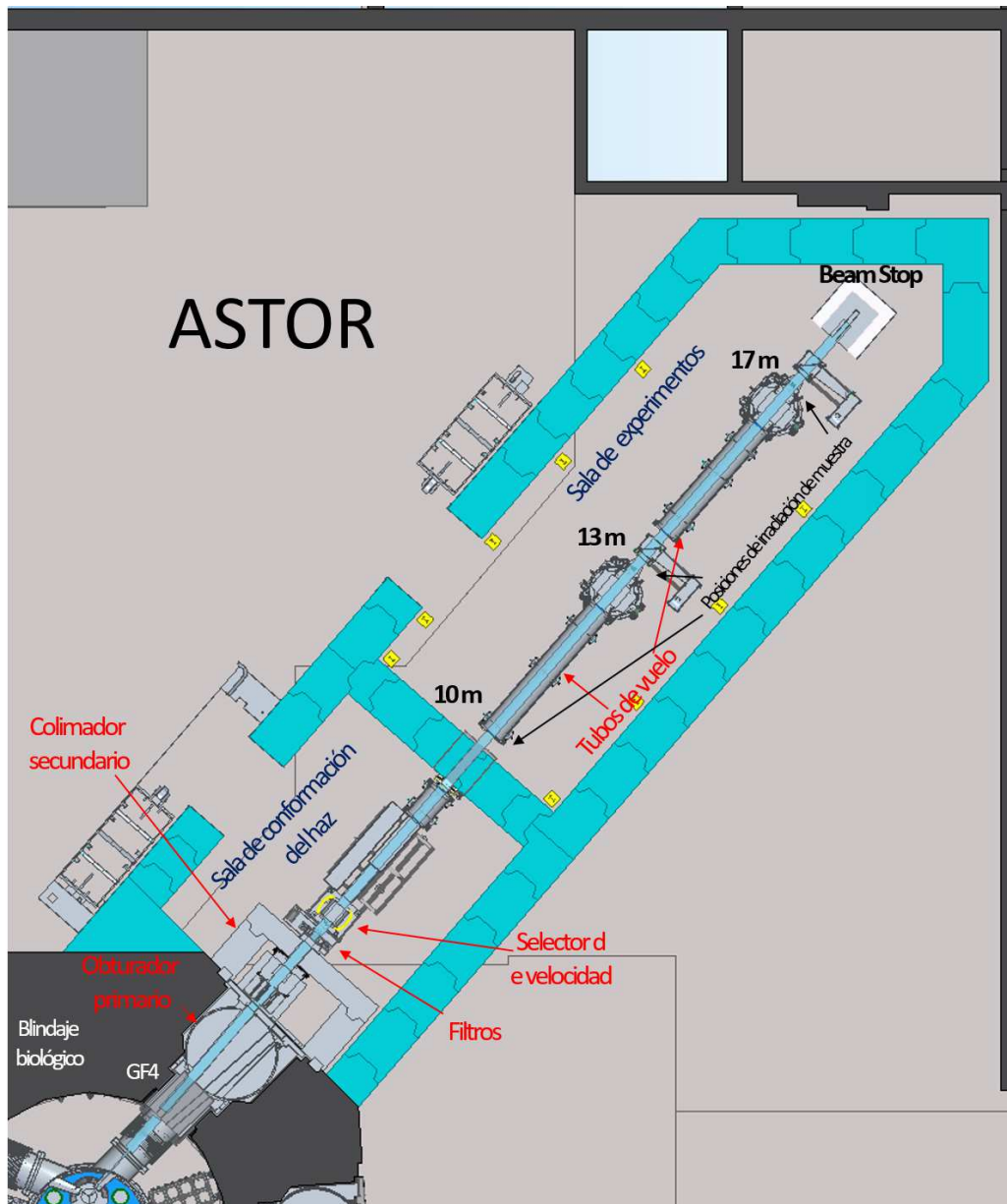


Figura 2.8: Esquema ilustrativo del instrumento ASTOR

El instrumento ASTOR comienza en la ventana del conducto de extracción que mira a la fuente fría y se extiende, pasando por el blindaje biológico

del reactor, hasta el *beam stop* ubicado en el hall del reactor.

La ventana del conducto de extracción mide 10 cm de ancho por 30 cm de alto, desde el diseño del instrumento es lo que se considera la fuente de neutrones del mismo, y da inicio al conducto de extracción que atraviesa el agua pesada del tanque reflector. El conducto de extracción es un conducto estanco que se prevé rellenar con helio para proporcionar refrigeración y minimizar la atenuación del haz de neutrones.

En la Figura 2.9 se ilustra, de manera esquemática, la fuente fría de neutrones inmersa en el tanque reflector del RA-10, mirando a la fuente fría se encuentra el conducto de extracción o, en la jerga, nariz.

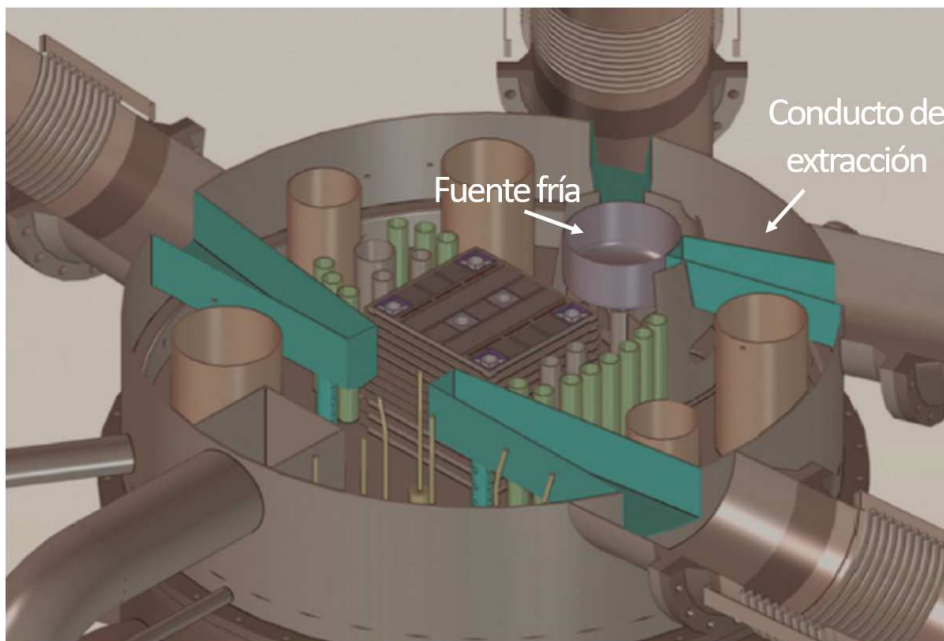


Figura 2.9: Esquema del RA-10 donde se observa la fuente fría de neutrones y los conductos de extracción

Dentro del conducto de extracción se encuentran los dos canales fríos GF3 y GF4, esto se observa en la Figura (2.10). Estos canales no tienen guía de neutrones y el canal GF3 estará anulado con un tapón-blindaje.

Dentro del blindaje biológico del reactor los canales quedan definidos por el blindaje in-pile que tiene como función bloquear la radiación redundante que proviene del canal.

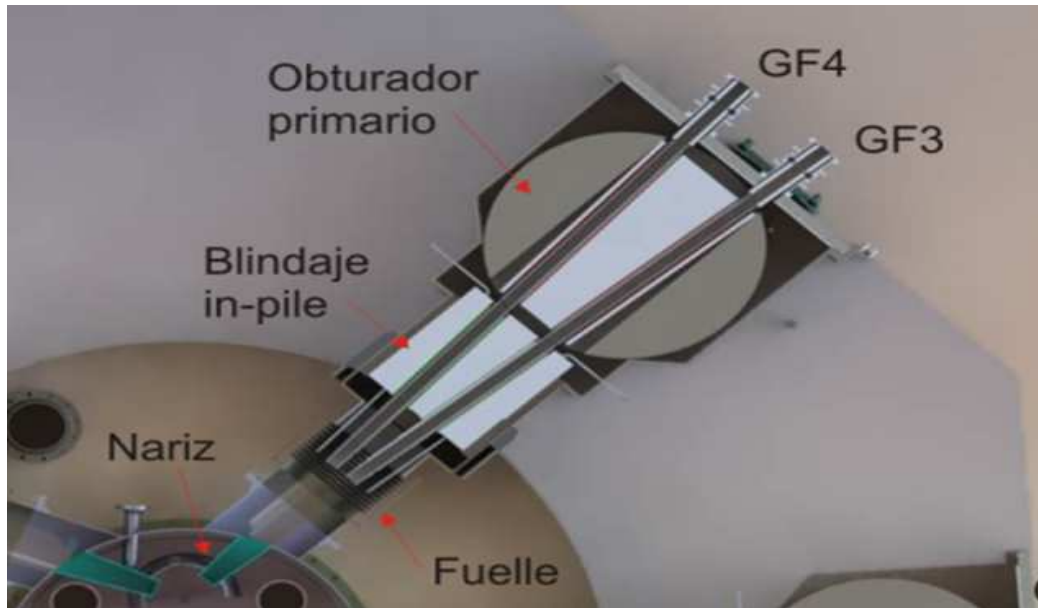


Figura 2.10: Esquema de los haces GF3 y GF4

Seguidamente, también dentro del blindaje biológico del reactor, se encuentra el colimador y el obturador primario. El obturador primario consiste en un tambor giratorio que sirve para la interrupción del haz de neutrones (y radiación gamma) durante el funcionamiento del reactor.

El colimador primario de ASTOR se encuentra embebido dentro del obturador primario; y es un dispositivo que define el grado de colimación más bajo del instrumento a través de la apertura o *pinhole*. Al mismo tiempo, el colimador, recorta en una instancia temprana aquella radiación (neutrones y gamma) que no contribuye a la performance del instrumento.

Contiguo al blindaje biológico del reactor se prevé instalar el sistema de colimación secundaria. Este dispositivo consiste en un tambor o *drum*

cilíndrico macizo de acero borado, con eje de rotación horizontal, que permite seleccionar entre opciones de colimación del haz, adicionales y compatibles con la que define el colimador primario.(Figura(2.11))

A continuación, estará el obturador secundario que es un dispositivo de accionamiento vertical que actúa bloqueando el haz de neutrones y gammas de modo tal que sea seguro el acceso a las diferentes salas del instrumento según este se cierre al mismo tiempo que el obturador primario (acceso a todo el instrumento), o sólo se accione el obturador secundario (acceso únicamente a la sala de experimentos).

Tanto el colimador primario como el secundario son los responsables de la conformación geométrica del haz para las distintas configuraciones de uso de ASTOR.

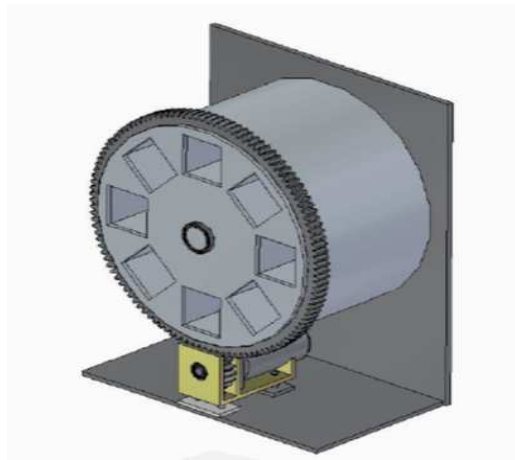


Figura 2.11: Colimador secundario de ASTOR

La sala de conformación del haz, que comienza inmediatamente después del sistema colimador/obturador secundario se extiende hasta una pared/blindaje, que la separa de la sala de experimentos. Dentro de la sala se hallan los componentes dedicados a la conformación espectral del haz de neutrones.

En esta sala se prevé instalar un selector de filtros que se puede optar

por colocar en el haz, como por ejemplo berilio que deja pasar los neutrones con longitud de onda mayor a 4 Å, cadmio que deja pasar los neutrones epitérmicos; un filtro de neutrones rápidos de zafiro y posiciones para filtros de radiación gamma de bismuto.

Para realizar la selección de neutrones según su energía, ASTOR contará con dos componentes posibles según los requerimientos del usuario: un selector de velocidad mecánico y un selector de doble cristal.

El recorrido del haz, en aquellos tramos sin componentes de conformación, se completará con tubos de vuelo evacuados o con helio a presión atmosférica, para transportar el haz disminuyendo las pérdidas por absorción de neutrones y la activación del Argón en el aire. Todos los tramos de tubo de vuelo serán intercambiables o podrán removerse del haz según la configuración del experimento.

Entre las salas de conformación y de experimentos habrá un tubo de vuelo y limitador de haz pasivo, embebido dentro de la pared de separación de 80 cm de espesor. El limitador de haz es un dispositivo que sirve para delimitar las dimensiones máximas en X e Y del haz incidente mediante el uso de algún material absorbente de neutrones y motores que ajustan su tamaño. Está ubicado a continuación de los tubos de vuelo y antes de la pared que separa la sala de conformación del haz y la sala de experimentos.

La sala de experimentos es el espacio destinado al montaje de los equipos y sistemas auxiliares que permitirán la irradiación de muestras y la obtención de radiografías y tomografías de neutrones. Se contará con tres posiciones de irradiación estándar a 10 m, a 13 m y a 17 m respecto de la ventana del conducto de extracción. La sala de experimentos dispondrá de al menos dos tramos de tubo de vuelo que separan las posiciones de irradiación; el primero va desde el limitador del haz hasta la segunda posición de detección (13 m); y

el segundo va desde la segunda posición de detección hasta la última posición de irradiación (17 m). En las posiciones de irradiación ASTOR contará con sistemas que permitan posicionar y rotar una muestra entre 0° y 180° de manera remota para implementar el modo de tomografía.

El sistema de detección de ASTOR está compuesto por los dispositivos de obtención de imágenes y el posicionamiento del detector en el haz. Contará con cámaras tipo CCD o CMOS de tipo científico (bajo ruido intrínseco).

El *beam stop* es un componente de blindaje especial, en el cual debe ser absorbido en su totalidad el haz una vez que atravesó todo el instrumento, incluyendo neutrones y gammas. Además, debe estar diseñado de modo tal que minimice la radiación que escapa del mismo en la dirección del detector.

El búnker es el sistema que rodea a ASTOR proveyendo una barrera radiológica. Se extiende desde el blindaje biológico hasta la pared del reactor. Con este blindaje quedan delimitadas la sala de conformación del haz y la sala de experimentos, que se encuentran separadas por un blindaje con un orificio para dejar pasar el haz. [22]

2.2.1. Modos de operación y requerimientos de ASTOR

Debido a la versatilidad con la que se diseñó ASTOR, se espera que cuente con seis modos de operación:

- Imágenes de alta resolución espacial. La resolución espacial está relacionada con la colimación del haz y la calidad y características del sistema de detección. El flujo de neutrones disminuye en la medida que la colimación es mayor, lo que incrementa el tiempo necesario de exposición. En fuentes de neutrones intensas, como será el RA-10, un haz con alta colimación aún permite obtener imágenes con alta resolución espacial

en pocos segundos.

- Imágenes de alta resolución temporal. En este modo, se obtienen imágenes empleando una relación de colimación que a expensas de lograr altos flujos de neutrones tiene limitaciones en cuanto a la resolución espacial. Sin embargo al permitir tiempos de exposición de fracciones de segundo, aún con buena estadística de contaje, es posible realizar experimentos para la observación de procesos dinámicos (in-situ o in-operando).
- Tomografía. La tomografía es la técnica más demandante de tiempo y recursos computacionales. Permite realizar la reconstrucción digital tridimensional de un objeto a partir de un centenar de vistas del mismo a diferentes ángulos entre 0° y 360° . Esta técnica puede ser implementada en combinación con el uso de neutrones monocromáticos o polarizados.
- Imágenes por borde de Bragg. Por medio de esta técnica se pueden estudiar fases cristalinas, propiedades microestructurales, etc. La mejor performance en el uso de esta técnica se logra empleando haces de neutrones fríos y se irradia a la muestra utilizando un haz monocromático producido por algún método de selección de neutrones por su energía.
- Imágenes de campo oscuro (Dark Field Imaging) e interferometría de neutrones (Neutron Grating Interferometry). Estas son técnicas de imágenes con neutrones de reciente implementación y todavía en desarrollo. Se basan en observar efectos de dispersión de muy pequeño ángulo en el volumen de las muestras y permiten observar diferencias de contraste por la presencia de estructuras micrométricas e incluso resolver espacialmente dominios magnéticos. Estas técnicas requieren altos flujos

neutrónicos y la posibilidad de contar con haces monocromáticos.

- Imágenes con neutrones polarizados. Esta es la técnica estándar para el estudio de estructuras y campos magnéticos en el interior de muestras macroscópicas. Requiere de alto flujo de neutrones, monocromadores de doble cristal y dispositivos polarizadores.

Los requerimientos científicos generales descritos tienen su correlato cuantitativo referente a las características del haz de neutrones según cada modo de operación de ASTOR. Dichos requerimientos se listan en la Figura(2.12).[22]

Técnica		Flujo en la muestra (n/cm ² s)	Area iluminada (cm ²)	Longitud de onda (Å)	Resolución espacial (µm)
(i)	Imágenes de alta resolución espacial	$\geq 2 \cdot 10^6$	10x10 a 25x25	Policromático*	10 a 40
(ii)	Imágenes de alta resolución temporal	$\geq 1 \cdot 10^8$	10x10 a 20x20	Policromático*	50 a 200
(iii)	Tomografía	$\geq 1 \cdot 10^7$	10x10 a 20x20	Policromático*	10 a 200
(iv)	Imágenes por borde de Bragg	$\geq 1 \cdot 10^6$	10x10 a 20x20	1.4 Å to 8 Å (1% < $\Delta\lambda/\lambda$ < 3%) 3.0 Å $\leq \lambda \leq$ 8 Å ($\Delta\lambda/\lambda = 10\%$)	50 a 200
(v)	Imágenes de campo oscuro (DFI) e interferometría de neutrones (nGI)	$\geq 1 \cdot 10^6$	10x10 a 20x20	3.0 Å $\leq \lambda \leq$ 8 Å ($\Delta\lambda/\lambda = 10\%$)	50 a 200
(vi)	Imágenes con neutrones polarizados	$\geq 1 \cdot 10^6$	10x10 a 20x20	3.0 Å $\leq \lambda \leq$ 8 Å ($\Delta\lambda/\lambda = 10\%$)	50 a 200

Figura 2.12: Modos de operación y requerimientos de ASTOR

2.2.2. Óptica de ASTOR

Debido a su versatilidad y para cumplir con los modos de operación propuestos ASTOR contará con diferentes opciones de colimación, flujo y área de máxima iluminación. Es posible definir el valor deseado de L/D de ASTOR cambiando el tamaño de la apertura y la posición de medición. Esto se consigue mediante el uso del colimador primario dentro del blindaje biológico del reactor y seguido de una colimación fina utilizando el colimador

secundario. La colimación externa puede realizarse cambiando el colimador entre un conjunto de distintas opciones disponibles.

Los grados de colimación L/D para ASTOR están definidos en la posición de irradiación a 17 m.

El grado de colimación más bajo viene dado por el colimador primario que cuenta con una apertura circular de ~ 6 cm de diámetro y corresponde a un $L/D = 234$ en la posición de 17 m. Este grado de colimación del haz se utiliza para estudios que requieren alto flujo de neutrones. Cuando se utiliza este régimen, el colimador secundario se ubica en la apertura que continúa la forma del haz.

Los demás grados de colimación vienen dados por las aperturas del *drump* sistema de selección de colimadores secundarios, estas aperturas son más pequeñas que las del colimador primario. Ese sistema de colimación secundaria contará con seis posibles aperturas, entre ellas dos de igual forma (una con filtro de berilio incorporado), y una apertura rectangular de 0.2x2.5 cm que define el grado de colimación más alto del instrumento que corresponde a un $L/D = 500 \times 6000$ a 17 m. Este tipo de colimación se utiliza para estudios en los que se requiere una alta resolución unidimensional.

La elección de los regímenes L/D de ASTOR se realizó en base a los modos de operación y los requerimientos de uso del instrumento.

Los valores de área máxima iluminada FOV y flujo teórico para ASTOR se describen en la Figura(2.13) Estos valores se obtuvieron con las ecuaciones de la sección 2.1

D [cm]	X_{det} [cm]								
	1000			1300			1700		
	L/D	Flux [n/cm ² s]	FOV [cmxcm]	L/D	Flux [n/cm ² s]	FOV [cmxcm]	L/D	Flux [n/cm ² s]	FOV [cmxcm]
6	120	3.8E8	5x5	170	2E8	9.5x9.5	234	1E8	15.5x15.5
3	197	1.5E8	6,6x6,6	300	6,3E7	11.6x11.6	440	3E7	18.3x18.3
1.5 (x2)	370	4.2E7	9,8x9,8	560	1,8E7	15,7x15,7	820	8.4E6	23.6x23.6
0.8	690	1.2E7	11,5x11,5	1055	5E6	18x18	1540	2.4E6	26.5x26.5
0.2x2.5	2700x225	1.2E7	12,9x7,5	4115x340	5E6	19.8x12.7	6000x500	2.4E6	29x20

Figura 2.13: Valores teóricos de ASTOR

2.2.3. Requerimientos espectrales de ASTOR

ASTOR tiene el potencial de convertirse en un estado de arte de la técnica instrumento de imágenes de neutrones fríos con una corriente de neutrones comparable a los mejores instrumentos en todo el mundo. La distribución espectral predicha reportada para ASTOR se grafica en la Figura (2.14) donde se espera que la longitud de onda más probable sea en 1.3 .

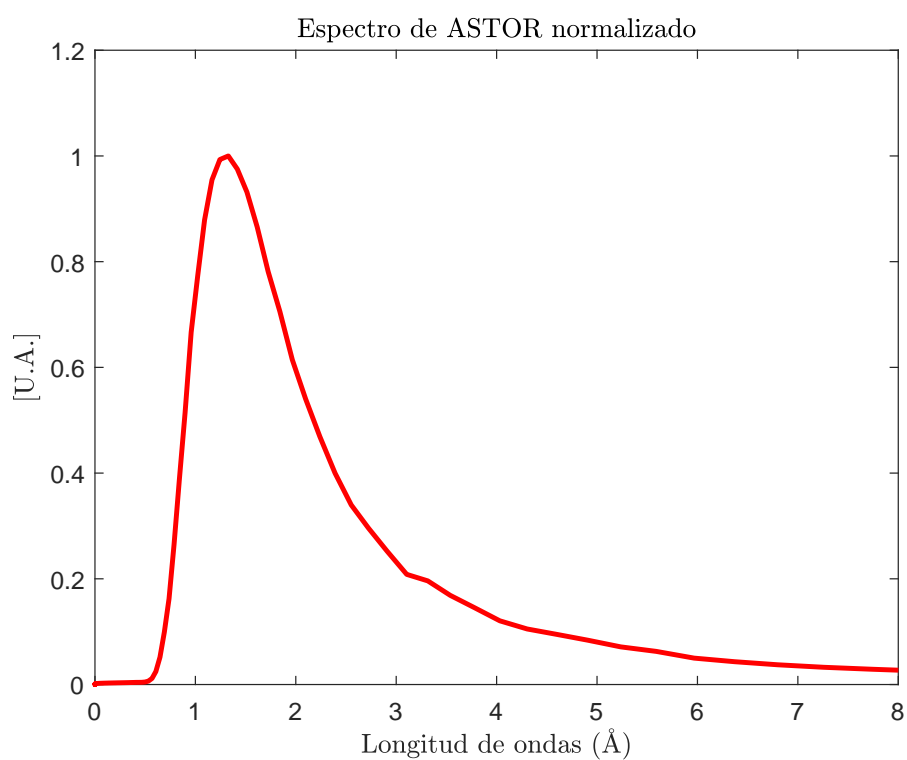


Figura 2.14: Espectro de longitud de ondas que se prevé para ASTOR

Capítulo 3

McStas

Para los estudios realizados en relación al rendimiento del diseño óptico de ASTOR, así como su comportamiento espectral al implementar un sistema de selección de energía se utilizó la herramienta de modelado y simulación McStas [29][30][31].

Este capítulo tiene como objetivo introducir a la herramienta de modelado empleada en los Capítulos 4 y 5.

El presente Capítulo se divide en tres Secciones: en primer término se realiza una breve descripción de esta herramienta. Seguidamente se describen los componentes estándar que se encuentran en la librería de McStas y que se han utilizado para modelar la geometría de ASTOR así como también los que se han desarrollado dentro del equipo de diseño de ASTOR. Por último se detalla el modelado de ASTOR con McStas.

3.1. El Programa McStas

McStas es un software de simulaciones de dispersión de neutrones para el diseño de instrumentos, optimización y experimentos virtuales. Es una he-

herramienta de código abierto, para simulación por el método de Monte Carlo. Las simulaciones sirven para determinar, entre otras cosas, aspectos del rendimiento de los instrumentos, y optimizar su uso durante etapas de diseño de nuevos instrumentos como es el caso de ASTOR.

McStas trabaja con distintos tipos de código fuente, entre ellos el archivo que describe la geometría del instrumento `-instr-` y los archivos que definen a los componentes `-comp-`. El paquete de McStas cuenta con una amplia y variada librería de componentes desarrollados para el modelado de otros instrumentos alrededor del mundo y, al ser un programa de código abierto, tiene la ventaja de que se pueden incorporar nuevos desarrollos que pueden estar o no basados en componentes existentes.

Los rayos de neutrones en McStas son paquetes que representan una gran cantidad de neutrones emitidos por la fuente. Cada paquete de neutrones contiene información de las propiedades físicas: coordenadas espaciales (x, y, z) ; componentes de velocidad (v_x, v_y, v_z) ; componentes de Spin (S_x, S_y, S_z) ; tiempo (t) y Peso estadístico (w) .

Las coordenadas de McStas están definidas con el eje Z en la dirección de desplazamiento de los neutrones, el plano perpendicular queda definido por el eje Y vertical y el eje X horizontal. Los componentes en McStas se sitúan a lo largo del eje Z y los parámetros de estos se especifican en unidades de metro y meV.

El archivo `“instr”` básico de Mcstas consiste en una fuente, un componente de óptica o conformación de haz y un detector.

En la Figura (3.1) se esquematiza el modelado de un instrumento básico.

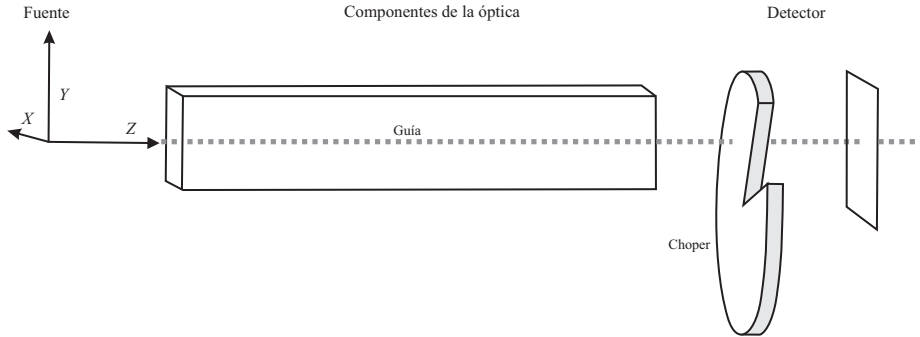


Figura 3.1: Esquema del modelado de un instrumento básico

3.2. Componentes

McStas cuenta con una variada librería de componentes estándar; a continuación se describen los componentes esenciales tanto en la definición de la geometría de ASTOR, como para los estudios realizados. Si bien la mayoría de los componentes se encuentran en la librería, algunos de ellos fueron modificados adaptándolos a las necesidades del diseño de ASTOR.

3.2.1. Fuentes

La función principal de una fuente es determinar los parámetros iniciales $(r; v; t)$ -Coordenadas espaciales, componentes de velocidad, tiempo- para cada rayo de neutrón, esto se sortea por Monte Carlo con una distribución adecuada. McStas cuenta con diferentes componentes de fuente circulares y rectangulares. Para ASTOR se utilizaron:

- **Source_simple:** Fuente con una distribución de energía uniforme en el rango $E_0 \pm dE$ o $\lambda_0 \pm d\lambda$. La posición inicial de los rayos de neutrones se elige aleatoriamente dentro de un círculo de radio r .

Para el modelado de la óptica de ASTOR se utilizó este tipo de fuente con algunas modificaciones: *Source_RA10_simple*.

También se utiliza este tipo de fuente sin modificaciones para realizar la caracterización del selector de velocidad. En un rango de longitudes de onda de $0,5 - 4,5\text{\AA}$.

- **Source_iso:** Este tipo de fuente de neutrones es isotrópica con un espectro de energía definido por un archivo. Este tipo de fuente se utilizó para estudiar el rendimiento espectral de ASTOR. En el Capítulo 5 se detalla la obtención del archivo que define el espectro de energía, así como la fuente utilizada "*Source_RA10_iso*".
- **PTRC_Source_Difra:** Este componente genera eventos de neutrones a partir de un archivo creado utilizando Código MCNP [32]. El componente lee el formato "Ptrac" e introduce los neutrones de este archivo como fuente en el instrumento.

El formato "Ptrac" es una posible salida de MCNP, en la cual se graba la información física de todas las partículas que pasan por una superficie determinada, de modo que luego esa información, almacenada en un archivo binario, sirve como fuente de un nuevo cálculo.

Este componente se utilizó para validar el espectro de energía de la fuente "*Source_RA10_iso*". Esto se detalla en el Capítulo 5.

3.2.2. Componentes ópticos

Dentro de los componentes ópticos de ASTOR se encuentran los *slit*, el chaffan y el selector de velocidad; cabe recordar que ASTOR es un instrumento que no contiene guías de neutrones.

- **Slit:** El componente *Slit* (en inglés *rendija*) establece una apertura en el plano xy dejando propagar los neutrones que pasen por dentro de la rendija y descartando los demás neutrones. En McStas un *slit* puede ser únicamente circular o rectangular.
- **Chafan:** El componente chafan es una variante del *Slit* desarrollada por el equipo de diseño de ASTOR, y consiste en una hendidura de forma rectangular cuyas esquinas pueden tener un radio de curvatura especificado por el usuario, donde no se permite la transmisión por fuera de la ranura. Este componente permite describir con mayor fidelidad la geometría que tiene el colimador de ASTOR.
- **V_Selector:** Este componente modela un selector de velocidad tipo turbina con N álabes dispuestas radialmente en un eje. Los álabes tienen un ángulo de torsión y giran a una velocidad de rotación que depende de la energía del neutrón que se esté seleccionando. Al girar el selector, permite la transmisión de rayos de neutrones con velocidades alrededor de la seleccionada.

3.2.3. Detectores o monitores:

En simulaciones es posible detectar cada neutrón sin absorberlo ni alterar ninguno de sus parámetros. Los detectores o monitores pueden ser sensibles a cualquier propiedad de los neutrones, como la dirección, la energía (o longitud de onda) y la divergencia. Se han desarrollado muchos componentes de detectores diferentes para las librerías de McStas. Los detectores que se utilizaron para los estudios de ASTOR fueron:

- **PSD_Monitor:** Este componente es sensible a la posición de llegada del rayo neutrónico y registra los rayos de neutrones que atraviesan

la superficie del detector en el plano xy . La ventana rectangular del monitor se divide en píxeles que cuentan cada registro. El monitor PSD genera como salida tres matrices bidimensionales de recuentos. La matriz utilizada para los estudios de ASTOR fue la matriz Intensidad de McStas que representa la cantidad de historias detectadas por pixel, debido a que cada historia representa una gran cantidad de neutrones emitidos por la fuente, no es directamente comparable con la intensidad del flujo de neutrones de la fuente.

En todos los estudios realizados se trabajó con la intensidad de McStas que, si bien no es la intensidad del flujo de la fuente de neutrones, da como resultado valores relativos que sirven con el fin de hacer comparaciones entre configuraciones. A modo de ejemplo se ilustra en la Figura (3.2) las gráficas obtenidas mediante un detector tipo *PSD_monitor*.

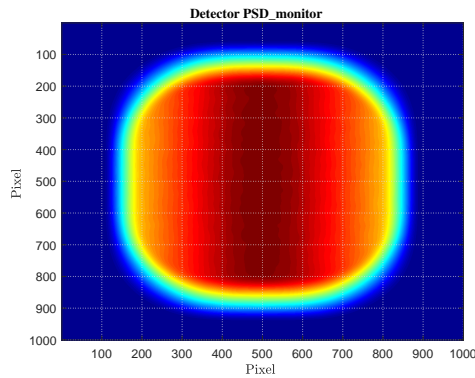


Figura 3.2: Ejemplo de registro del detector *PSD_monitor*

Se puede observar un haz circular con intensidad mayor en la parte central del mismo y que se va atenuando radialmente. Los círculos concéntricos muestran intensidades decrecientes.

Monitor_L: El componente monitor unidimensional L es un detector sólo sensible a la longitud de onda del neutrón. Genera como salida

un histograma unidimensional del espectro en longitud de onda entre valores mínimo y máximo establecidos por el usuario.

Un ejemplo de la salida obtenida mediante este tipo de detectores se ilustra en la Figura (3.3) las salidas también son analizadas mediante el programa Matlab.

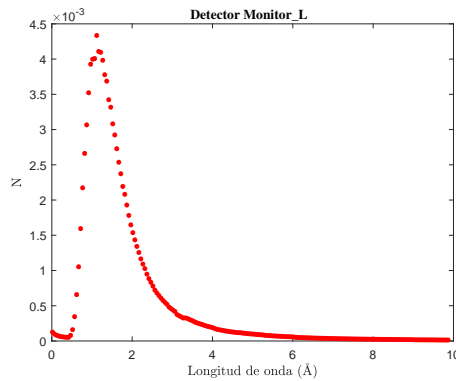


Figura 3.3: Ejemplo de registro del detector Monitor_L

3.3. ASTOR en McStas

Para el modelado de la geometría de ASTOR se utilizaron rendijas cuadradas *slit* o *chaflan* en los lugares correspondientes a ventanas o extremos de las piezas, y rendijas circulares para la simulación de las aperturas o *pinhole*. Como se mencionó anteriormente, se utilizaron fuentes tipo "*Source_simple*" para el estudio de la óptica de ASTOR y fuente tipo "*Source_iso*" para el estudio del rendimiento espectral de ASTOR.

Un esquema de la geometría de ASTOR se ilustra en la Figura (3.4), donde se observa la fuente en el inicio del instrumento en la ventana del conducto de extracción, el colimador primario, el colimador secundario y las posiciones de irradiación con sus respectivos detectores y finalizando el instrumento el *beam stop*.

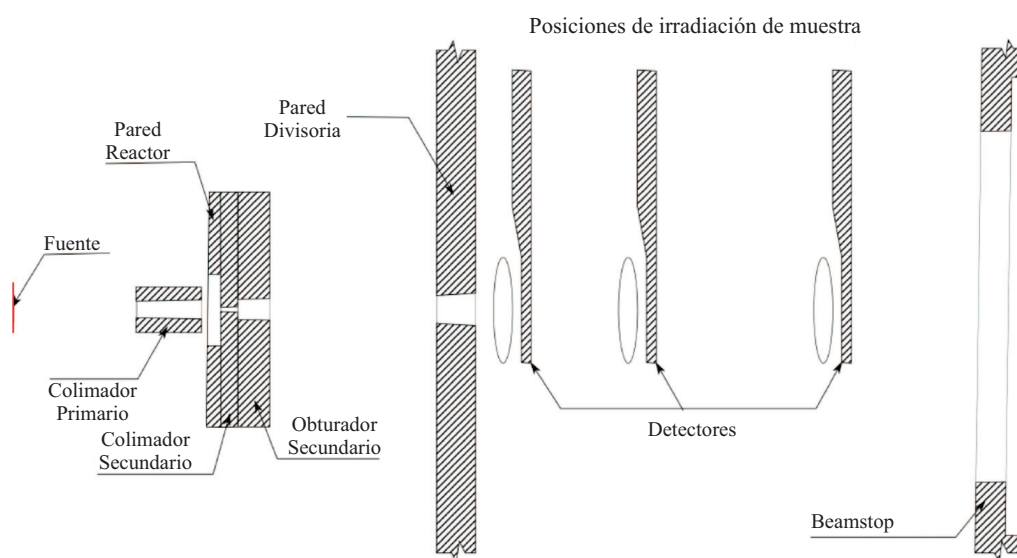


Figura 3.4: Esquema de la geometría de ASTOR

Capítulo 4

Estudio del diseño de la óptica de ASTOR

En este capítulo se describen los estudios realizados en relación con el diseño de la óptica de ASTOR con la finalidad de evaluar parte de su performance.

Los objetivos del estudio fueron:

Realizar un análisis de la óptica de ASTOR estudiando el comportamiento del haz a lo largo del instrumento haciendo hincapié en las variaciones de la forma de la proyección del haz.

El segundo objetivo fue determinar el tamaño efectivo de la fuente de neutrones para ASTOR: En los estudios que se vienen realizando con el instrumento se consideró el tamaño de la fuente de neutrones similar a las dimensiones del área de la ventana del conducto de extracción del haz. Si bien esta primera aproximación es correcta, es necesario para los estudios correspondientes a las siguientes etapas de diseño definir el tamaño efectivo de la fuente, es decir la fuente efectiva que ve un detector a lo largo del haz.

Como tercer objetivo, y tal vez uno de los más importantes, se intentó

verificar si con el diseño de la óptica de ASTOR actual, cumple con los requerimientos de performance decididos para el instrumento.

El presente capítulo se dividió en tres secciones: en la primera de ellas se desarrolla el estudio realizado sobre el comportamiento del haz a lo largo del instrumento. En la segunda se describe el estudio del tamaño efectivo de la fuente de neutrones. En la tercera sección se detalla el estudio de la verificación del cumplimiento de los requerimientos de ASTOR.

4.1. Comportamiento del haz a lo largo del instrumento

Uno de los primeros estudios que se realizaron con respecto al diseño de la óptica de ASTOR fue la evaluación del comportamiento del haz en distintas posiciones de interés del instrumento.

Se consideraron como posiciones relevantes o de interés de ASTOR, aquellas en las que se ubicarán las muestras a irradiar (posiciones de irradiación) o bien en donde se prevé colocar algún componente relevante de la óptica o la conformación del haz del instrumento.

Para las posiciones en las cuales se colocarán las muestras a irradiar en ASTOR, además de conocer el comportamiento del haz, se debe asegurar la homogeneidad y simetría en el área de máxima iluminación, a fin de que durante la irradiación se obtenga similar iluminación de neutrones en todos los puntos donde se formará la imagen.

Para las posiciones donde se prevé colocar algún componente, también es imprescindible conocer el comportamiento del haz en esa posición, ya que determinará la elección de las características geométricas de dichos componentes.

Para el estudio del comportamiento del haz a lo largo del instrumento, primero se seleccionaron las posiciones de interés de ASTOR. Luego se modeló el instrumento con la herramienta McStas y se realizaron simulaciones para distintos regímenes de colimación de ASTOR. Y finalmente se analizaron los resultados de las simulaciones.

Se seleccionaron las tres posiciones de irradiación de ASTOR -ubicadas a 10 m, 13m y 17m de la ventana del conducto de extracción- y la posición donde se prevé colocar un selector de velocidad, ubicada a 5,27 m de la mencionada ventana. Para éste estudio, también se consideraron posiciones de interés a las ubicadas al inicio y al final del colimador secundario. El colimador secundario se ubicará contiguo al blindaje biológico del reactor, por lo tanto, una evaluación en el inicio del colimador secundario implica evaluar el haz de neutrones tal como sale del reactor. La posición al final del colimador secundario resulta de interés en el caso de las configuraciones con las aperturas del colimador secundario.

Se realizó un modelado del instrumento con el programa de simulaciones McStas se estableció una fuente de neutrones isotrópica y homogénea tipo "*Source_Simple*" de 10 cm de ancho y 30 cm de altura, de acuerdo con las dimensiones de la ventana del conducto de extracción. Teniendo en cuenta que el estudio se realiza sobre la óptica de ASTOR y no se evalúa la parte espectral, y para simplicidad de los cálculos, se eligió una fuente monocromática.

Con el objeto de registrar las simulaciones, se colocaron seis detectores bidimensionales tipo "*PSD_monitor*" en las posiciones seleccionadas para la evaluación de la distribución espacial del haz.

Las posiciones seleccionadas y las distancias a la fuente fría se describen en la Tabla(4.1)

Posición	Distancia	Referencia
L1	4.27 m	Inicio colimador secundario
L2	5.27 m	Fin colimador secundario
L3	5.67 m	Selector de velocidad
L4	10 m	Primera posición de irradiación
L5	13 m	Segunda posición de irradiación
L6	17 m	Tercera posición de irradiación

Tabla 4.1: Posiciones y distancias seleccionadas para la evaluación.

Las posiciones L1 y L2 se corresponden con el inicio y el final del colimador secundario, ubicado a continuación del blindaje biológico del reactor, en la posición L2 se prevé colocar el primer componente del instrumento: un intercambiador de filtros. La posición L3 corresponde a la ubicación donde se prevé colocar un selector de velocidad de tipo turbina, y las posiciones L4, L5 y L6 corresponden a las tres posiciones estándar de irradiación.

Las disposiciones a lo largo del instrumento de los detectores bidimensionales quedan esquematizadas en la Figura (4.1).

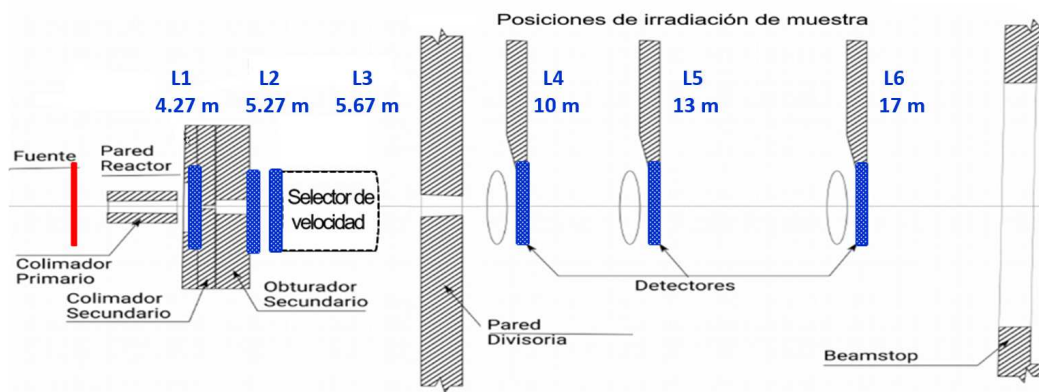


Figura 4.1: Esquema de las disposiciones de los detectores bidimensionales en el modelado del instrumento ASTOR.

La Figura (4.1) esquematiza de modo simplificado el modelo McStas del

instrumento ASTOR, donde se representa a la fuente de neutrones en rojo que se encuentra en el origen del instrumento y en azul las ubicaciones de los detectores bidimensionales utilizados en las simulaciones con McStas.

Los estudios se realizaron para los regímenes de colimación del instrumento de menor y mayor L/D , éstos se eligieron por ser las dos configuraciones extremas con las que contará el instrumento.

El régimen de menor colimación corresponde a un $L/D = 234$ en la posición de 17m, viene determinado por el colimador primario ubicado en el blindaje biológico del reactor y cuenta con una apertura circular de 6 cm de diámetro. En este régimen, el colimador secundario no interfiere en la conformación del haz. Esto queda esquematizado en la Figura (4.2).

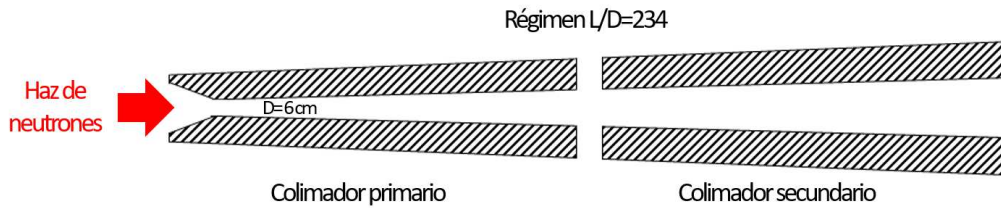


Figura 4.2: Esquema del régimen de colimación $L/D=234$ del instrumento ASTOR.

El régimen de mayor colimación corresponde a un $L/D = 6000 \times 500$ a 17m y tiene una apertura rectangular de 0.2 cm x 2.5 cm. Esta configuración viene determinada por una de las aperturas en el tambor del colimador secundario, y es menor que la del colimador primario, provocando así que la colimación del haz venga determinada solamente por el colimador secundario. En la Figura (4.3) se presenta un esquema.

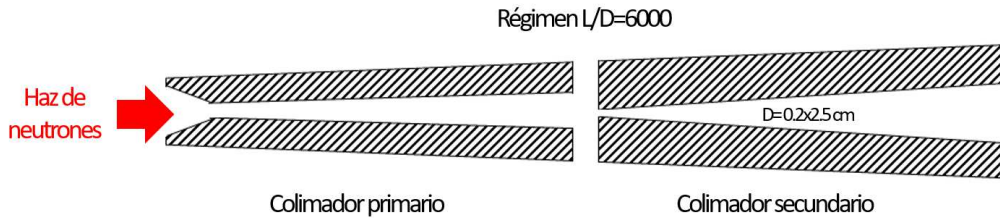


Figura 4.3: Esquema del régimen de colimación $L/D=6000 \times 500$ del instrumento ASTOR.

Los resultados de las simulaciones se obtuvieron de los análisis de los registros de los detectores "*PSD_monitor*". Los registros obtenidos por los detectores fueron leídos y procesando en Matlab.

Es necesario aclarar que, la intensidad que registran los detectores "*PSD_monitor*" no representa el flujo de neutrones. Para poder describir en función de la intensidad del flujo de neutrones de la fuente, habría que realizar una correspondencia en cada plano de detección con la intensidad obtenida de una simulación mediante MCNP para sacar una constante de correlación, donde el factor de normalización viene dado por la Ecuación (4.1).

$$K = \frac{I_{MCNP}}{I_{McStas}} \quad (4.1)$$

El factor de normalización para obtener el flujo de intensidad de la fuente no se encuentra dentro del alcance de este trabajo.

Sin embargo es posible obtener resultados relativos válidos entre las configuraciones y cambios en la geometría, de acuerdo con los objetivos del trabajo de validar la geometría, verificar las previsiones teóricas y estudiar preliminarmente el rendimiento espectral de ASTOR.

Para el análisis del comportamiento del haz a lo largo del instrumento primero se representaron las proyecciones del haz en tres dimensiones para

un análisis gráfico.

Seguidamente se representaron las proyecciones del haz en dos dimensiones y se obtuvieron los perfiles de intensidad para un análisis más exhaustivo.

Se compararon tanto las proyecciones del haz como los perfiles en las distintas posiciones a lo largo del instrumento y se analizaron las variaciones en la forma y la intensidad relativa. En el Apéndice A se presentan los resultados completos para cada simulación.

A continuación, se desarrollan los resultados más relevantes. Se comienza con el registro de las proyecciones del haz a lo largo del instrumento para el régimen de colimación de $L/D=234$; esto se representa en la Figura (4.4) y (4.5). Las proyecciones del haz se grafican en tres dimensiones para un análisis gráfico.

En las figuras se observa la variación tanto en la intensidad relativa como en la forma del haz para las posiciones de interés seleccionadas. Vale aclarar que entre la Figura (4.4) y la la Figura (4.5) existe un cambio de escala.

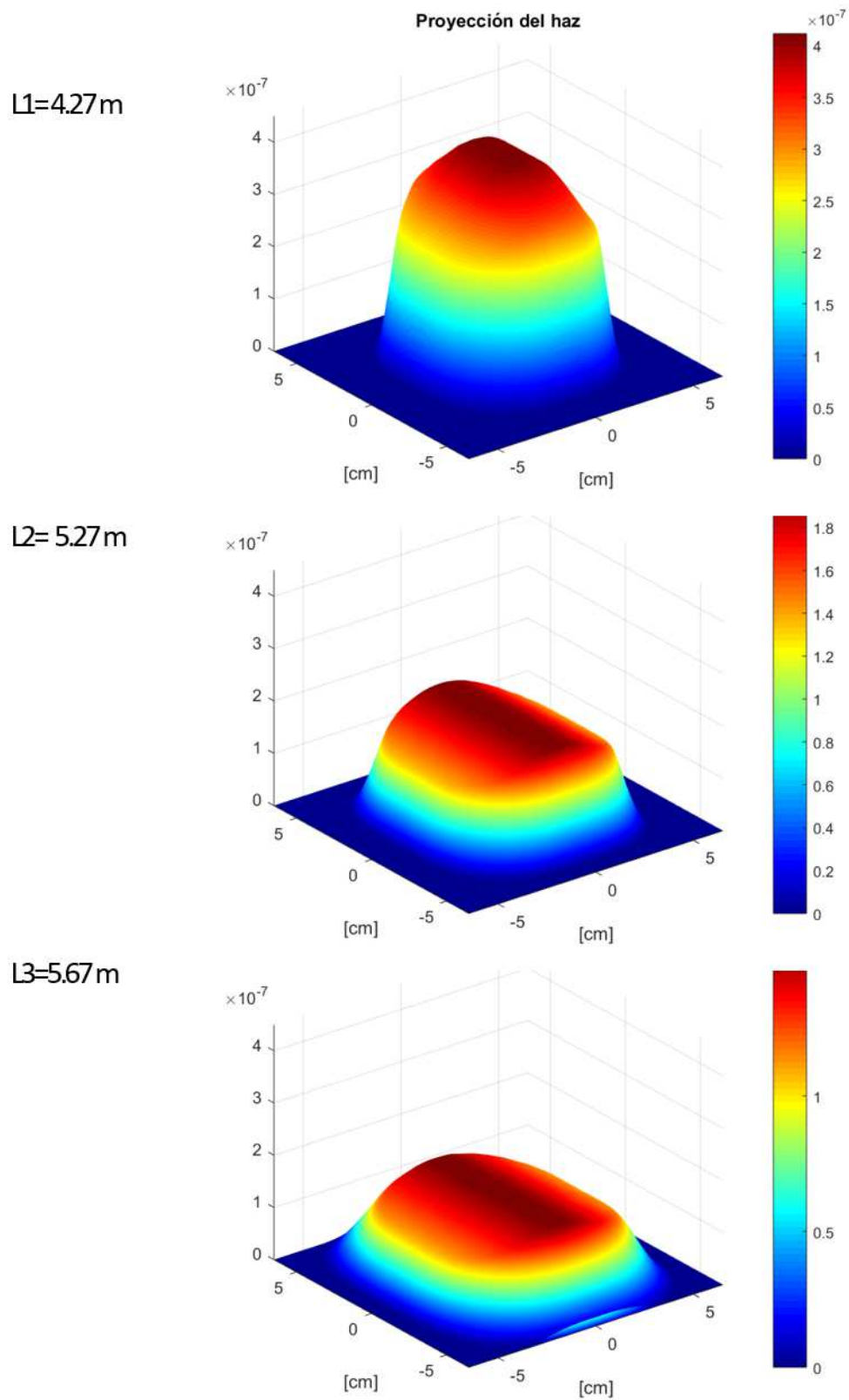


Figura 4.4: Proyección del haz en tres dimensiones para las posiciones L1=4.27 m, L2= 5.27 m y L3=5.67 m.

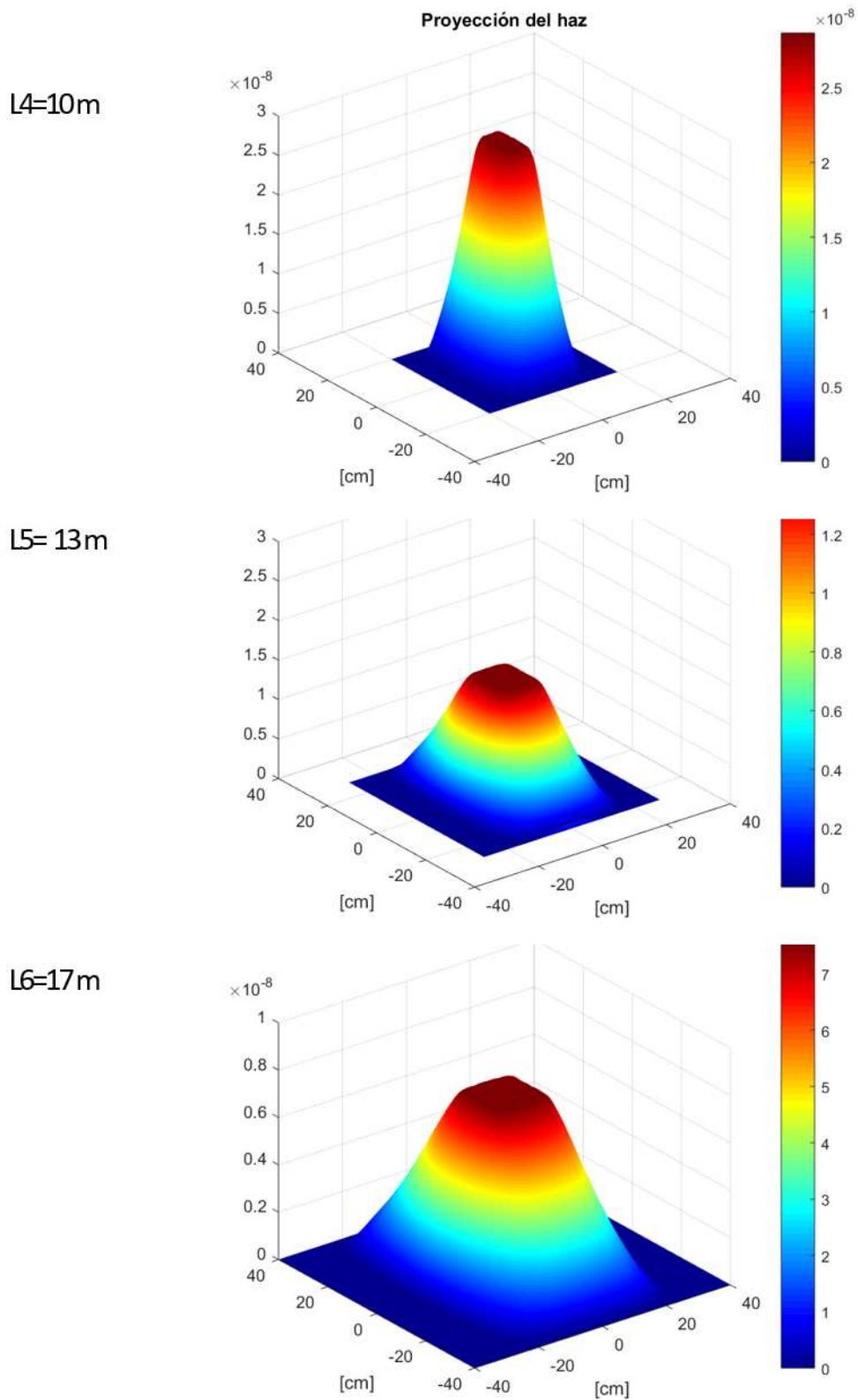


Figura 4.5: Proyección del haz en tres dimensiones para las posiciones L4=10 m, L2= 13 m y L3=17 m.

Con el fin de evaluar los cambios en la forma de la proyección del haz a lo largo del instrumento se compararon las proyecciones en la posición L1 y L4, correspondientes a la salida del blindaje biológico del reactor y a la primera posición de irradiación respectivamente. Esto se ilustra en la Figura (4.6).

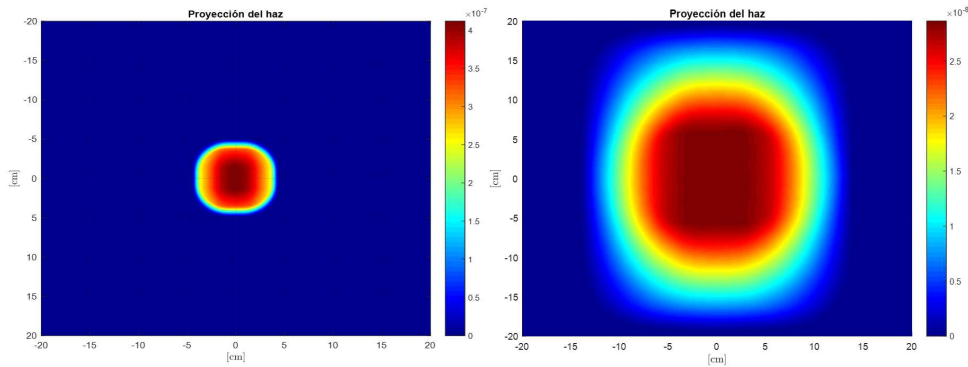


Figura 4.6: Proyección del haz para las posiciones L1=4.27 m y L4=10 m en el régimen L/D=234.

De la Figura (4.6) queda en evidencia que a medida que se aleja de la fuente, el haz pasa de una proyección aproximadamente circular a una proyección cuadrada.

En el colimador primario el haz atraviesa una apertura circular de 6 cm de diámetro y sale del blindaje del reactor con una proyección aproximadamente circular esto se observa en el registro del detector L1. A medida que va atravesando el instrumento el haz se va conformando hasta proyectarse en forma cuadrada en las posiciones de irradiación, esto se debe a que el haz se adapta al diseño de los colimadores que son cónico-piramidales, esto se observa en el registro del detector L4. Dado que los sensores que se usan en neutrografía son cuadrados, este tipo de proyección del haz aprovecha al máximo el área activa del detector.

Para el caso de la configuración de colimación de L/D=6000 x 500 resultó

interesante evaluar la proyección del haz antes y después del colimador secundario. Para este régimen la apertura se encuentra en el colimador secundario y tiene forma rectangular de 0.2 cm x 2.5 cm.

En la Figura 4.7 se comparó las proyecciones del haz en la posición L1 y L2.

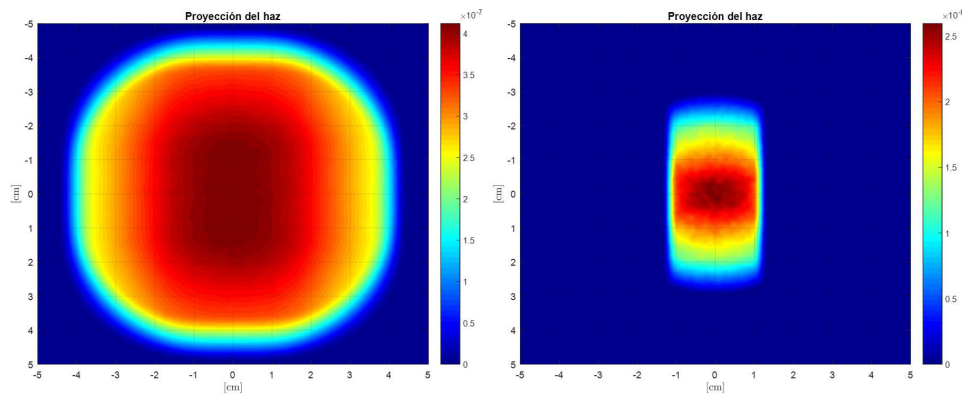


Figura 4.7: Proyección del haz para las posiciones L1=4.27 m y L2=5.27 m en el régimen $L/D=6000$.

Se puede observar que existe un cambio de forma abrupto de una posición a la siguiente, esto se debe al paso del haz por la apertura de forma rectangular del colimador secundario.

Seguidamente se obtuvieron los perfiles de intensidad de las proyecciones. El perfil de una proyección del haz en una determinada posición es la representación unidimensional de intensidad del haz.

Los perfiles horizontales y verticales de una proyección de haz se esquematizan en la Figura 4.8. Con líneas negras se representan los perfiles horizontal y vertical en la proyección del haz, y en azul se representan los perfiles de intensidad horizontal y vertical.

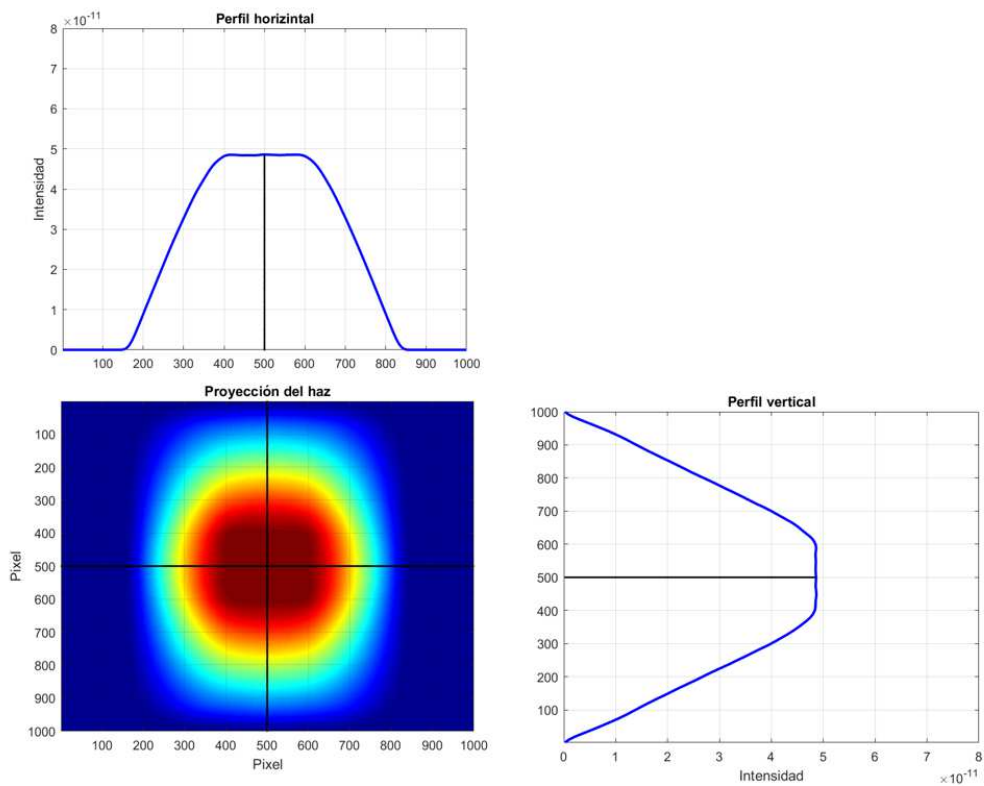


Figura 4.8: Esquematización del perfil horizontal y vertical de una proyección del haz.

Se realizó una comparación de los perfiles horizontales del haz a lo largo del instrumento para el régimen de $L/D=234$. Se compararon por un lado las posiciones de irradiación en la Figura (4.9) y por el otro las posiciones de interés del instrumento en la Figura (4.10).

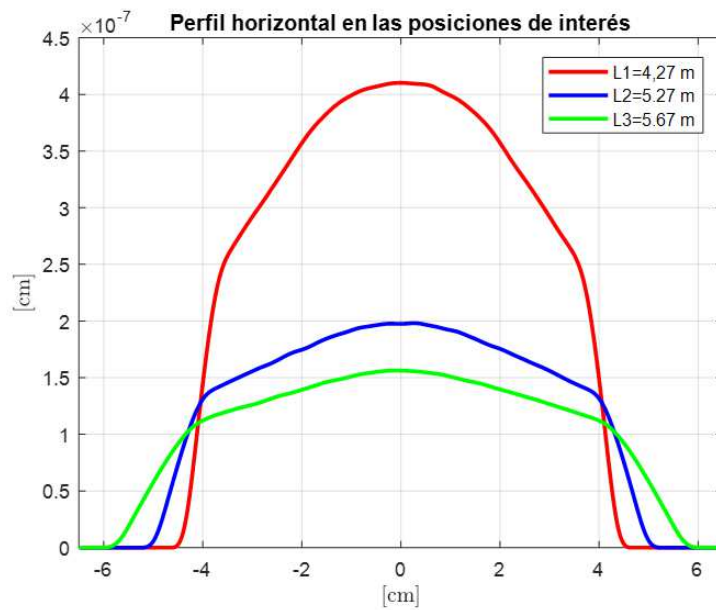


Figura 4.9: Perfiles horizontales en las posiciones L1=4.27 m, L2=5.27 m y L3=5.67 m.

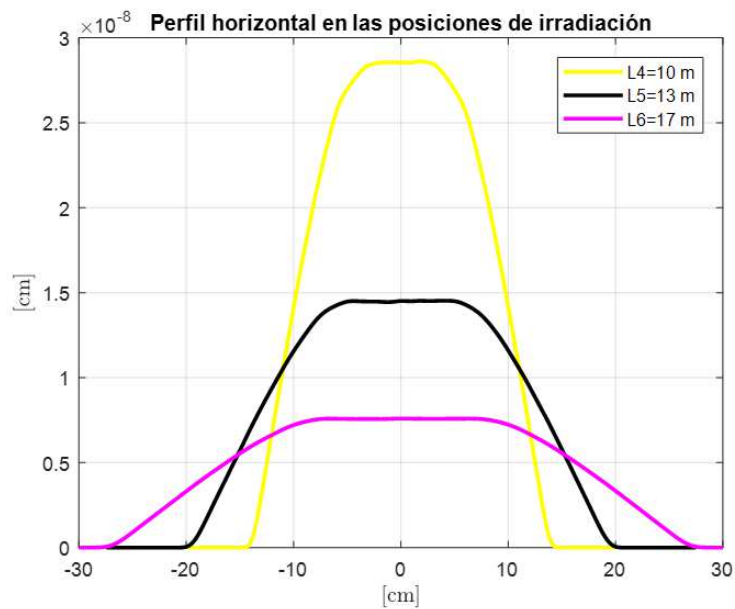


Figura 4.10: Perfiles horizontales en las posiciones de irradiación L4=10 m, L5=13 m y L6=17 m.

Con respecto a la forma se observa que el perfil del haz inicialmente presenta una forma de punta, y a medida que se aleja de la fuente, por la propia divergencia del haz, el perfil se va ensanchando, aplanándose en la zona central.

A su vez de los perfiles correspondientes a las posiciones de irradiación, se observa una zona donde el haz es homogéneo y simétrico, esto es deseable a fin de que durante la irradiación se obtenga similar iluminación de neutrones en todos los puntos donde se formará la imagen.

Finalmente se realizó una comparación de los perfiles horizontales del haz para las posiciones de irradiación L3 en los regímenes de colimación de $L/D=234$ y $L/D=6000$. Esto se representa en la Figura 11, con el fin de tener una mejor comparación se graficó en escala logarítmica. También y a modo de grafico se representó la proyección en tres dimensiones del haz para ambas configuraciones en la Figura (4.11).

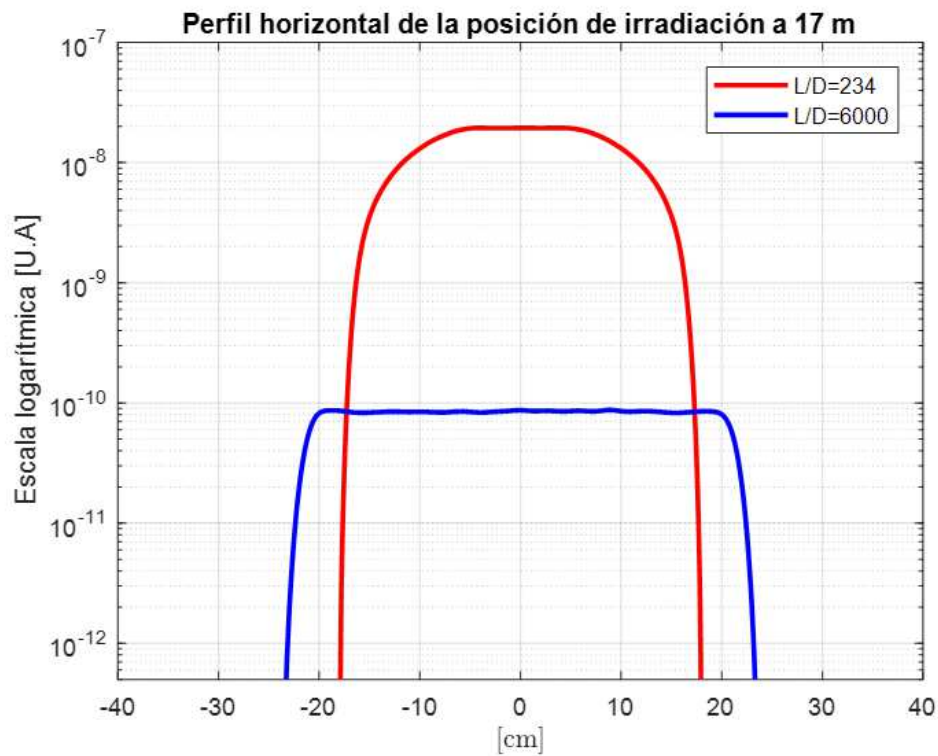


Figura 4.11: Comparación de los perfiles horizontales en las posiciones de irradiación $L_6=17$ m para los regímenes de colimación $L/D=234$ y $L/D=6000$.

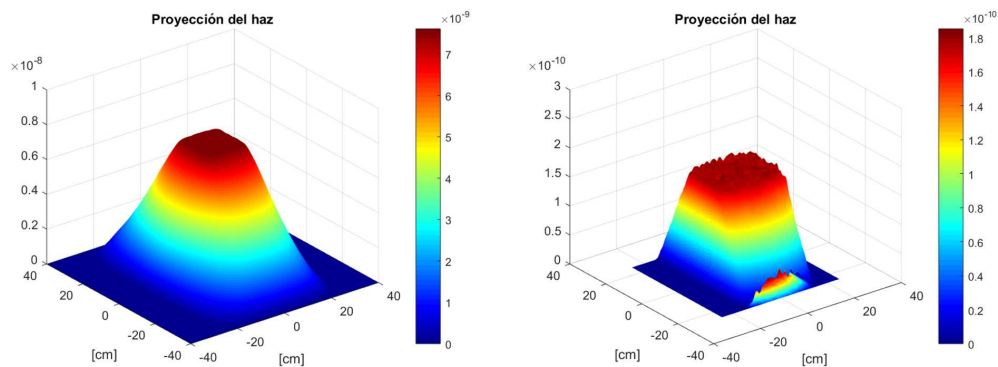


Figura 4.12: Comparación de las proyecciones en las posiciones de irradiación $L_6=17$ m para los regímenes de colimación $L/D=234$ y $L/D=6000$.

Como se puede observar en la Figura 11 la configuración con $L/D=6000$ tiene menor intensidad, esto concuerda con la relación de compromiso que

existe entre el flujo de neutrones y el L/D . También se puede observar que, debido a parámetros puramente geométricos, el perfil del haz de neutrones tiene cada vez mayor área de máxima iluminación (uniforme) en las proyecciones del haz a medida que aumenta L/D .

Como se expuso en el Capítulo 2 la configuración de mayor L/D determina la resolución espacial intrínseca más exigente y tanto la resolución espacial, como el tamaño del área de máxima iluminación están definidas por la ubicación de la apertura el tamaño y la forma.

4.2. Estudio del ancho efectivo de la fuente de neutrones para el instrumento ASTOR

Debido a la óptica, no todos los componentes ubicados a lo largo del instrumento perciben una fuente de igual dimensión. Los componentes ubicados en posiciones más cercanas a la fuente percibirán una mayor área que los componentes que están más alejados.

Se realizó un estudio del ancho efectivo de la fuente de neutrones, para establecer la dimensión máxima de fuente que se percibe en las posiciones más relevantes del instrumento. Se busca con este estudio verificar el área efectiva de la fuente de neutrones para ASTOR.

El ancho efectivo de la fuente de neutrones es el ancho máximo de la fuente que la óptica del instrumento permite percibir en la posición relevante más cercana a la fuente.

Este estudio resulta necesario para asegurar que los neutrones que llegan a las posiciones relevantes, y con los que va a ser irradiada la muestra, provienen solamente de lo que se considera la fuente del instrumento, que ha sido definida como la ventana del conducto de extracción.

Para el estudio del ancho efectivo de la fuente de neutrones, primero se seleccionaron las posiciones de interés de ASTOR; luego se modeló el instrumento con la herramienta McStas y se realizaron simulaciones para distintas configuraciones de ASTOR variando en el modelo numérico el ancho de la fuente de neutrones. Finalmente se analizaron los resultados de las simulaciones.

La metodología adoptada para encontrar el tamaño efectivo de la fuente fue aumentar en el modelo numérico el tamaño de la fuente y estudiar cómo se modifican los registros de los detectores en un punto.

Se consideran posiciones de interés, a la posición correspondiente a la salida del colimador secundario L2, y a las tres posiciones de irradiación de muestra L4, L5 y L6.

Se realizaron simulaciones con el modelado del instrumento utilizado anteriormente y en cada simulación se fue variando la dimensión de la fuente; se mantuvo fija la altura en 30 cm y se varió el ancho desde 10 cm hasta 30 cm. Los parámetros evaluados fueron: para los detectores ubicados en las posiciones de irradiación -L4, L5 y L6- la medición del ancho y del alto de la zona de máxima iluminación y para el detector ubicado en la posición L2 el número total de neutrones registrados por el detector.

El área de máxima iluminación del haz es el tamaño del área donde la intensidad es uniforme. Existen diversos criterios para definir esta área. El criterio utilizado en este trabajo para la definición del área de máxima iluminación fue considerar la zona donde la intensidad es mayor al 90 % del máximo de intensidad registrado.

Para la determinación del ancho y el alto de la zona de máxima iluminación, primero se encontró en el área total de la proyección del haz, la zona donde la intensidad es mayor al 90 % del máximo.

Luego de ello se encontraron los límites superiores e inferiores en ambos ejes del detector (alto y ancho).

Por último, con las dimensiones elegidas para los detectores en la simulación y los valores de los límites superior e inferior del área de máxima iluminación -en pixeles-, se calcularon las dimensiones del ancho y el alto de la zona de máxima iluminación. En la Figura 4.13 se muestra una ilustración de la zona de máxima iluminación de una proyección del haz, donde se indican con líneas rojas los límites horizontales y verticales de la zona de máxima iluminación, también se ilustran estos límites junto con los perfiles de intensidad.

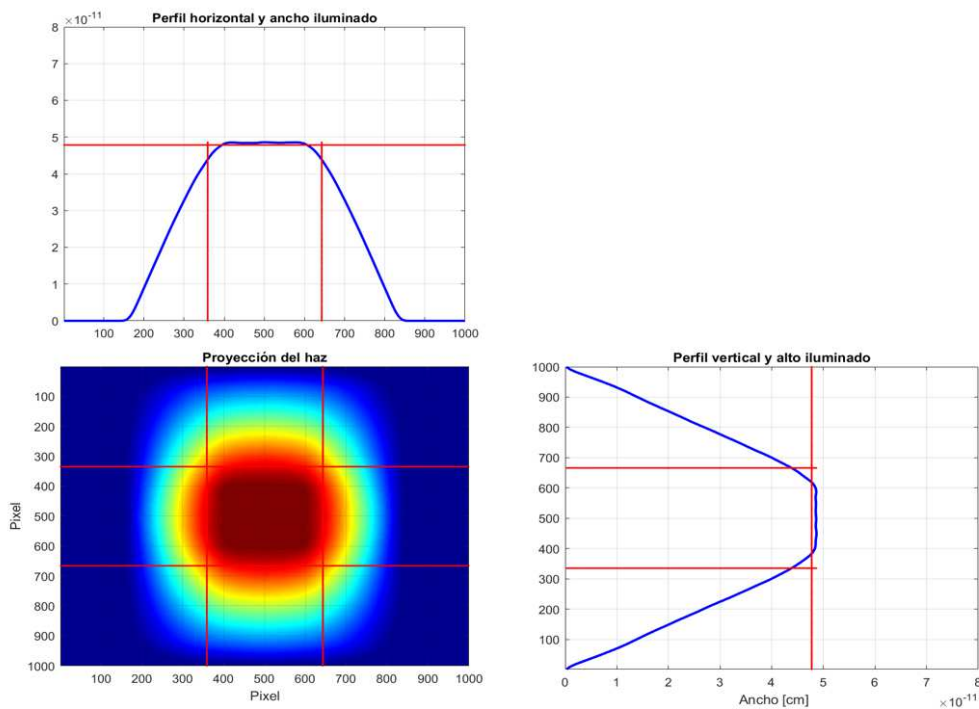


Figura 4.13: Esquema del área de máxima iluminación en pixeles.

Para el caso del detector en la posición L2, como ya se mencionó, no se evaluó la zona de máxima iluminación debido a que los perfiles obtenidos contaban con dos quiebres, a diferencia de los mostrados en la Figura (4.13).

Por lo tanto, no se pudo a *priori* distinguir los límites de la zona de máxima iluminación, además ésta sólo es relevante en las posiciones de irradiación. Un perfil de intensidad para esta posición se ilustra en la Figura (4.14).

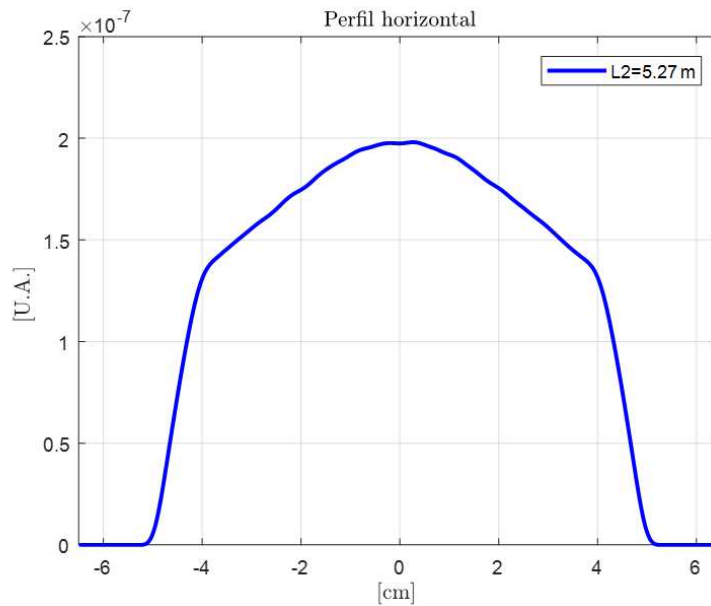


Figura 4.14: Perfil horizontal en las posiciones L2=5.27m.

El parámetro que se evaluó para los detectores ubicados en la posición L2 fue el número total de neutrones registrados por el detector.

Para todos los detectores, se analizaron las variaciones de los parámetros mencionados con la variación del tamaño del ancho de la fuente de neutrones y se encontró la medida del ancho a partir de la cual los parámetros evaluados se mantenían constantes.

Los resultados con detalles se encuentran en el Apéndice B.

A continuación, y a modo de ejemplo, se representan los resultados más relevantes.

Uno de los resultados más llamativos que se encontró fue en la posición L2, donde se prevé colocar el primer componente de ASTOR, esto se ilustra en

la Figura (4.15)

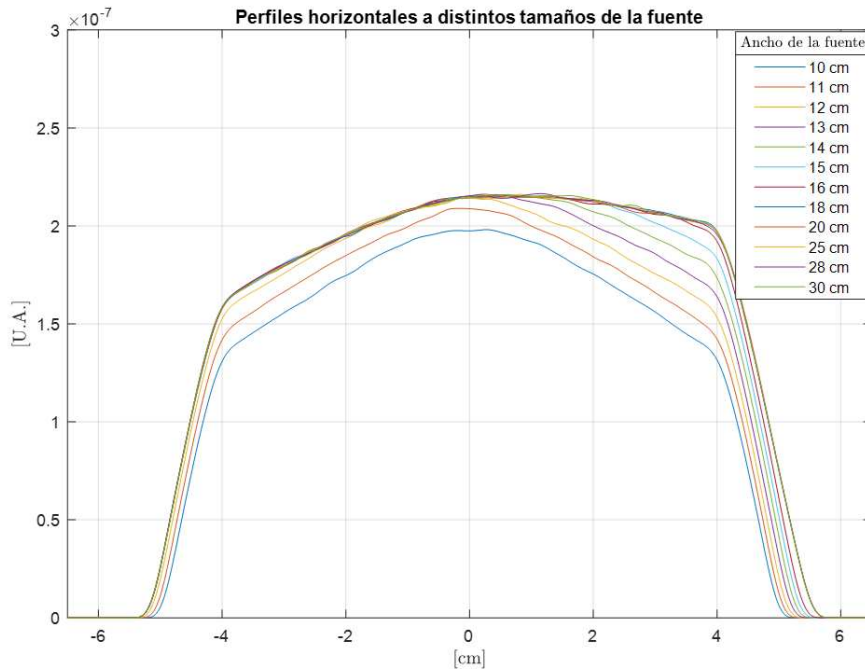


Figura 4.15: Perfiles horizontales en las posiciones $L2=5.27$ m, para distintos anchos de fuente.

Se observa un cambio notable en la forma del perfil horizontal del haz a medida que aumenta el tamaño de la fuente; donde, para anchos de fuente mayores a 14 cm el perfil deja de ser simétrico, esto se le puede atribuir a la asimetría que presenta el eje de ASTOR con respecto la salida del tanque del reactor.

Esta asimetría sólo se encontró para las posiciones L2 a la salida del colimador secundario. Como ya se especificó, en esta posición no se utilizó como parámetro el área de máxima iluminación, sino que se midió la cantidad de neutrones detectados.

La Figura 4.16 muestra, para el detector en la posición L2, cómo a medida que se incrementa el ancho de la fuente, aumenta la cantidad de neutrones

registrados por el detector.

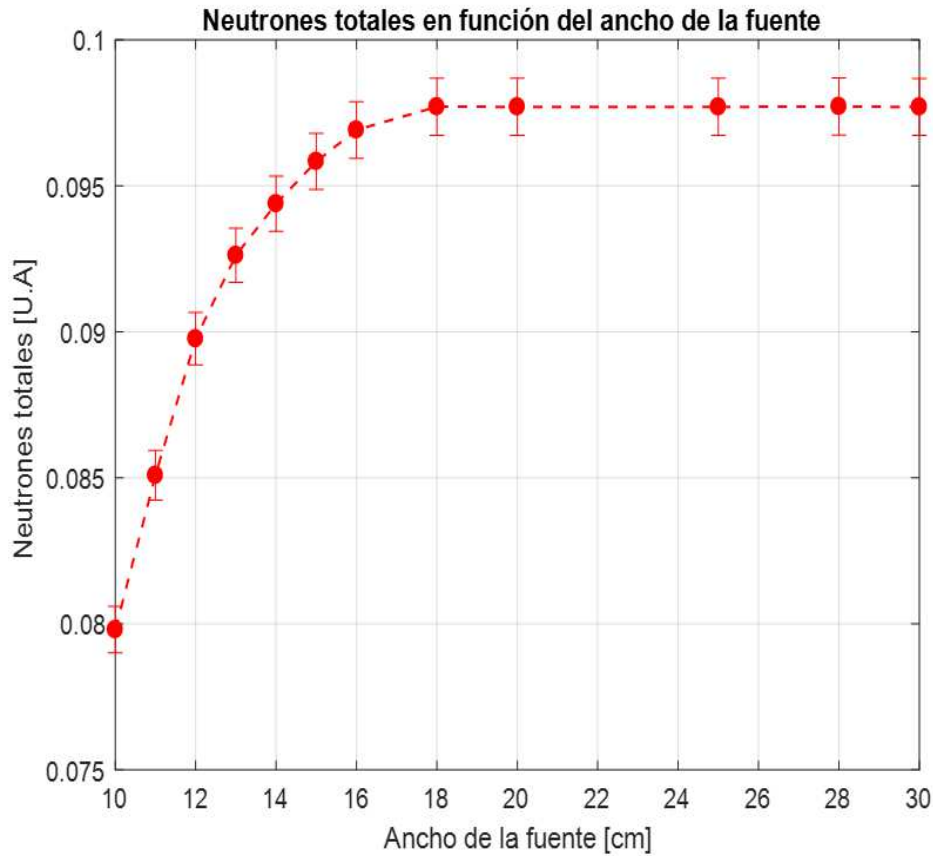


Figura 4.16: Neutrones totales registrados en función del ancho de la fuente para la posición L2=5.27 m.

En la Figura 4.16 se observa que para un tamaño de aproximadamente 17 cm los detectores comienzan a registrar la misma cantidad de neutrones, esto significa que, aunque se siga aumentando el tamaño del ancho de fuente, en esa posición solo se percibe un ancho de 17 cm como máximo. Es decir que la óptica recorta efectivamente el haz de modo que en esa posición no llegan neutrones generados por fuera del ancho máximo de 17 cm.

En las posiciones de irradiación, no se observaron asimetrías tan marcadas como el caso anterior. A modo de ejemplo se grafican en la Figura (4.17) los

perfiles horizontales para los distintos tamaños de ancho de fuente en la posición de irradiación a 17 m.

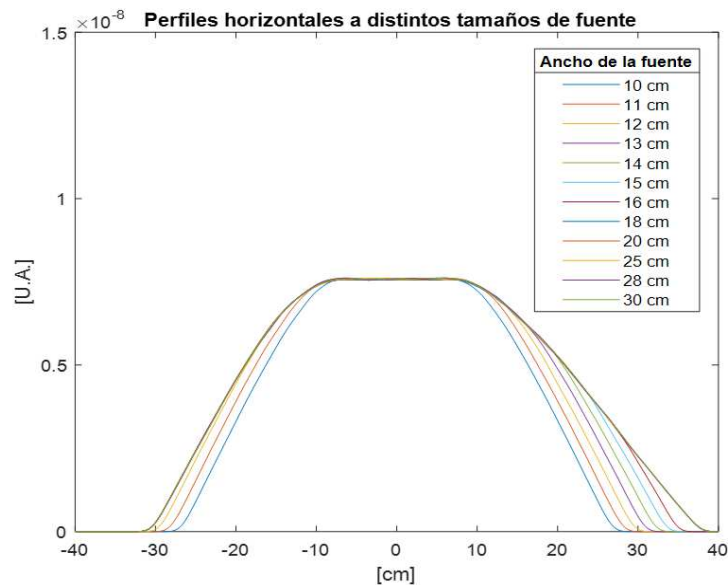


Figura 4.17: Perfiles horizontales en las posiciones L6=17m, para distintos anchos de fuente.

Si bien existe cierta asimetría en los perfiles del haz, en la zona de máxima iluminación el ancho se mantiene constante y uniforme.

Para todos los casos evaluados se pudo observar que, al analizar el cambio del parámetro evaluado en función del ancho de la fuente en todas las posiciones existe un valor de ancho de fuente a partir del cual el parámetro evaluado se estabiliza. Esto se puede verificar en el Apéndice B.

Con los ajustes realizados en cada uno de los casos evaluados, se cuantificó el ancho efectivo para cada posición. A continuación, se presenta a modo de resumen, la Tabla(4.2) comparando los valores de ancho efectivo para las posiciones de los dos regímenes extremos.

L/D	L2=5.27m	L4=10m	L5=13m	L6=17m
234	17.03 cm	14.45 cm	14.22 cm	13.76 cm
6000	14.31 cm	10.69 cm	10.54 cm	10.48 cm

Tabla 4.2: Anchos efectivos para las distintas posiciones y regímenes.

Queda en evidencia que, a medida que aumenta la distancia a la fuente el ancho efectivo disminuye, esto indica que hay una menor percepción del tamaño de la fuente o dicho en otras palabras, el valor de ancho de fuente se va aproximando al ancho real de la ventana del conducto de extracción, lo cual es de esperar ya que la óptica del instrumento se diseñó para que en las posiciones de irradiación se iluminara con neutrones solo de la ventana del conducto de extracción. Para la posición de L2=5.27m en el régimen L/D=234 se observa el mayor ancho efectivo, de 3,5 cm adicionales a cada lado de la ventana del conducto.

4.3. Verificación de la óptica del diseño conceptual de ASTOR

El estudio de verificación resulta necesario para corroborar que, con la óptica del diseño conceptual prevista, se cumplan los requerimientos del instrumento. Los requerimientos de ASTOR se describieron en detalle en el Capítulo 2 y están dados sobre las posiciones de irradiación. En este estudio sólo se verificará el requerimiento impuesto sobre el área iluminada.

Los estudios se realizaron para los regímenes de colimación del instrumento de menor y mayor L/D y se analizaron los detectores ubicados en las posiciones de irradiación estándar L4, L5 y L6 (10 m, 13 m y 17 m respectivamente).

Para este análisis se utilizaron los datos registrados en el estudio del comportamiento del haz a lo largo del instrumento de la Sección 4.1

Para la verificación de la óptica se calculó el ancho y el alto de la zona de máxima iluminación de las proyecciones registradas por los detectores. Se compararon los valores obtenidos del ancho y alto de la zona de máxima iluminación con los valores especificados en el requerimiento del instrumento y se verificó que cumplieran con lo establecido.

El resultado completo se presenta en el Apéndice C.

A Continuación, en la Figura (4.18), a modo de ejemplo, se comparan las zonas de máxima iluminación calculadas para la posición de irradiación L6 a 17 m para ambos regímenes.

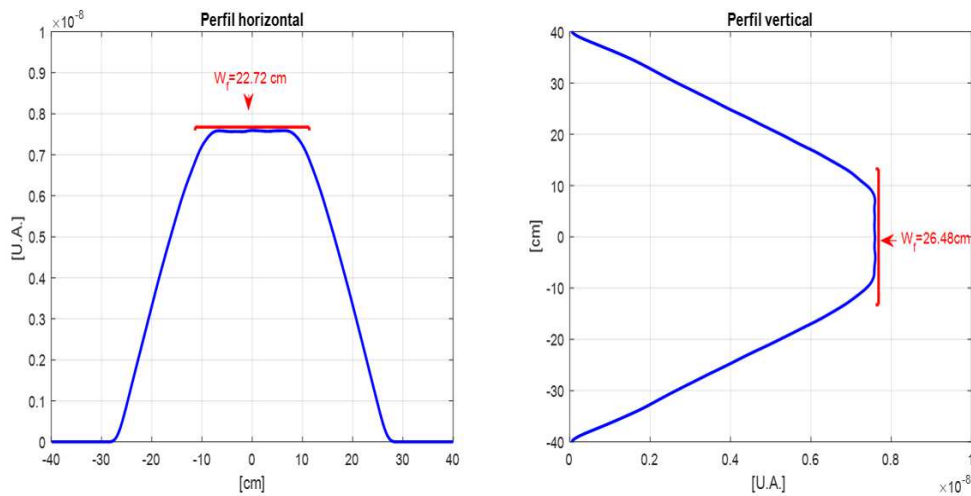


Figura 4.18: Perfil horizontal y vertical en la posición L6=17 m para el régimen de colimación $L/D=234$.

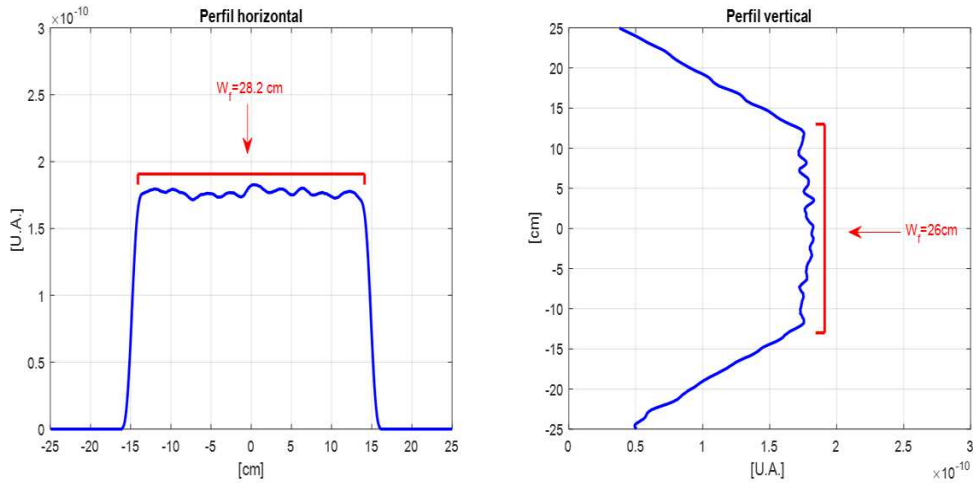


Figura 4.19: Perfiles horizontales en las posiciones $L_6=17$ m para el régimen de colimación $L/D=6000$.

Los valores obtenidos de área de máxima iluminación para los regímenes de $L/D=234$ y $L/D=6000$ se detallan en la Tabla (4.3).

Posiciones	$L/D=234$	$L/D=6000$
L1	11.84 cm x 15.76 cm	12.62 cm x 11 cm
L2	16.55 cm x 20.29 cm	19.28 cm x 17.15 cm
L3	22.72 cm x 26.48 cm	28.2 cm x 26 cm

Tabla 4.3: Anchos efectivos para las distintas posiciones y regímenes.

Se compararon los valores calculados con los valores especificados en el requerimiento del instrumento.

En los requerimientos especificados para ASTOR en el Capítulo 2, especifica que se requiere un área iluminada de 10 cm x 10 cm hasta 20 cm x 20 cm, y para la técnica con imágenes de alta resolución se requiere un área iluminada de 10 cm x 10 cm hasta 25 cm x 25 cm. Para ambos regímenes de colimación se observa que, para el caso de mayor L/D los perfiles tienen mayor área de máxima iluminación que para el caso del menor L/D . Esto

concuenda con lo expuesto en el Capítulo 2, ya que el caso de $L/D=6000$ es la resolución espacial más exigente.

Se concluye que el diseño de ASTOR cumple con los requerimientos de área iluminada.

También se realizó una comparación con los valores teóricos de ASTOR, mencionados en el Capítulo 2, de área de máxima iluminación para ambos regímenes. Estas se detallan en las Tablas (4.4)(4.5)

Posiciones	Valores teóricos[cm]	Simulacion [cm]
L1	5x5	11.84x15.76
L2	9.5x9.5	16.55x20.29
L3	15.5x15.5	22.72x26.48

Tabla 4.4: Comparación de los FOV simulados con los valores teóricos $L/D=234$.

Posiciones	Valores teóricos[cm]	Simulacion [cm]
L1	12.9x7.5	12.62x11
L2	19.8x12.7	19.28x17.15
L3	29x20	28.2x26

Tabla 4.5: Comparación de los FOV simulados con los valores teóricos $L/D=6000$.

De la comparación de las Tablas (4.4)(4.5) se observa que todas las zonas de máxima iluminación están por encima de los valores teóricos.

Capítulo 5

Estudio de rendimiento espectral de ASTOR e implementación de un sistema de selección de energía de neutrones

En este Capítulo se describen los estudios relacionados con el rendimiento espectral de ASTOR y la implementación de un selector mecánico de selección de energía de los neutrones.

Los objetivos del estudio fueron:

El desarrollo de un modelo de fuente de neutrones dependiente de la energía para la implementación en la geometría de ASTOR.

Como segundo objetivo se tuvo la caracterización del selector de velocidad que se prevé para ASTOR y su implementación.

El tercer objetivo fue desarrollar un modelo de ASTOR con la implementación de la fuente dependiente de la energía de los neutrones y del selector

de velocidad, y realizar un análisis de su rendimiento.

Se divide a este Capítulo en tres secciones: en la primera sección se realiza la descripción del desarrollo de la fuente dependiente de la energía. La segunda sección se centra en el selector de velocidad seleccionado para ASTOR, en la cual se describe y caracteriza este dispositivo. En la tercera sección se desarrolla un modelo de ASTOR con la implementación, tanto de la fuente dependiente de la energía de los neutrones, así como el selector de velocidad y se realiza un análisis de su rendimiento.

5.1. Desarrollo de una fuente dependiente de la energía

Para poder realizar un estudio relacionado al rendimiento espectral de ASTOR, fue necesario el desarrollo de una fuente de neutrones dependiente de la energía. A diferencia de los estudios de la performance de la óptica donde se utilizó una fuente monocromática, los estudios de los aspectos espectrales requieren de una fuente que modele el espectro de energías que tendrá ASTOR.

Para el modelado de la fuente se partió de un archivo "fuente_ptrac" con información de los estados de los neutrones que pasan por el haz del instrumento obtenido a través del programa MCNP por el grupo de blindaje de ASTOR [9]. Se realizó una caracterización y se analizaron las relaciones entre los distintos parámetros de la fuente.

Seguidamente se utilizaron las distribuciones estadísticas para desarrollar un modelo de fuente para ASTOR.

Finalmente se realizó una comparación entre la nueva fuente con la fuente Ptrac con el fin de comprobar si representa efectivamente el espectro de

ASTOR.

El grupo de blindaje de ASTOR obtuvo, a través del programa MCNP, el grabado de fuentes de tracks. Una fuente de tracks es aquella que guarda, para cada neutrón que atraviesa la superficie de grabado, toda la información de estado del mismo. Las fuentes de tracks pueden ser transformadas a otro formato Ptrac mediante una corrida adicional de MCNP.

A diferencia de la fuente utilizada en los estudios anteriores, el grabado de la fuente track por el grupo de blindaje de ASTOR no se realizó en la ventana del conducto extracción, tal como se observa en la Figura (5.1)

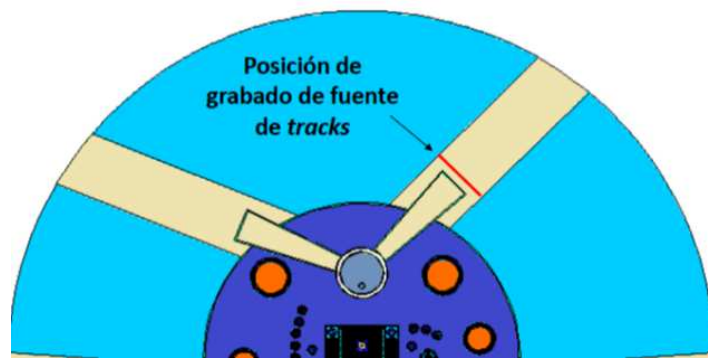


Figura 5.1: Esquema de grabado de track para ASTOR.

La fuente Ptrac es un archivo que contiene información del estado de cada neutrón - coordenadas (x,y,z) que indican el punto de cruce del neutrón con la superficie de grabado, las direcciones descritas en relación a cada eje, la energía del neutrón E , y el peso estadístico, w .

El formato *Ptrac* se puede utilizar en McStas utilizando el componente "*Ptrc_source_difrac*" que lee este formato e introduce los neutrones de este archivo como fuente en el input del instrumento.[34]

Sin embargo, para los estudios que se pretende realizar, este tipo de fuente tiene un bajo valor estadístico. Las fuentes de tracks fueron grabadas con 10^9

neutrones y resultan insuficientes para el cálculo y caracterización detallada, sin embargo, es suficientes para obtener información estadística a partir de ellas.

Por lo tanto, es necesario desarrollar un modelo de fuente que se comporte de igual manera que la fuente P

Con el fin de tener una perspectiva de la distribución de los distintos parámetros de la fuente PC++.

La ubicación del archivo "fuente_p

Para la realización de los histogramas se utilizó un sistema de ejes con el origen en el centro de la superficie de grabado de la "fuente_p

La Figura (5.2) representa un esquema de la ubicación del grabado de fuente y del sistema de ejes de MCNP y de la fuente.

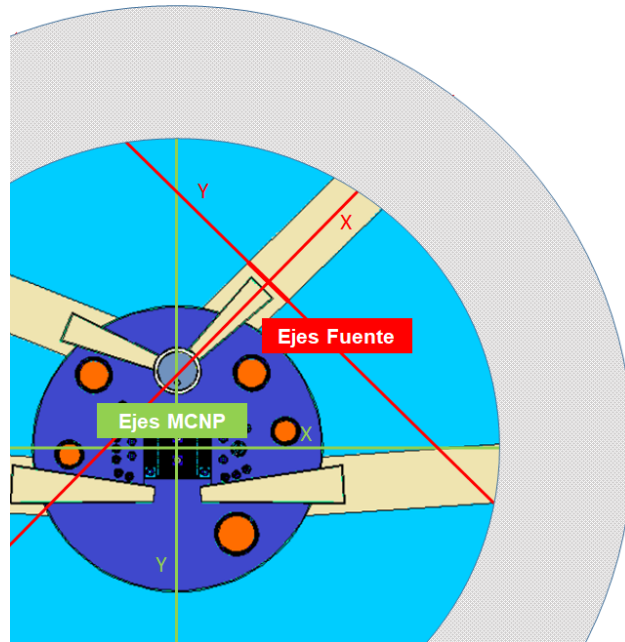


Figura 5.2: Sistema de ejes MCNP y ejes Fuente

Los histogramas obtenidos para la posición en X , Y y Z se ilustran en las Figuras (5.3). Los histogramas representan la frecuencia de la ubicación tanto del eje X , Y y Z de los neutrones.

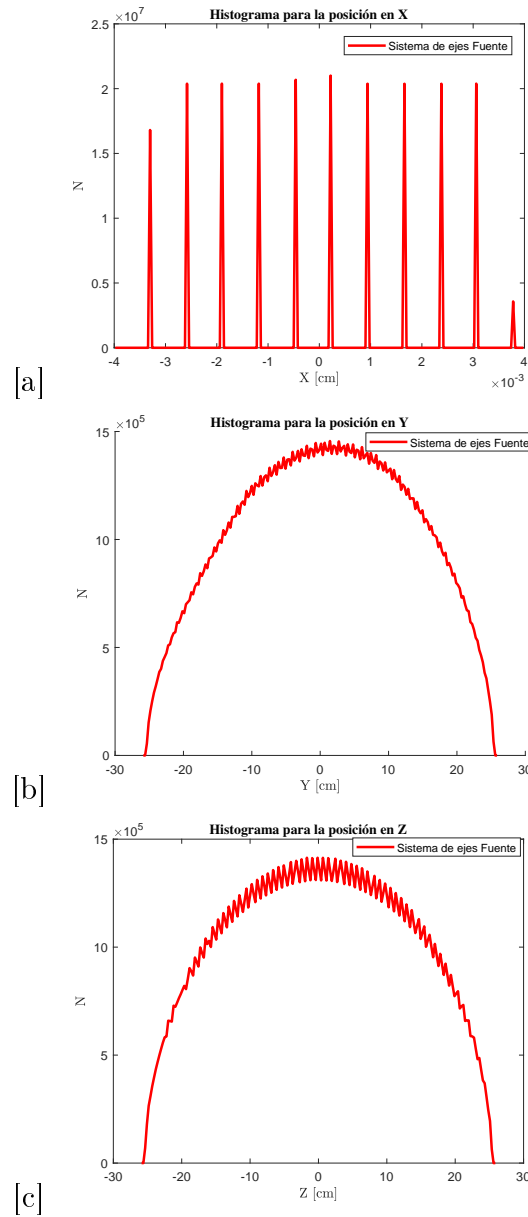


Figura 5.3: Histogramas de posición (a)Histograma posición en X, (b) Histograma posición en Y,(c)Histograma posición en Z.

Para el eje X se observa que la distribución de neutrones se acomoda en planos separados, como se mencionó anteriormente, la información del archivo fuente ptrac es obtenida del grabado de una superficie plana; esta

discrepancia se puede explicar por los redondeos de los valores que hace el programa

Para el caso de los ejes Y y X se observa una mayor distribución de neutrones en el centro de la misma.

En la Figura (5.4) se representan los histogramas con respecto a las direcciones referidas al eje X , Y y Z . Con el fin de comparar el cambio del sistema de ejes se graficaron los histogramas con las direcciones originales de la fuente P

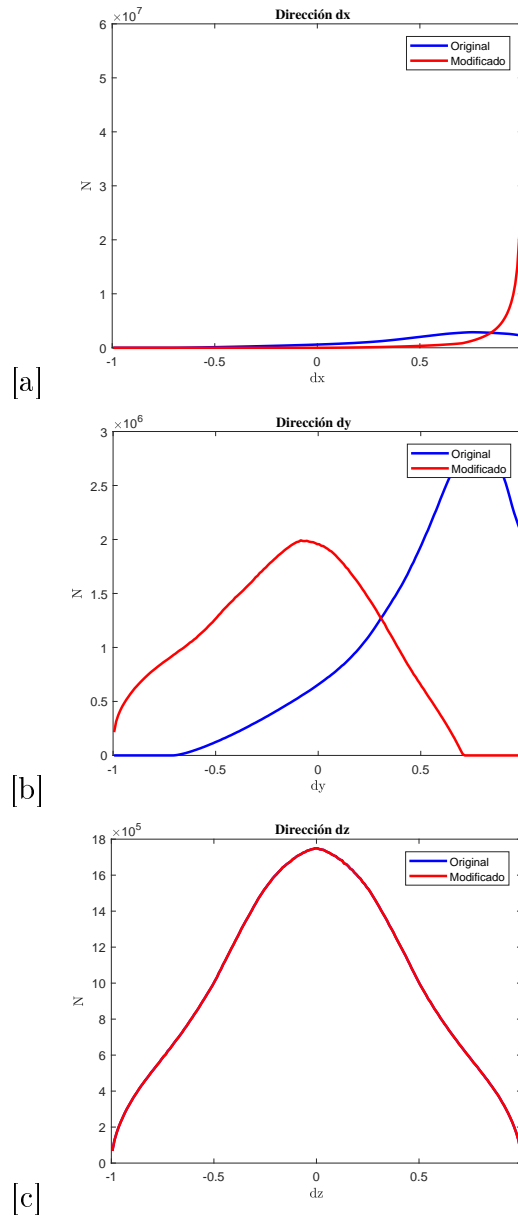


Figura 5.4: Histogramas de dirección (a)Histograma dirección en X, (b) Histograma dirección en Y,(c)Histograma dirección en Z.

En la dirección con respecto al eje X se observa que en la dirección original existe una mayor distribución de neutrones que salen con una dirección de 45° respecto al eje X representado gráficamente en 0.707 -que se corresponde

con el Cos 45° -. Esto tiene que ver con la posición de la fuente con respecto a los ejes MCNP, significa que la mayoría de los neutrones salen en dirección perpendicular al plano de la fuente. Una vez modificados los ejes, en rojo, se observa que la mayoría de los neutrones salen con una dirección de 0° con respecto al eje X, representado gráficamente en 1 -que se corresponde al cos 0° - y representando efectivamente que la mayoría de los neutrones salen en dirección perpendicular al plano de la fuente según los ejes trasladados.

En el caso de la dirección con respecto al eje Y, en los ejes originales se observa que existe una mayor distribución de neutrones que salen con una dirección de 45° respecto al eje X representado gráficamente en 0.707 - que corresponde a el cos 45° - Para el caso de la distribución de las direcciones modificadas se observa que la mayoría de los neutrones salen con una dirección de 90° con respecto al eje Y, representado gráficamente en 0° que se corresponde al cos 90° - representando también que la mayoría de los neutrones salen en dirección perpendicular al plano de la fuente según los ejes trasladados.

Para las direcciones con respecto al eje Z, como no existe rotación, los cosenos directores son iguales en ambos ejes y se observa que la mayoría de los neutrones salen con una dirección de 90° con respecto al eje Z, representado gráficamente en 0 -que se corresponde al cos 90° -

El histograma obtenido para la distribución de la energía se grafica en la Figura(5.5), debido a que la energía no depende de los ejes, los histogramas son iguales.

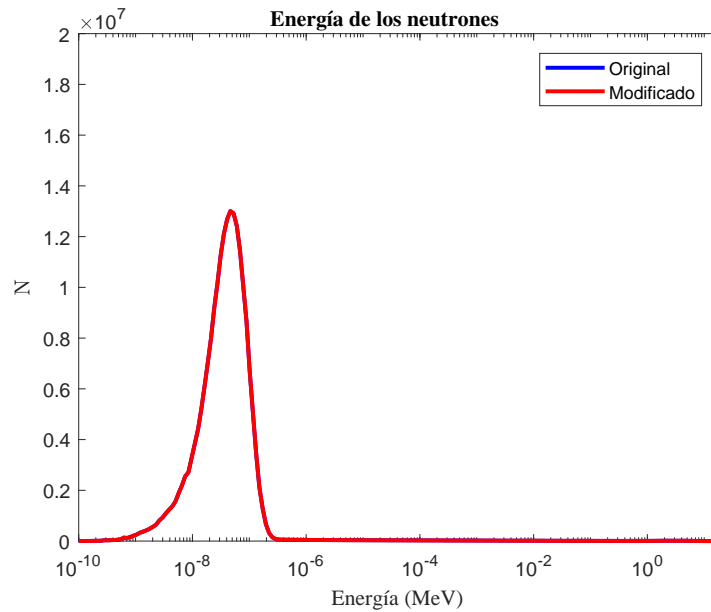


Figura 5.5: Espectro de Energía

Con el fin de comprobar si los distintos parámetros que definen el estado del neutrón son independientes se realizó un análisis de correlación. La correlación es una medida de la relación lineal entre dos variables.

Para este análisis se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas. Según el criterio de Pearson si el coeficiente se acerca a ± 1 entonces existe una correlación entre las variables evaluadas.

Con el fin de evaluar la correlación entre los distintos parámetros se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para todas las combinaciones de los parámetros del neutrón y los resultados obtenidos para cada correlación se describen en la Tabla(5.1).

Variables	Coefficiente de correlación
X dx	0.00376231
Y dy	0.178725
Z dz	0.166021
X E	-1.17028 ⁻⁵
Y E	0.0134778
Z E	3.00576e ₋₅
E dx	0.0231303
E dy	0.00872159
E dz	0.00021429

Tabla 5.1: Coeficiente de correlación de Pearson para las distintas combinaciones de las variables del estado de un neutrón.

Del cuadro anterior, y teniendo en cuenta el criterio del análisis del coeficiente de Pearson, se puede observar que no existe ninguna correlación entre las distintas variables analizadas.

El equipo de diseño de ASTOR cuenta con el desarrollo de un componente tipo "Source_iso" que "lee" un espectro de energía obtenido en la ventana del conducto de extracción de ASTOR. Sin embargo, este archivo está desactualizado ya que refleja el espectro de energías sobre haz GF3 donde fue inicialmente pensado ubicar a ASTOR. Como finalmente se propuso la ubicación del instrumento sobre el haz GF4, entonces resulta necesario para los estudios de rendimiento espectral, la creación de un archivo actualizado que contuviera la información espectral que represente la fuente de neutrones actual de ASTOR.

Con la información estadística de la energía de la fuente P

En la Figura(5.6) se observa el histograma de energías obtenido a partir de la fuente P

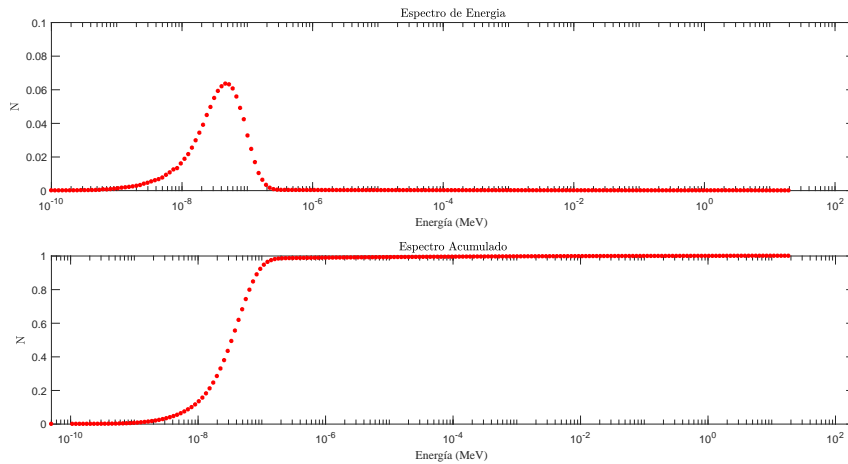


Figura 5.6: Espectro de energías y espectro acumulado

La función de distribución acumulada se guardó en un archivo .dat, con el fin de que fuera leído por el componente de fuente `Source_RA10_iso`. Para la realización del espectro acumulado se tuvo en cuenta que las energías provenientes del histograma obtenido del MCNP son en MeV y el McStas las considera en meV.

Finalmente se realizó una de la fuente modelada por el componente `"Source_RA10_iso"` y la fuente `Ptrac`. Para ello se modelaron con McStas dos instrumentos; uno con un componente de fuente tipo `"Ptrac_source_difrac"` que lee la fuente `Ptrac`, y otro con el componente `"Source_RA10_iso.comp"` que lee el espectro acumulado obtenido anteriormente.

En ambos casos se colocó a 20 cm de la fuente un detector tipo `monitor_L` que es sensible a la longitud de onda de los neutrones y se realizó una simulación. Los registros obtenidos para ambos detectores se grafican de forma normalizada en la Figura(5.7). En azul se representa el registro del detector de la fuente `"Source_RA10_iso.comp"` (Fuente 2018) y en rojo el registro de la fuente `"Ptrac_source_difrac"` (Fuente `Ptrac`).

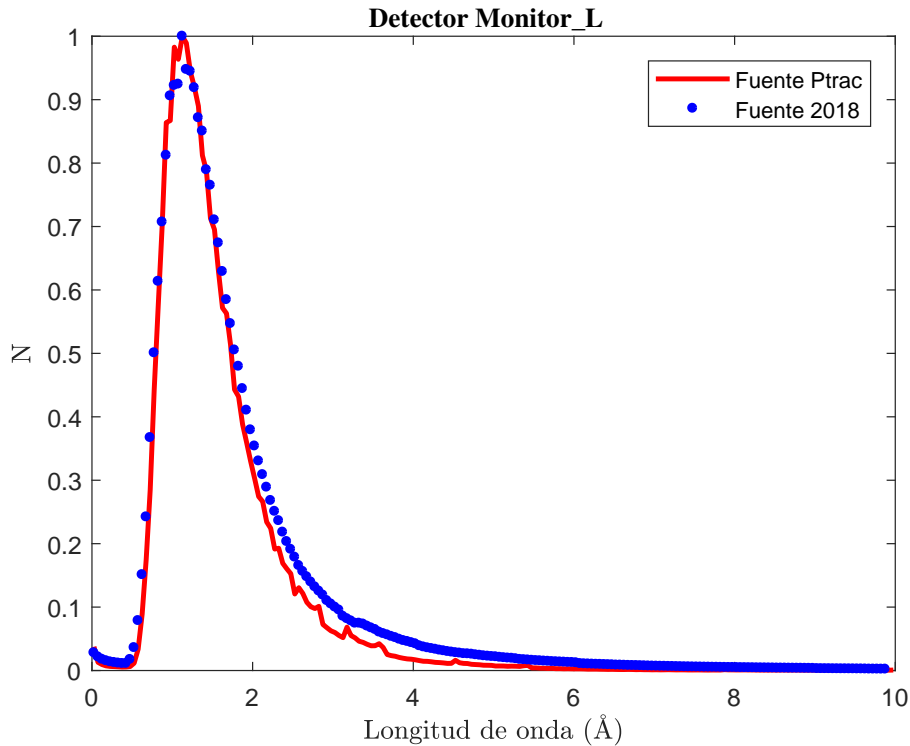


Figura 5.7: Comparación entre fuente 2018 y fuente Ptrac

Como se puede observar ambos espectros son similares. Por lo tanto, se puede concluir que el archivo obtenido que contiene información del espectro representa definitivamente la fuente Ptrac.

5.2. Implementación de un selector de velocidad

Para la implementación del selector de velocidad en ASTOR, primero se realizó un modelado de este componente. En el Capítulo 2 se realizó una breve descripción de este tipo de dispositivo.

Con el fin de entender el comportamiento de un selector de velocidad

se realizó en McStas una caracterización del mismo. Primero se estudió el comportamiento del selector con una fuente de energías uniforme y luego con la fuente dependiente de energías obtenida en la Sección anterior.

Se prevé que ASTOR cuente con un selector de velocidad tipo ASTRIUM [35] de este u otro proveedor. Los parámetros relevantes de este selector de velocidad se obtuvieron de las especificaciones brindadas por ese fabricante en particular; estos se enumeran en la Tabla (5.2).

Parámetros Selector de velocidad ASTRIUM	
α	48.3
L	0.25 m
Número de álabes	72
Ventana	150x65 mm

Tabla 5.2: Parámetros del Selector de Velocidad ASTRIUM.

El modelado del selector de velocidad se realizó con el componente "V_selector" de McStas (ya existente como componente estándar del software) y los parámetros específicos de ASTRIUM.

Para la primera caracterización del selector se modeló con el programa McStas un instrumento compuesto por una fuente de energía uniforme tipo "Source_simple" con longitudes de ondas uniformes desde 0.5 Å hasta 4.5 Å, un selector de velocidad con los parámetros de ASTRIUM y un detector tipo "monitor_L" con el fin de observar las longitudes de onda seleccionada y se realizaron simulaciones con distintas selecciones de energía.

Las selecciones de energía y la frecuencia de rotación del selector de velocidad utilizadas para las simulaciones se detallan en la Tabla (5.3).

Longitud de onda [Å]	Frecuencia de rotación [Hz]
1	2123
2	1061
3	707
4	530

Tabla 5.3: Frecuencia de rotacion para las longitudes de onda seleccionadas

La frecuencia de rotación del selector se obtuvo utilizando los parámetros del selector de velocidad ASTRIUM en la Ecuación (2.4) descripta en el Capítulo 2.

Los registros de los detectores de energías para cada simulación se ilustran en la Figura (5.8) con el fin de una mejor comparación se los colocaron todos los registros en una misma gráfica.

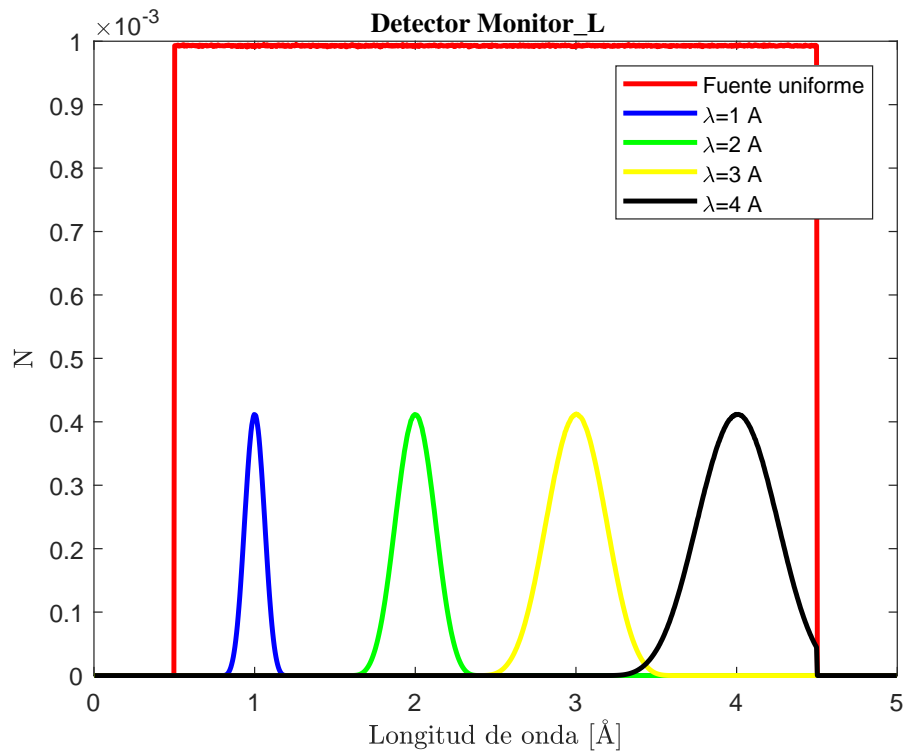


Figura 5.8: Registros de los detectores "monitor_L" para distintas selecciones de λ y una fuente uniforme.

Se observa con rojo los registros del detector sin selector de velocidad, los cuales se corresponden con el espectro a la fuente. En azul se observa el registro del detector cuando la longitud de onda seleccionada es de 1 \AA , en verde cuando es 2 \AA , y en amarillo y negro cuando corresponde a 3 y 4 \AA respectivamente.

Seguidamente se calculó la resolución para cada longitud de onda seleccionada. Para ello se sacó el ancho a mitad de altura -FWHM- y se dividió por la longitud de onda seleccionada.

Para el cálculo de la transmisión se encontró el máximo de intensidad para cada selección y se dividió por la intensidad media de la fuente sin selector de velocidad. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla(5.3).

Longitud de onda [Å]	Resolución [%]	Transmisión [%]
1	19.5(4)	51.8
2	19.6(4)	51.8
3	19.5(4)	51.9
4	19.5(4)	51.8

Tabla 5.4: Resolución y transmisión del selector ASTRIUM.

De los resultados obtenidos se puede concluir que el selector de velocidad ASTRIUM con los parámetros especificados tiene una resolución de aproximadamente 20 % y una transmisión del 54 %.

Una vez realizada la caracterización con la fuente uniforme se implementó en el instrumento la fuente "Source_RA10_iso" desarrollada en la sección anterior.

Esto se observa en la Figura (5.9

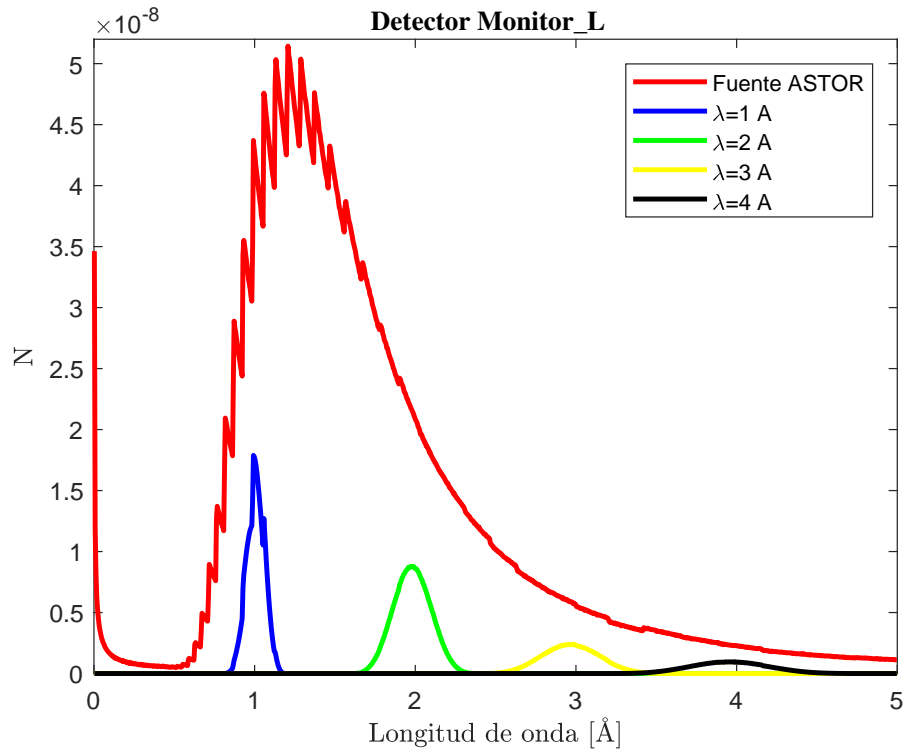


Figura 5.9: Grafica de fuente dependiente de la energía junto con los registros de selección de energía

En la Figura (5.9 se observa en rojo la fuente desarrollada en la Sección 1, en azul se ve el registro del detector cuando la longitud de onda seleccionada es de 1 Å, en verde cuando es 2 Å, y amarillo y negro cuando corresponde a 3 y 4 Å respectivamente.

5.3. Análisis del rendimiento espectral de ASTOR

Para realizar el análisis del rendimiento espectral de ASTOR, se desarrolló un modelo del instrumento con la implementación de la fuente dependiente de la energía obtenido en la Sección 1 y el selector de velocidad ASTRIUM

descrito en la Sección 2.

A diferencia de la fuente monocromática utilizada en el Capítulo 4, la fuente dependiente de la energía no está ubicada en la ventana del conducto de extracción, sino que se encuentra a 0.7 m de este debido a la ubicación de la superficie de grabado en MCNP, lo que implicó un cambio en la ubicación del componente fuente en la geometría de ASTOR utilizada anteriormente.

El selector de velocidad se encuentra a 5.67 m de la ventana de extracción, ya en la sala de conformación de haz, a continuación del obturador primario del instrumento.

La Figura(5.10) representa el modelo desarrollado de ASTOR para las simulaciones del rendimiento espectral, con la implementación de los componentes selector de velocidad "V_Selector" y la fuente dependiente de la energía "Source_RA10_iso" con McStas.

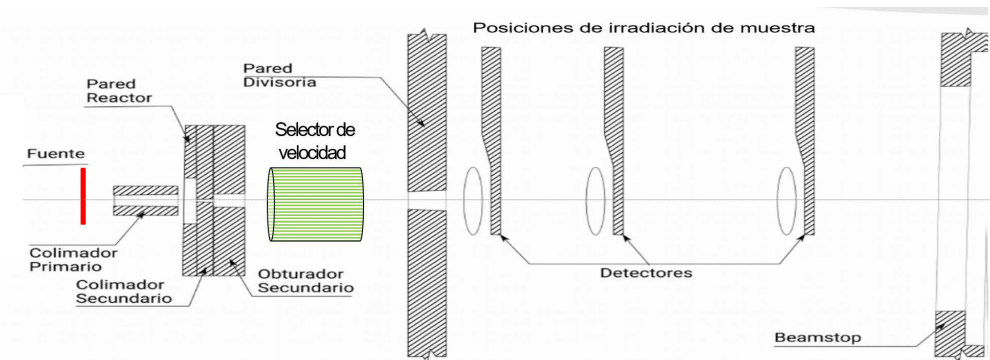


Figura 5.10: Modelo de ASTOR con implementación del selector de velocidad y de la fuente dependiente de la energía

Los análisis de rendimiento se realizaron para el régimen de colimación correspondiente al menor valor de L/D del instrumento. Se colocaron en las posiciones de irradiación detectores de intensidad tipo "PSD_Monitor" y detectores de longitud de onda tipo "L_monitor".

Se seleccionaron las longitudes de onda, correspondientes con los llamados

cortes de Bragg para el Zirconio, estas fueron $\lambda = 4,5$ y $5,5$.

Los resultados de las simulaciones se obtuvieron de los análisis de los registros de los detectores de longitud de onda y se muestran en la Figura(5.11).

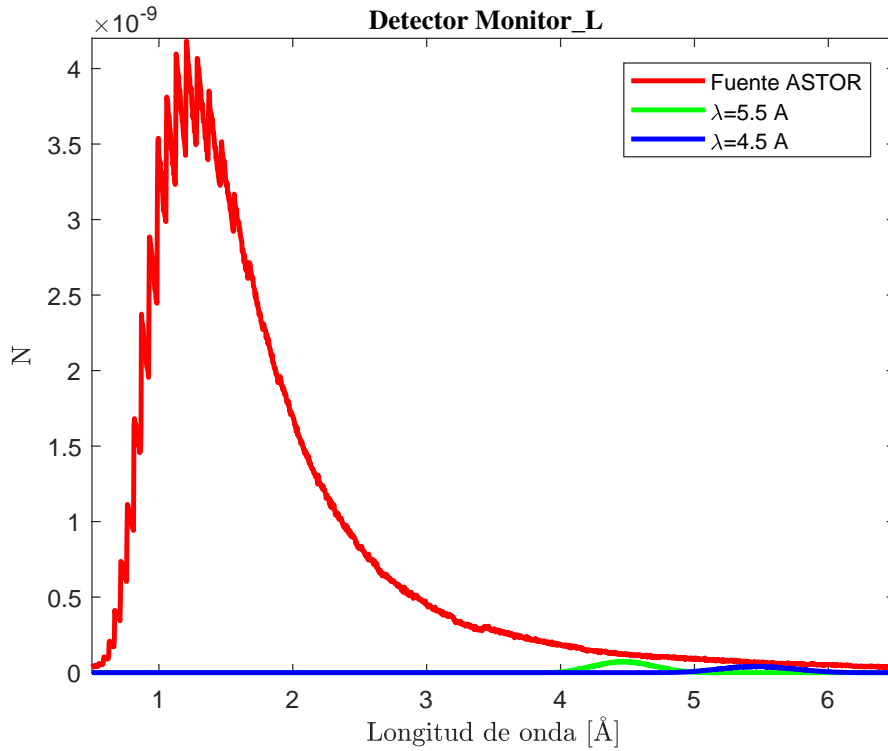


Figura 5.11: Registros del monitor_L de la fuente de ASTOR y la selección de $\lambda = 4,5$ y $\lambda = 5,5 \text{\AA}$

Se observa en rojo el registro del instrumento sin selector de velocidad, en verde el selector de velocidad con $\lambda = 4,5$ y en azul $\lambda = 5,5$. Los resultados de los detectores de intensidad para las simulaciones con las distintas selecciones de energía en la última posición de irradiación a 17 m se muestran en la Figura(5.12).

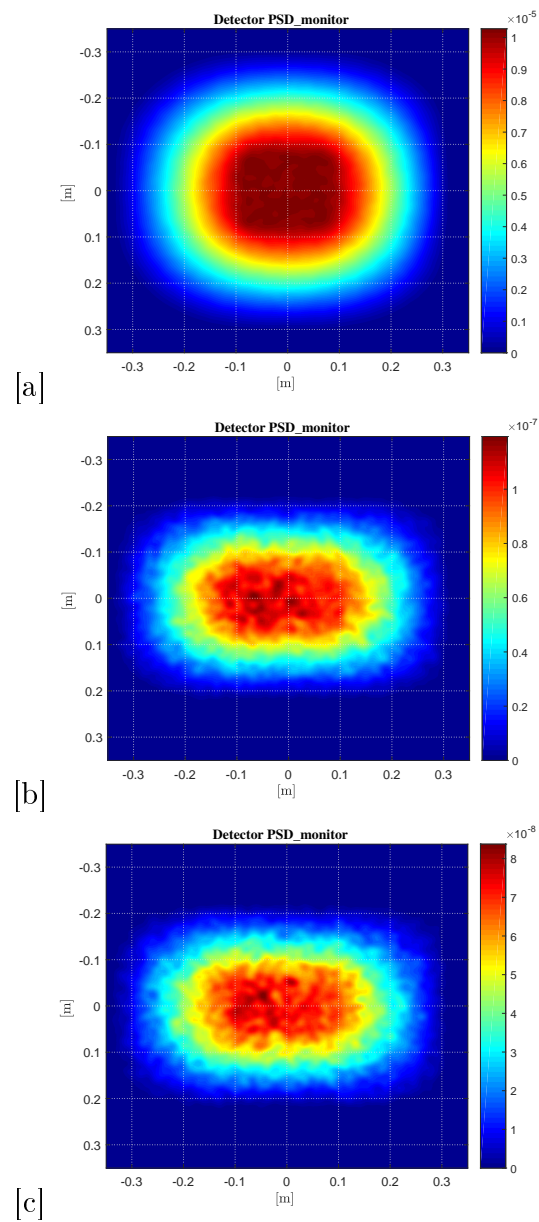


Figura 5.12: Proyección del haz a 17 m (a) Sin selector de velocidad, (b) $\lambda = 4,5$, (c) $\lambda = 5,5$

Para evaluar el rendimiento espectral se encontró el área de máxima iluminación para los detectores de intensidad ubicados en las posiciones de irradiación. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla(5.5).

Posiciones de irradiación	10 m	13m	17 m
Sin selector	14.07x14.01 cm	17.8x17.8 cm	23.17x 20.93cm
$\lambda = 4,5$	13.65x8.91 cm	16.35x10.6 cm	16.66x11.06cm
$\lambda = 5,5$	13.14x8.64 cm	9.05x7.95 cm	14.42x10.15 cm

Tabla 5.5: Area de máxima iluminación en las posiciones de irradiación para la simulación sin selector de velocidad y con las longitud de onda seleccionadas

Como se puede observar en la tabla la implementación del selector de velocidad cambia la forma y el tamaño del área de máxima iluminación, pasando en todos los casos de una forma cuadrada a una rectangular. La ventana del Selector de velocidad es de forma rectangular, esté cambio en la forma de la proyección del haz se le puede atribuir a que la ventana del selector actúa colimando el haz.

También se realizó una evaluación de los perfiles del haz. En la Figura (5.13) se representan los perfiles horizontales de la simulación de ASTOR con y sin selector de velocidad.

Cabe aclarar que los gráficos están normalizados para una mejor comparación.

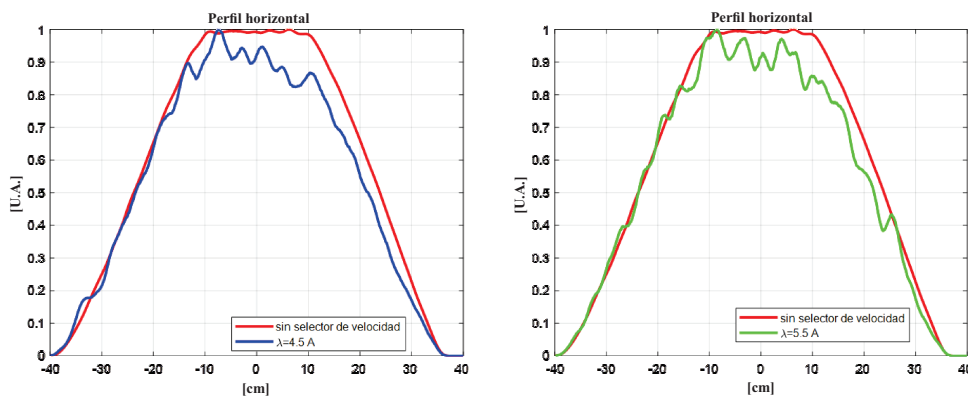


Figura 5.13

En (a) se representa en rojo el perfil horizontal del haz sin selector de velocidad y en azul el perfil con la selección de 4,5. En (b) se representa en rojo el perfil horizontal del haz sin selector de velocidad y en verde el perfil con la selección de 5.5 Å.

Como se puede observar sin el selector de velocidad existe una cierta uniformidad en el perfil del haz, sin embargo, al implementar el selector aparece una deformación del haz, esto se le puede atribuir a que la estadística fue insuficiente.

Con respecto a la intensidad del haz se evaluaron los cambios con y sin selector de velocidad. Se observa que al aplicar el selector la intensidad del haz se reduce un 98%. Para este cálculo se contaron la cantidad de neutrones totales por unidad de área que pasaron por los detectores y se evaluó la pérdida que hubo en el registro cuando se implementó el selector de velocidad.

En la Figura(5.14) se comparan en escala logarítmica los perfiles del haz con y sin selector con el fin de evidenciar el cambio en la intensidad registrada.

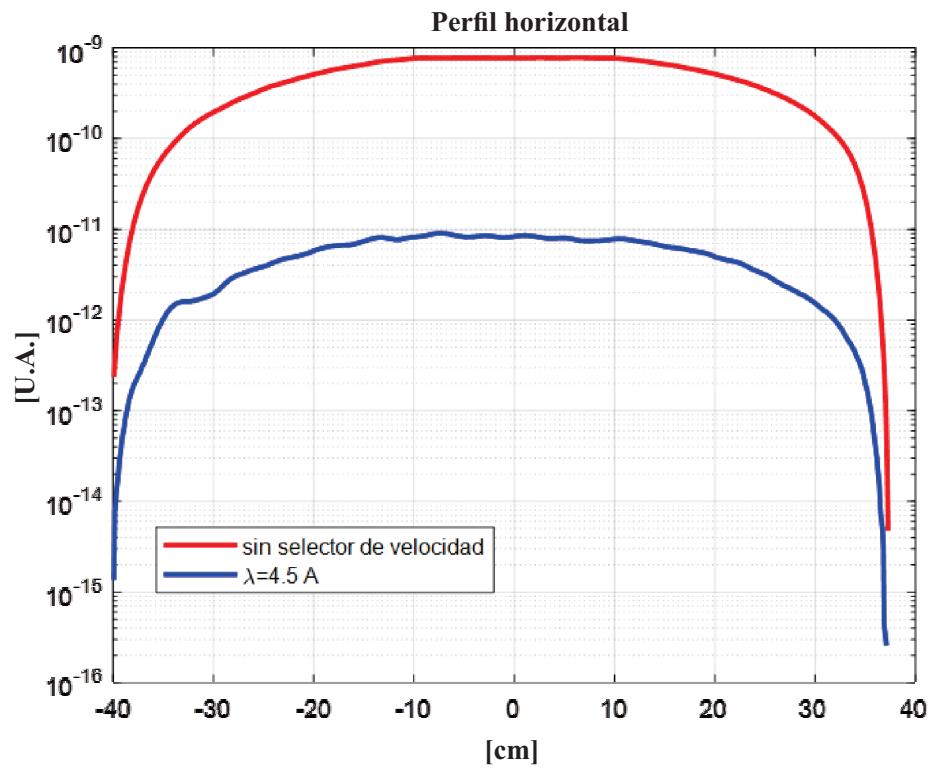


Figura 5.14: Perfil horizontal del haz con y sin selector de velocidad

Capítulo 6

Conclusiones

En este capítulo se desarrollarán las conclusiones obtenidas en los estudios realizados se intentará arribar a una conclusión general del proyecto final integrador.

El Proyecto Final Integrador se realizó en el marco del diseño preliminar del instrumento de neutrografía ASTOR y tuvo por finalidad el análisis de parte de la performance de ASTOR.

Se realizaron por un lado los estudios relacionados con el diseño de la óptica y por el otro los estudios vinculados a los aspectos espectrales de ASTOR. Los estudios realizados implicaron el desarrollo de modelos de simulación Monte Carlo con el programa McStas.

Con respecto a los estudios relacionados con la performance de la óptica de ASTOR, primero se estudió el comportamiento del haz a lo largo del instrumento para los regímenes de colimación extrema que contará ASTOR.

Se observaron los cambios en la forma del haz a lo largo del instrumento y las modificaciones en la forma de la proyección del haz, que coinciden con el tipo de colimador cónico piramidal con el que se prevé que contará ASTOR.

Para el caso del menor L/D, se observó la transformación de la proyección

casi circular con la que sale el haz del blindaje biológico del reactor, hasta la forma cuadrada que tiene en la proyección en las posiciones de irradiación.

Para el valor de L/D más extremo se analizó el cambio en la proyección del haz cuando éste atraviesa el colimador secundario observando el paso de la forma del haz casi circular a una rectangular, correspondiente a la apertura de este régimen.

También se compararon los cambios en el perfil del haz a lo largo de ASTOR, observando la disminución de la intensidad a medida que el detector se alejaba de la fuente. Por último se comparó la forma del haz para los dos regímenes, observando los cambios en la intensidad, verificando que para el régimen de menor L/D la intensidad del haz es mayor que para el régimen de mayor L/D , lo cual concuerda con que el mayor grado de colimación del haz es el que menor flujo tiene y el menor grado de colimación es el régimen de mayor flujo de neutrones.

Además, se realizó un estudio del ancho efectivo de la fuente de neutrones y se analizó el comportamiento del haz a distintos tamaños del ancho de la fuente.

Con respecto al comportamiento del haz para distintos tamaños de fuente, sólo se observó un cambio notable en el perfil horizontal para la posición $L_2=5.27$ m del régimen $L/D=234$, donde a partir de fuentes de neutrones de un ancho de 14 cm el perfil presenta una asimetría.

Del estudio de ancho efectivo de la fuente de neutrones, se observó, tal como lo esperado, que las posiciones más cercanas a la fuente perciben un mayor ancho de fuente, siendo la posición $L_2=5.27$ m del régimen $L/D=234$ la que mayor tamaño de fuente percibe. Actualmente las simulaciones de la geometría del instrumento se realizan con un tamaño de fuente de 10 cm de ancho por 30 cm de alto, esto indica que la posición L_2 percibe neutro-

nes que no se estarían teniendo en cuenta. De todos modos se observó que en estas condiciones, se verifica que los requerimientos establecidos para el instrumento, se siguen cumpliendo.

Con respecto a la verificación de los requerimientos se observó que efectivamente, para ambos regímenes de colimación se cumplen con los requerimientos impuestos sobre ASTOR, también se realizó una comparación con los valores obtenidos teóricamente, siendo estos comparables con los obtenidos en este estudio.

Con respecto a los estudios relacionados con los aspectos espectrales de ASTOR, se estudió el rendimiento espectral de ASTOR y se implementó un sistema de selección de longitudes de onda.

Para estos estudios fue necesario el desarrollo un modelo de fuente de neutrones dependiente de la energía a partir de una fuente Ptrac.

De los estudios realizados se observó que el modelado de la fuente dependiente de la energía que se desarrolló para ASTOR coincide con la información espectral obtenida de los grabados de fuente Ptrac, encontrando así un modelo de fuente que representa el espectro de ASTOR.

Se estudió y caracterizó un dispositivo activo de selección de energías tipo selector de velocidad y se desarrolló el modelado de un componente con los parámetros especificados por la firma ASTRIUM con el fin de implementarlo a ASTOR.

De la caracterización del selector de velocidad que se prevé colocar en ASTOR se observó que tiene una resolución del 20 % y una transmisión del 50 %; esto condice con los datos brindados por los fabricantes.

Se desarrolló un modelo de la geometría de ASTOR con la implementación tanto de la fuente dependiente de la energía de los neutrones como del selector de velocidad y se utilizó para realizar los estudios del rendimiento es-

pectral de ASTOR. Se seleccionaron las longitudes de onda correspondientes a los cortes de Bragg para el Zirconio y de las proyecciones del haz se estudiaron las áreas de máxima iluminación. También se observó que la ventana del selector de velocidad se comporta como un colimador, ya que las áreas de proyección del haz toman una forma rectangular, como la forma de la ventana del selector y se observó una pérdida del 98 % cuando se implementa el selector de velocidad.

Del estudio queda en evidencia el funcionamiento del dispositivo de selección de energía.

Con la implementación del selector de velocidad en la geometría de ASTOR se cumplió con el objetivo de incluir un dispositivo de selección de energía en el modelo de ASTOR para diseño de experimentos de imágenes dependientes de la longitud de onda del neutrón.

El paso siguiente de del equipo del diseño de ASTOR y para complementar los estudios realizados sería el desarrollo y optimización de un componente de filtro.

Apéndice A

Apéndice A

Se compararon las proyecciones del haz y los perfiles horizontales y verticales a lo largo del instrumento. En la Figura(A.1) se presentan los resultados para las posiciones L1, L2 y L3, que corresponden a las ubicaciones más cercanas a la fuente fría de neutrones. En la Figura(A.2) se presentan los resultados para las posiciones de irradiación L4, L5 y L6. A cada tabla se le adiciona una ilustración simplificada de las ubicaciones de los detectores analizados. Ambas tablas corresponden al régimen de menor $L/D=234$. Para el régimen de mayor $L/D=6000$ los resultados se presentan, de idéntica forma, en las Figuras (A.3) y (A.4)

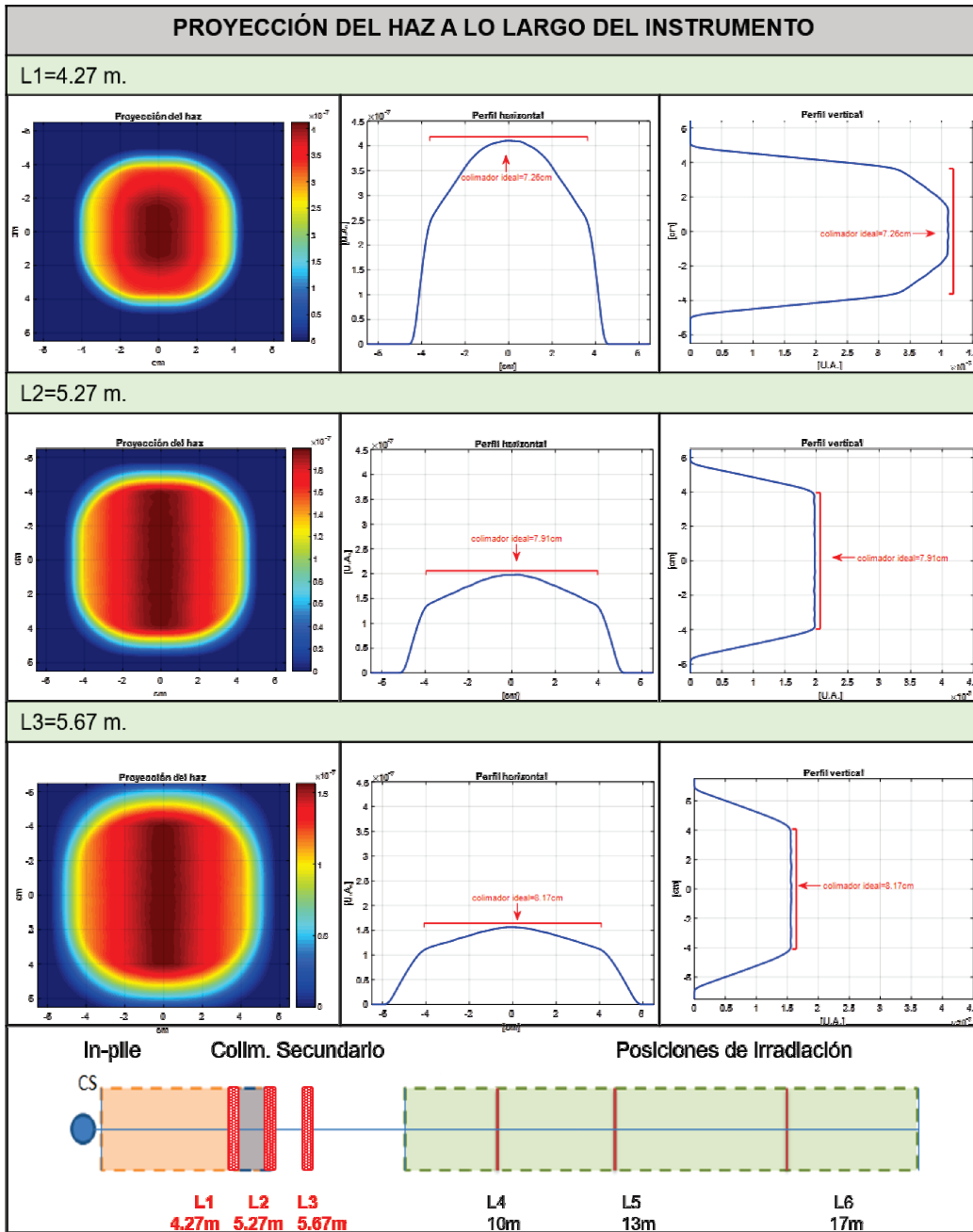


Figura A.1

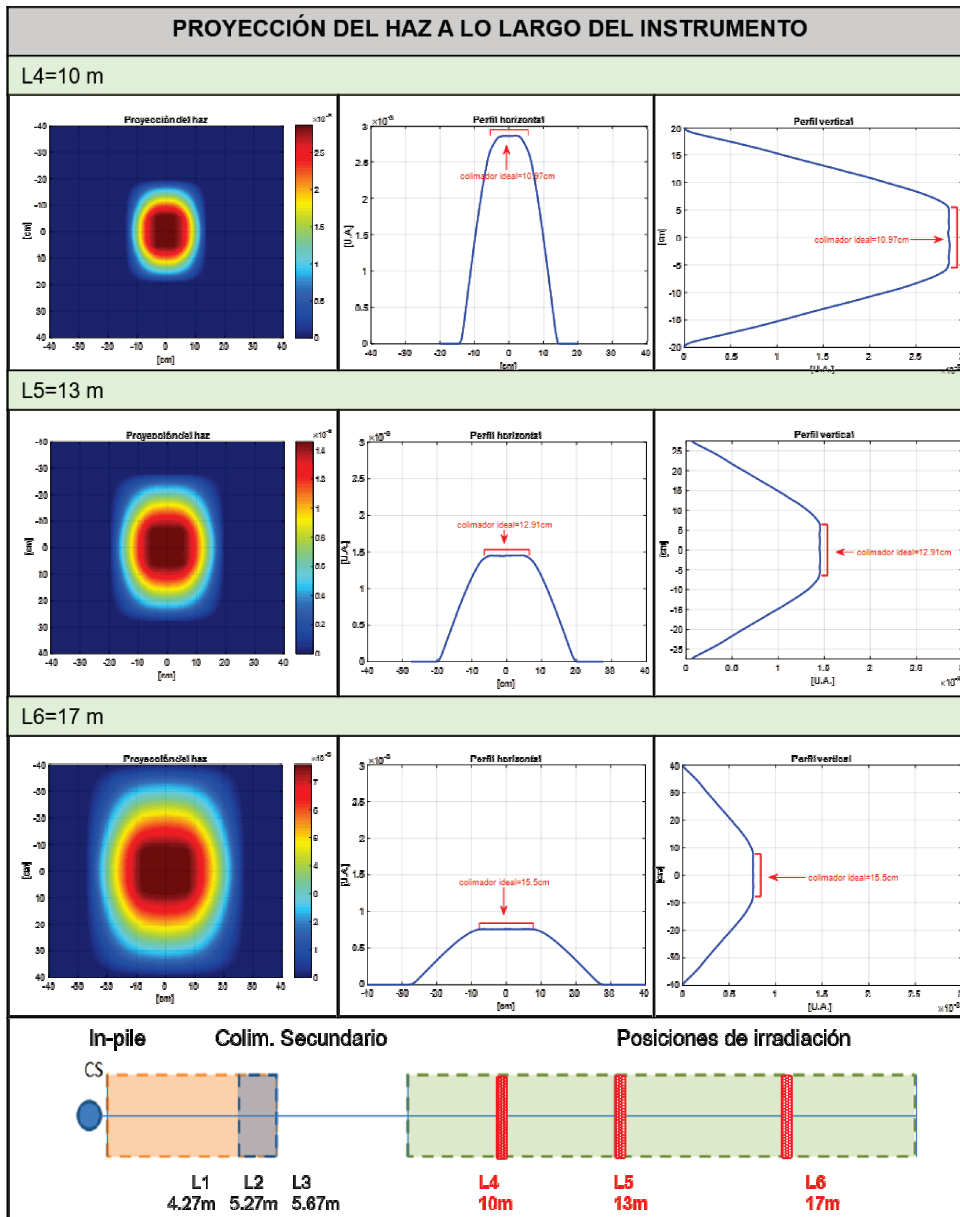


Figura A.2

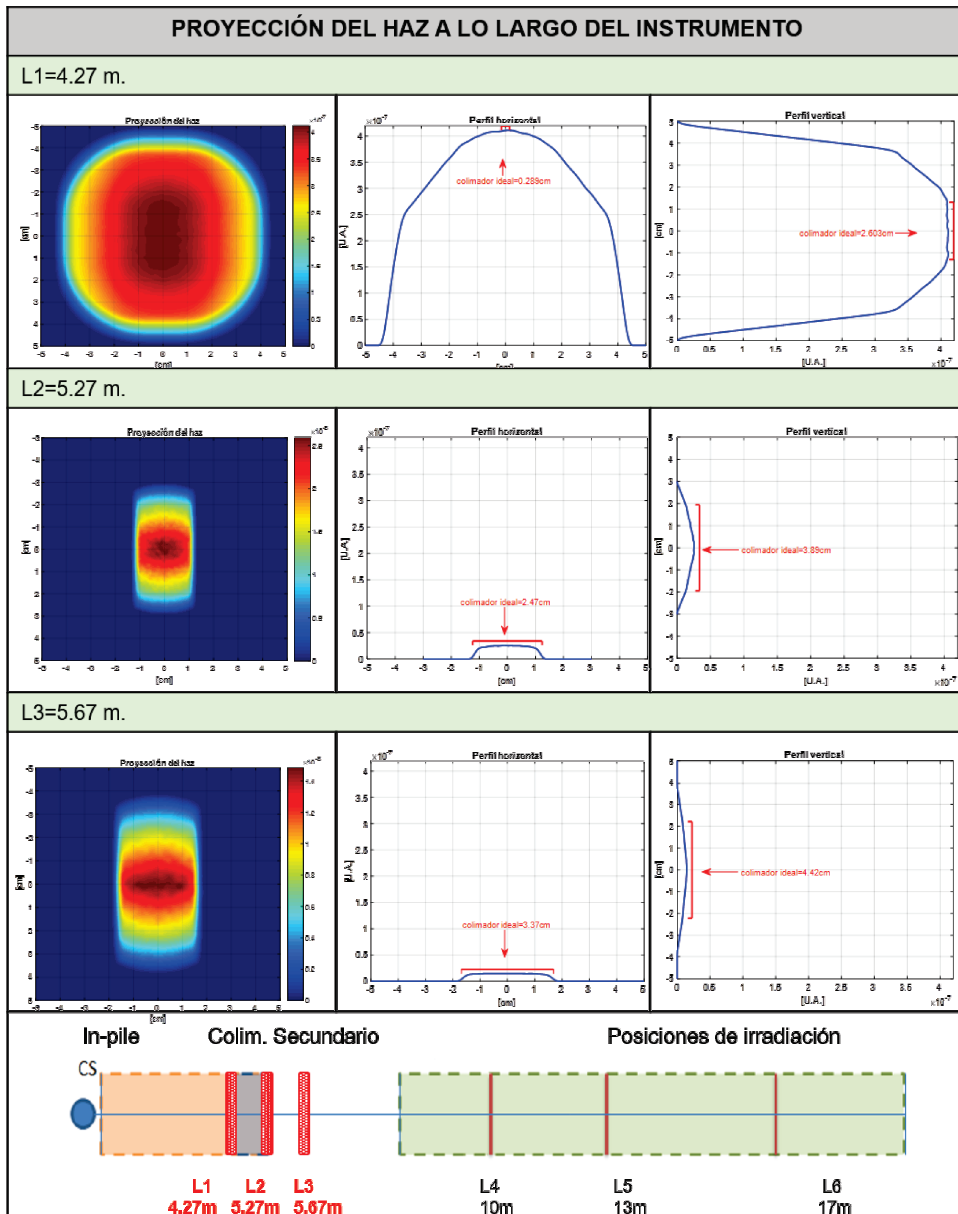


Figura A.3

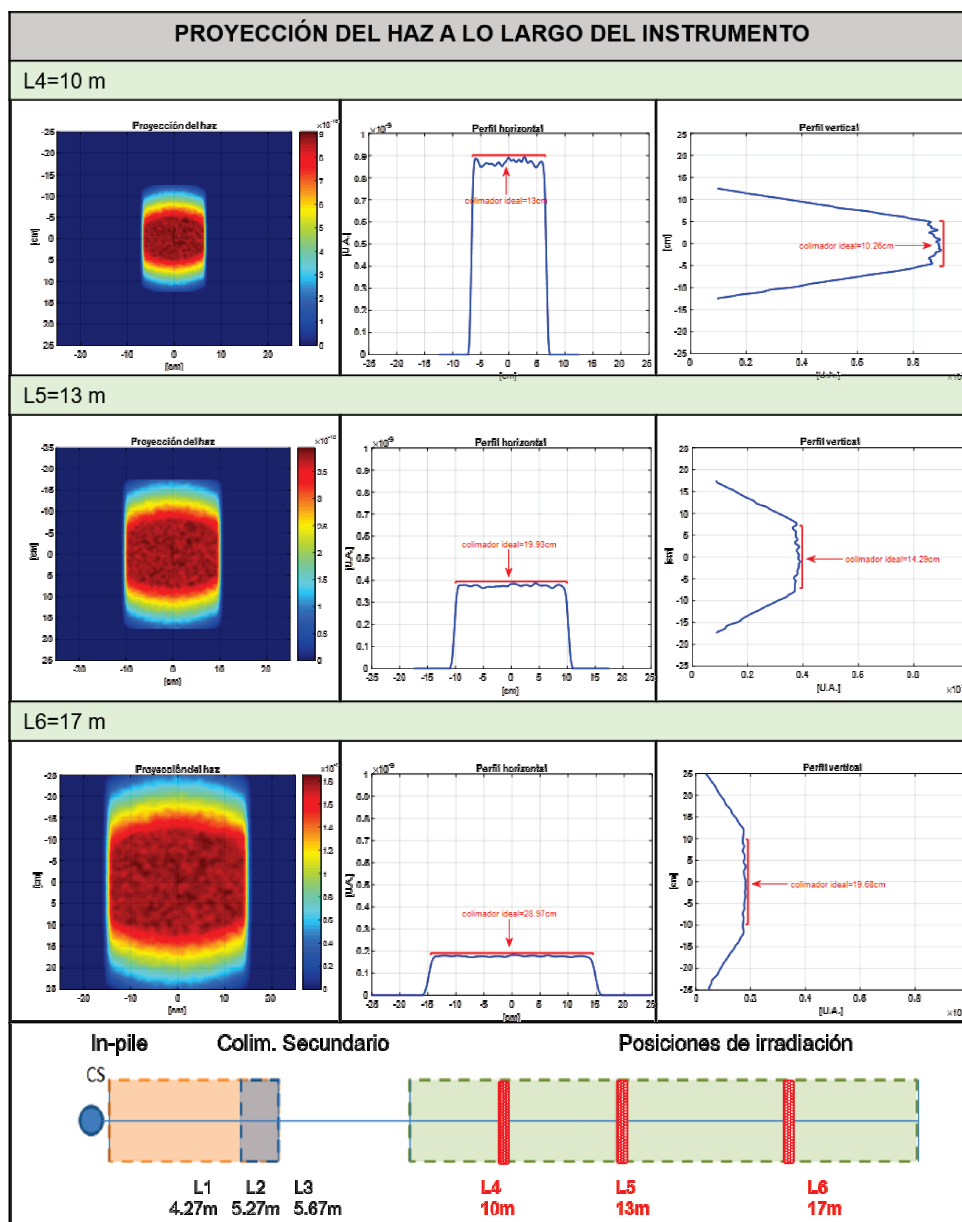


Figura A.4

Con respecto a las Figuras (A.1) y (A.2) del régimen $L/D=234$ se puede observar una disminución de la altura de los perfiles a medida que la posición se aleja de la fuente, esto indica un cambio en la intensidad registrada por los detectores, siendo este el comportamiento esperado. Con respecto a la

forma del perfil se puede observar la variación en ambas tablas, los perfiles horizontales de la tabla 1 presentan dos quiebres y una forma de punta, mientras que los de la Figura (A.2), presentan un solo quiebre y una forma plana para la zona central. También se observa, a mayor distancia de la fuente, un ensanchamiento en el perfil del haz.

Para el caso de las Figuras (A.3)y (A.4) del régimen de mayor $L/D=6000$ se observa una disminución pronunciada de la intensidad de la posición L1 a L2, esto se debe al efecto que produce el pinhole, ya que para el caso del régimen L/D , este se ubica en la posición L1. También se observa, al igual que en régimen $L/D=234$, una disminución de la altura de los perfiles con la distancia a la fuente de neutrones, y a partir de la posición L2 se observa que los perfiles horizontales tienen una forma plana y en las posiciones de irradiación se observa además que esta zona presenta pequeñas oscilaciones.

Apéndice B

Apéndice B

Estudio del ancho efectivo de la fuente de neutrones para el instrumento ASTOR.

A continuación, se presentan para cada uno de los regímenes cuatro tablas con los resultados de la variación del ancho de la fuente de neutrones para las posiciones evaluadas. En cada tabla primero se graficaron los perfiles horizontales para los distintos anchos de la fuente. En las Figuras B.1 y B.5 correspondientes a la posición L2 para ambos regímenes, se graficaron, también, los resultados obtenidos de la variación de la cantidad total de neutrones en función del ancho de la fuente. En las Figuras B.2 B.3 B.4 B.6 B.7 B.8 correspondientes a las posiciones de irradiación para ambos regímenes se graficaron: la variación tanto del ancho como del alto de la zona de máxima iluminación en función de la variación del ancho de la fuente. La variación del alto se calculó para corroborar que éste se mantiene constante al variar solamente el tamaño del ancho de la fuente de neutrones.

A las gráficas correspondientes a la variación de la cantidad total de neutrones en función del ancho de la fuente, para las tablas B.1 y B.5, y a las gráficas de la variación del ancho de la zona de máxima iluminación para

las tablas B.2 B.3 B.4 B.6 B.7 B.8 se les realizó un ajuste y se encontró, de modo cuantitativo, el valor del ancho de la fuente para el cual el parámetro evaluado se mantiene constante, siendo éste el valor del ancho efectivo para esa posición. Los ajustes se presentan en la Figura B.9 y B.10 para el régimen 234.Y B.11 y B.12 para el régimen $L/D=6000$.

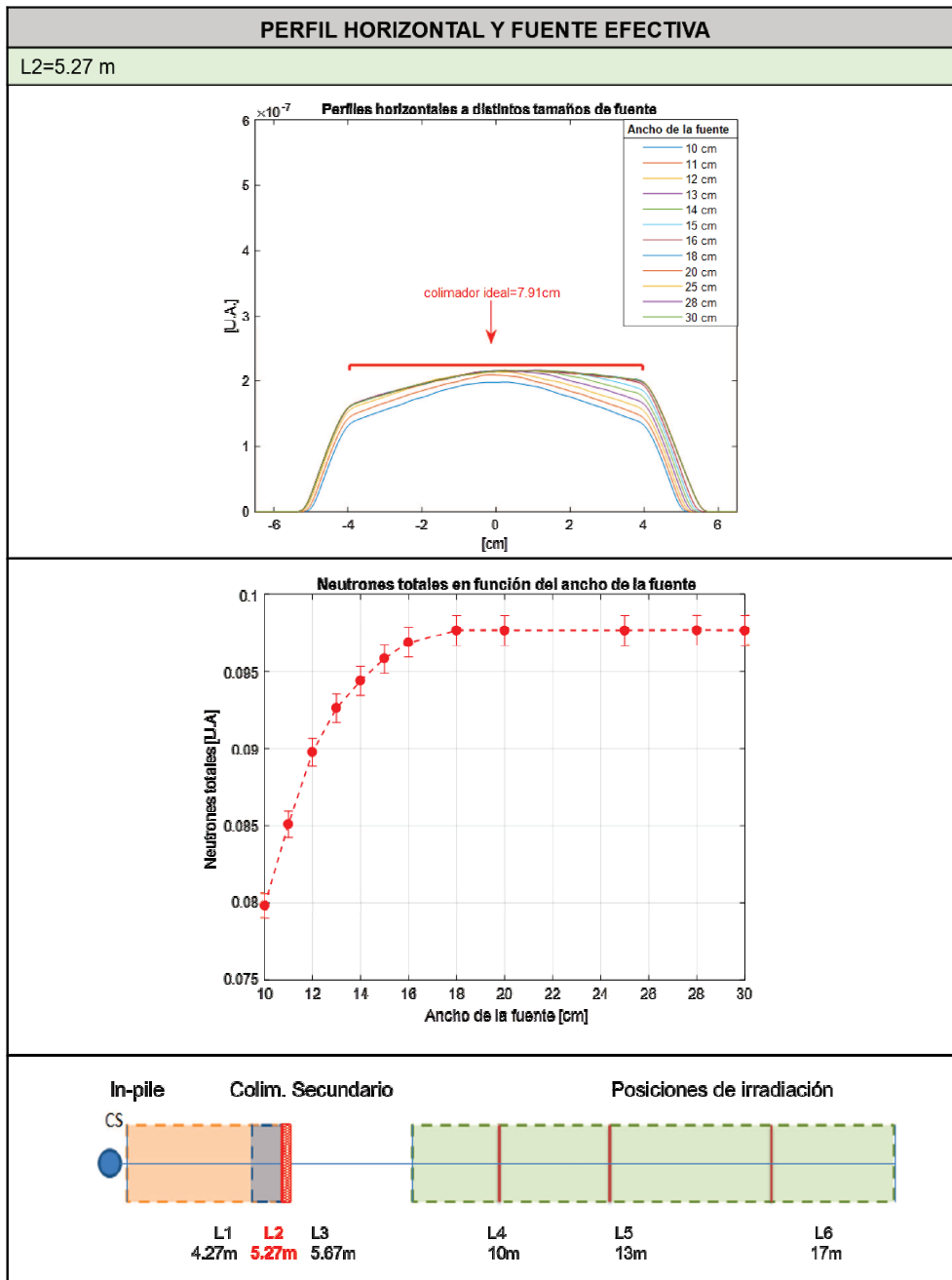


Figura B.1

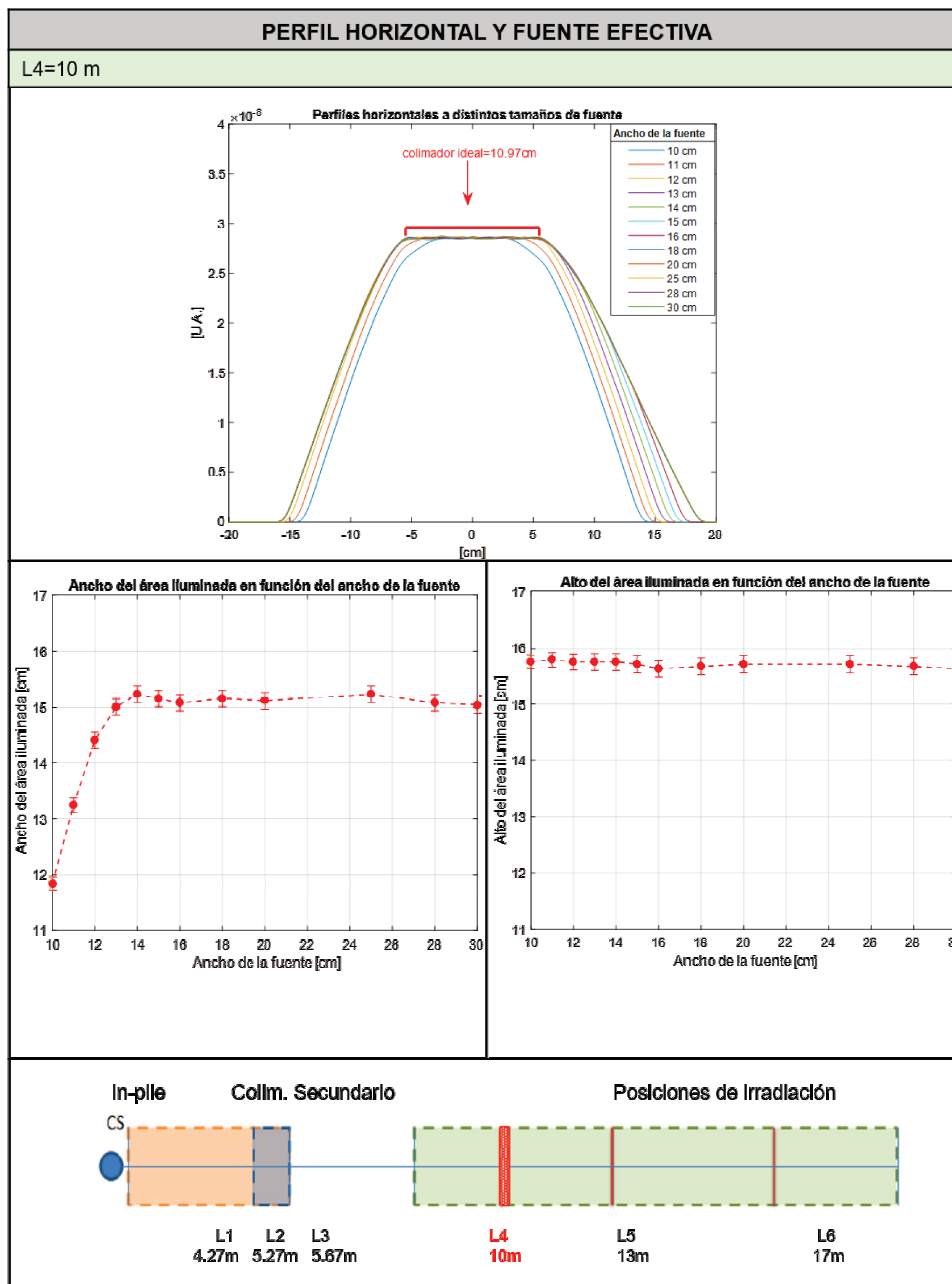


Figura B.2

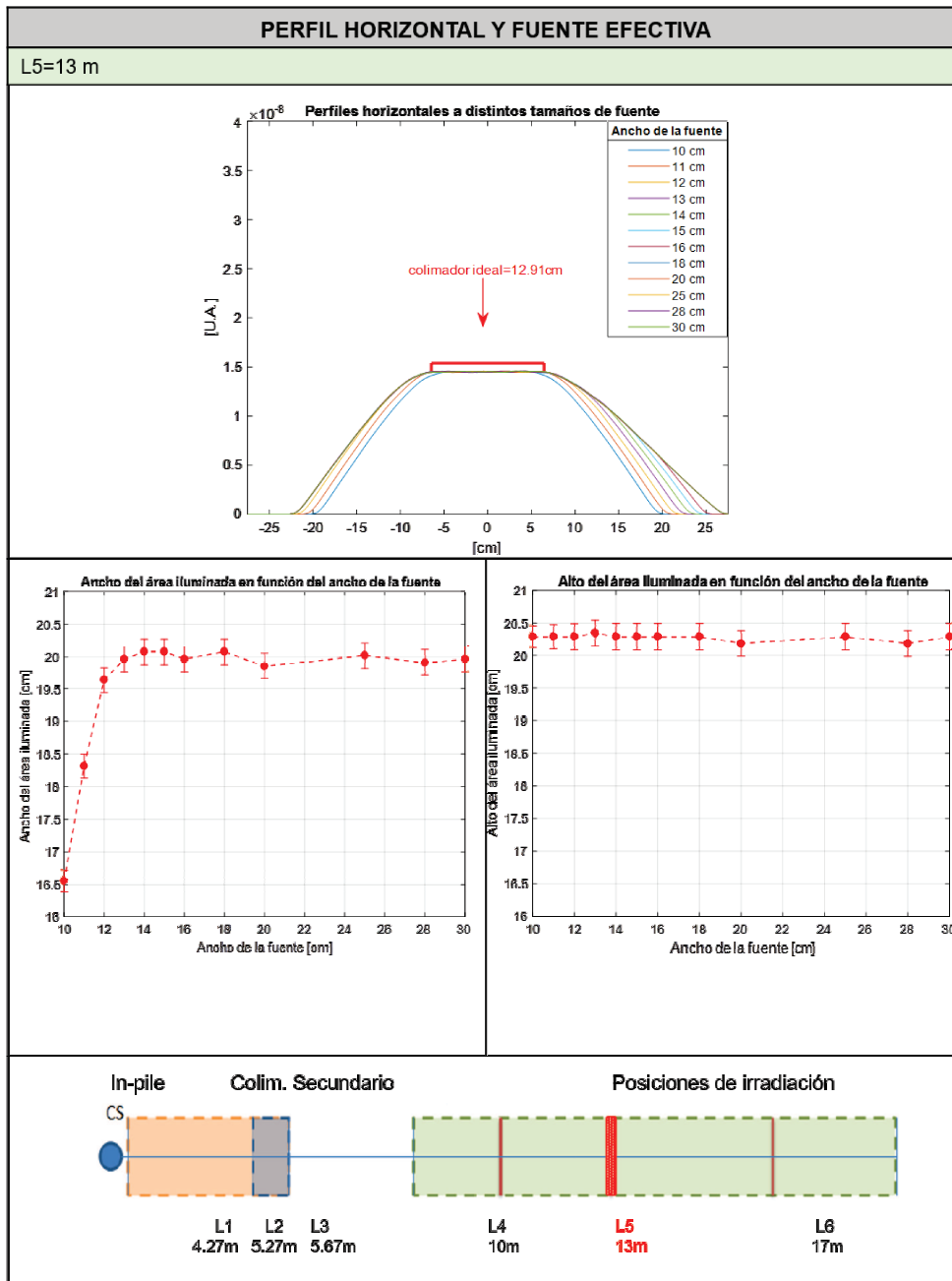


Figura B.3

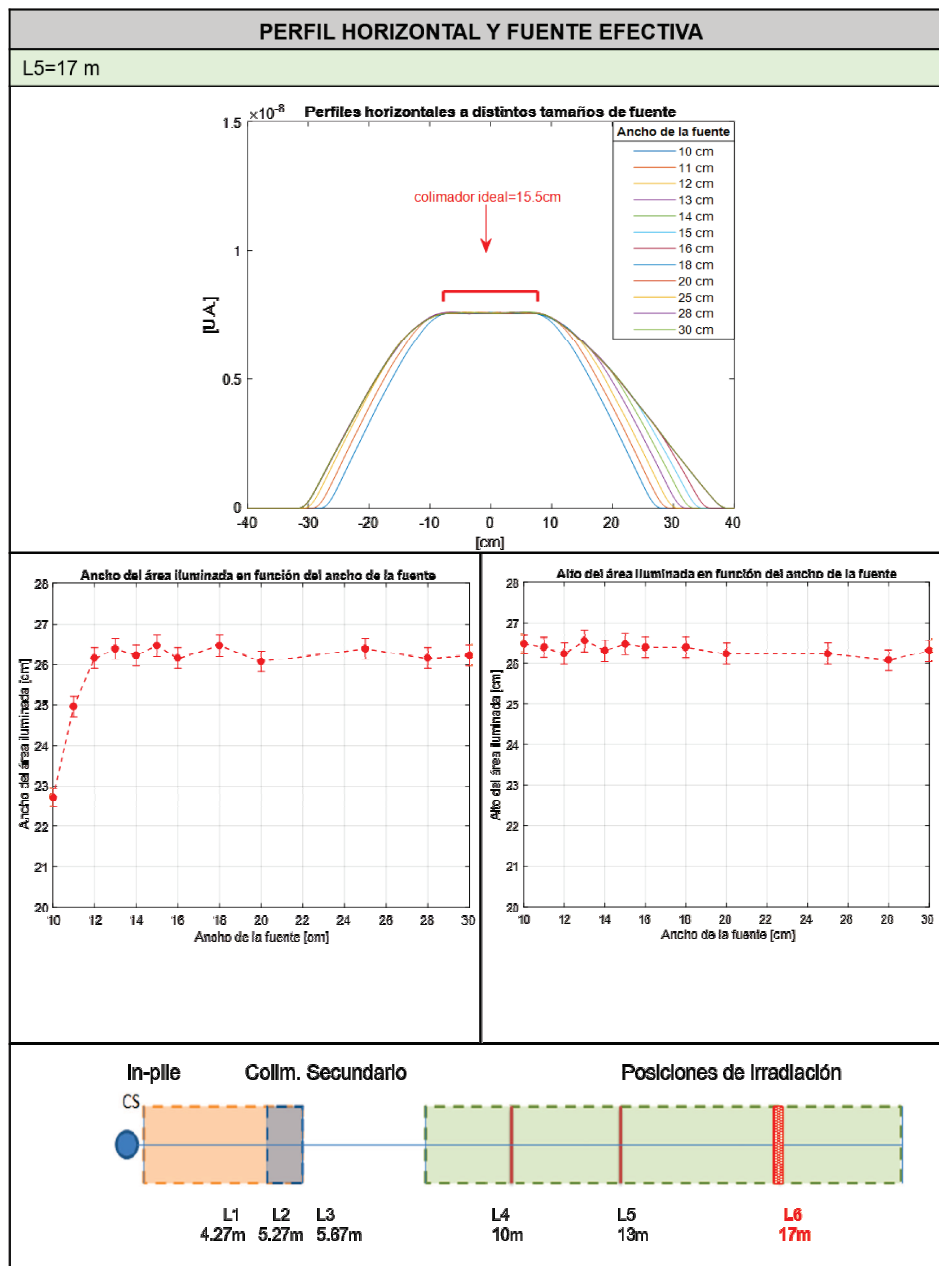


Figura B.4

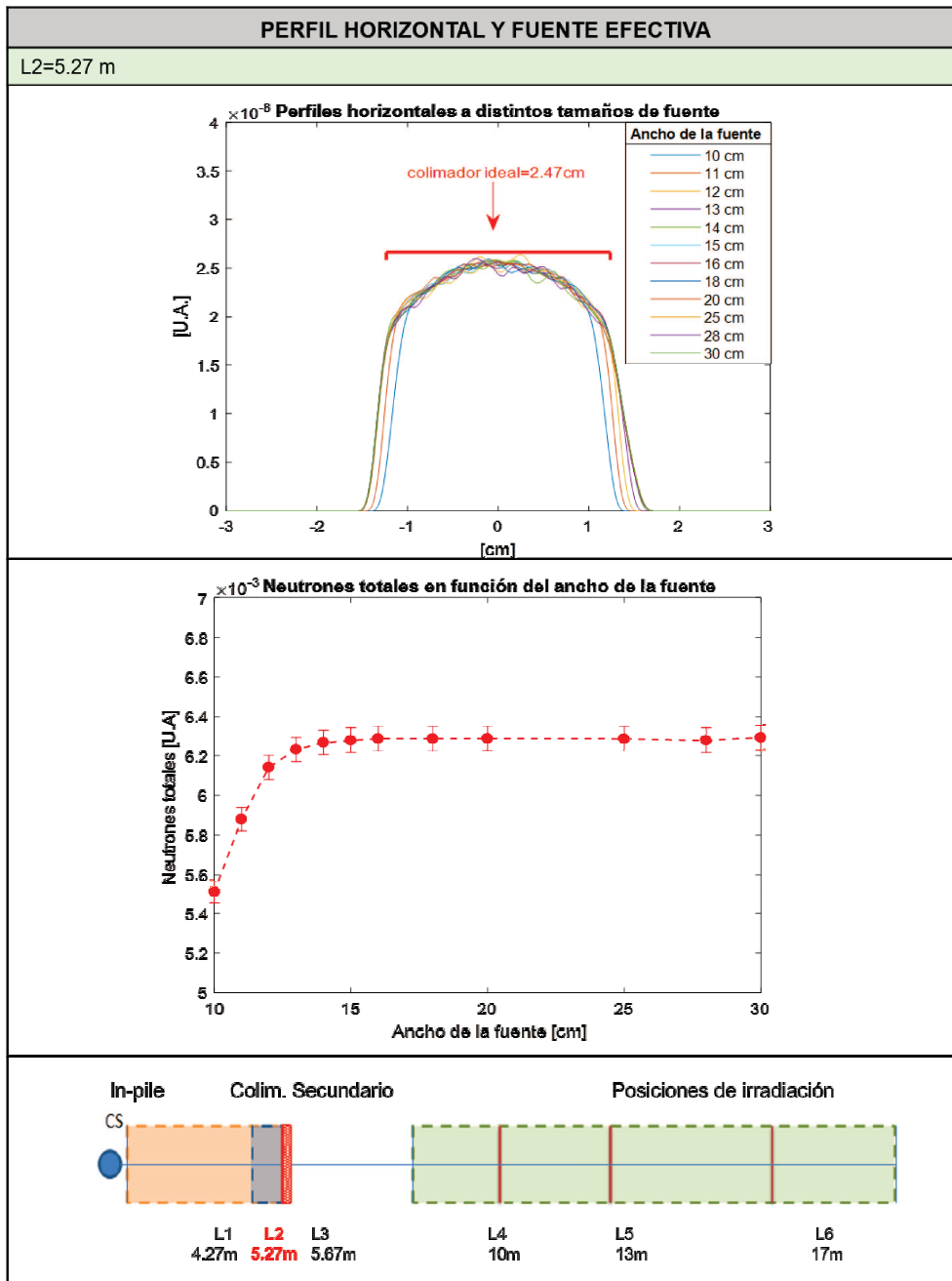


Figura B.5

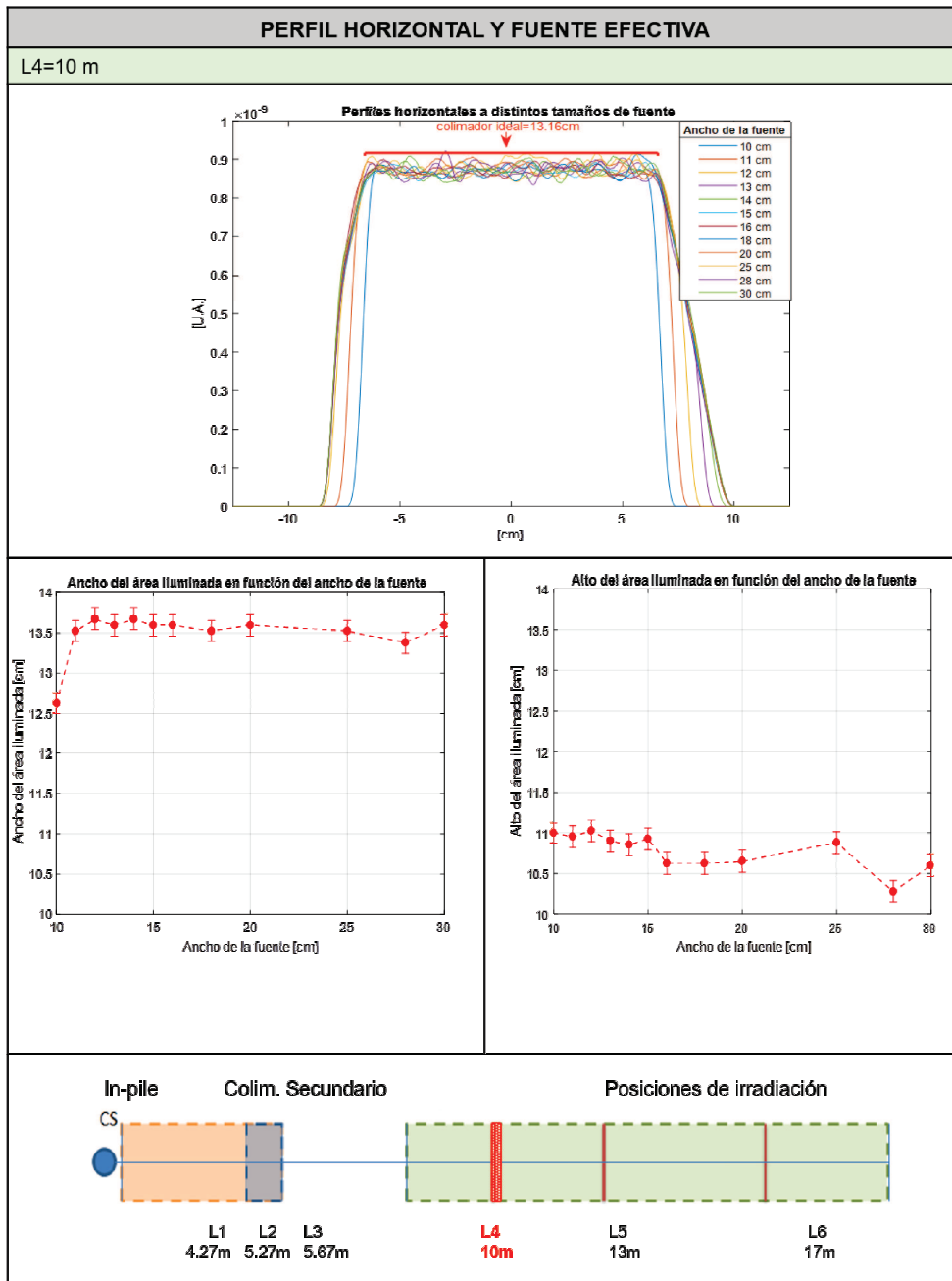


Figura B.6

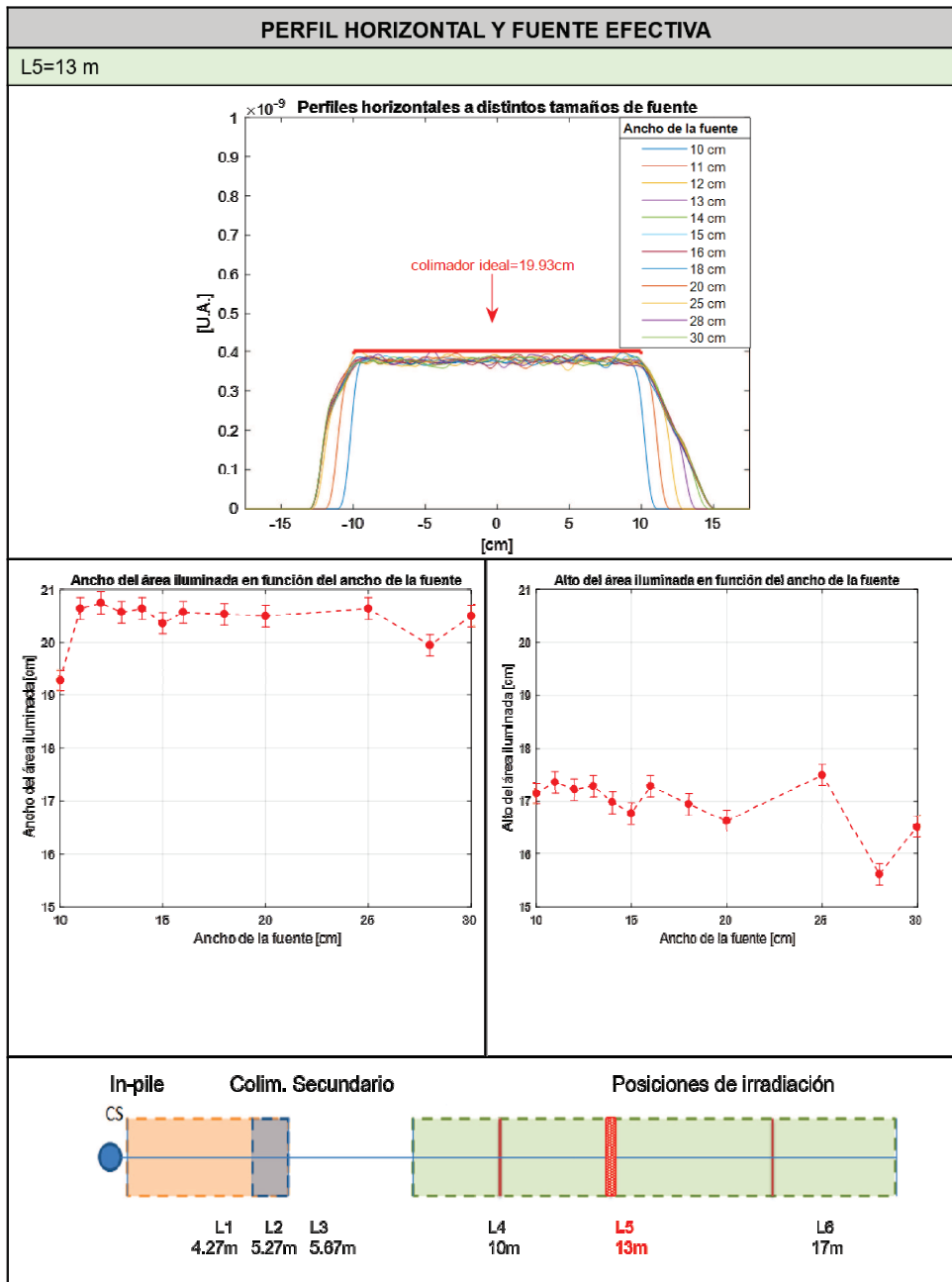


Figura B.7

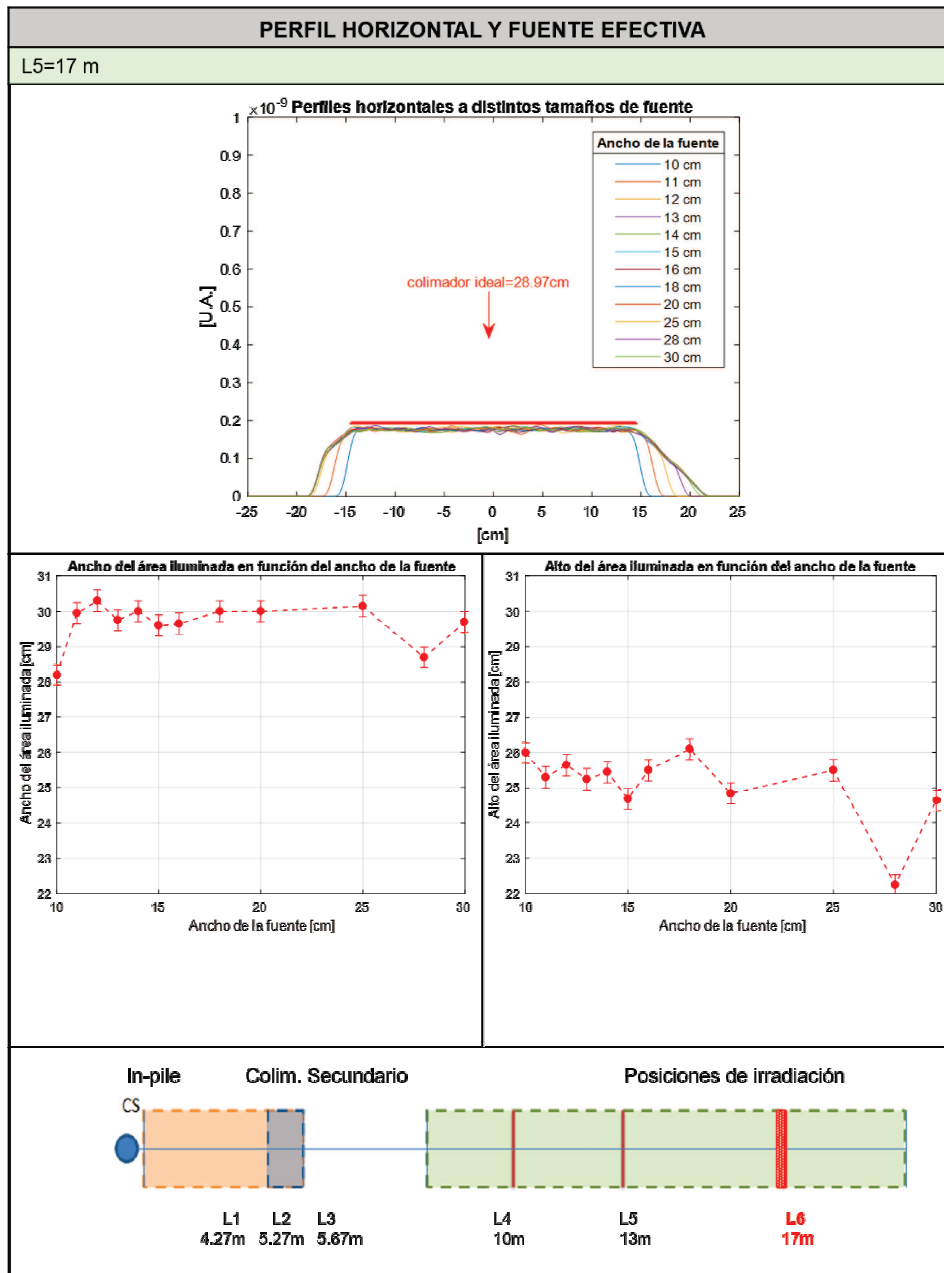


Figura B.8

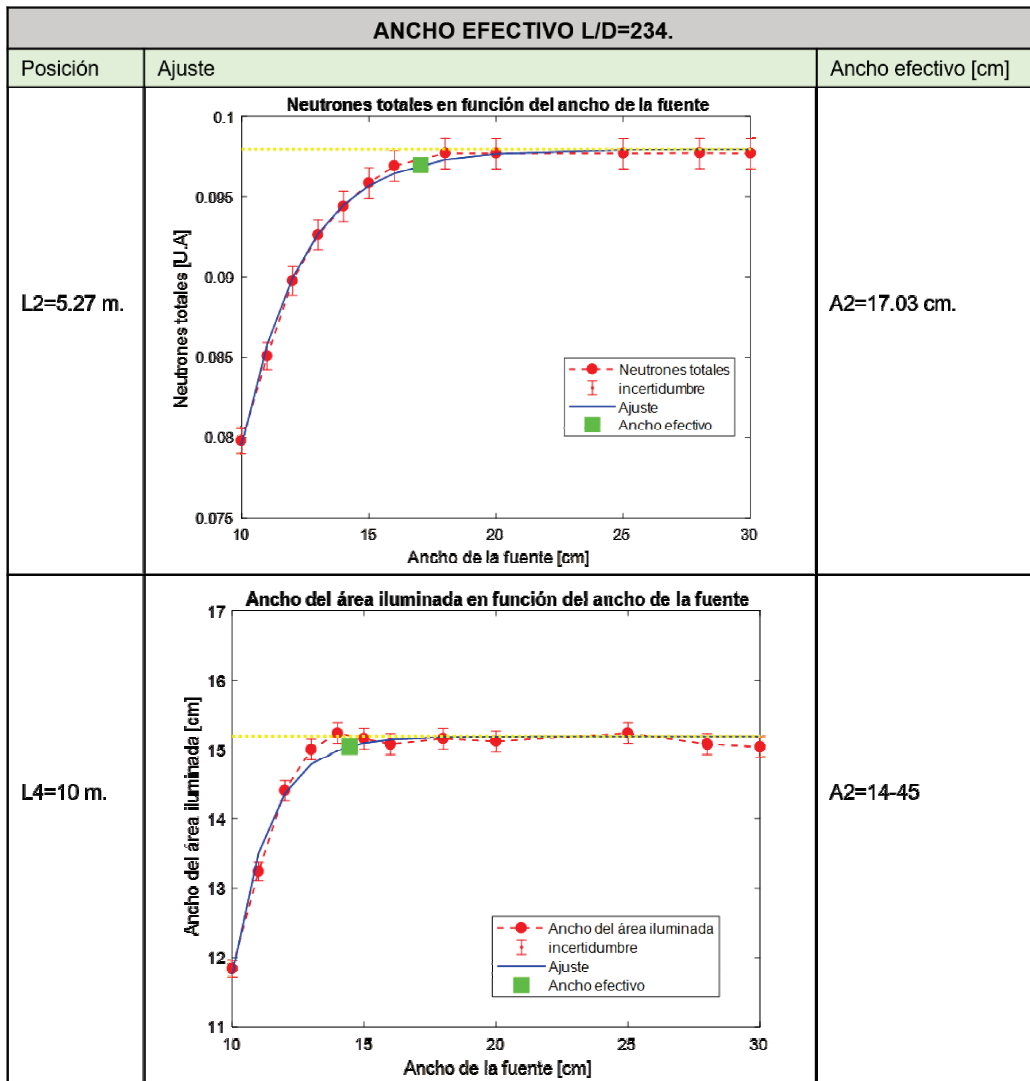


Figura B.9

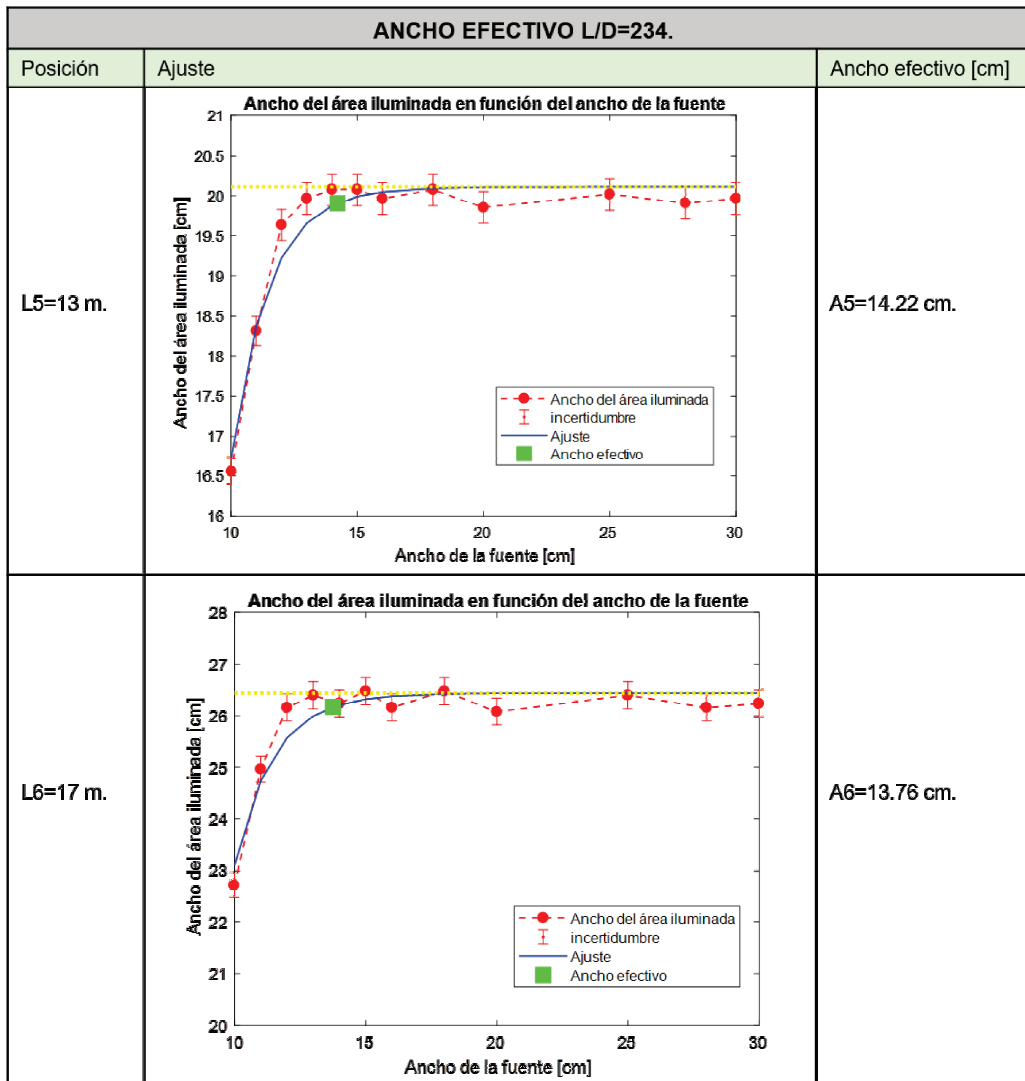


Figura B.10

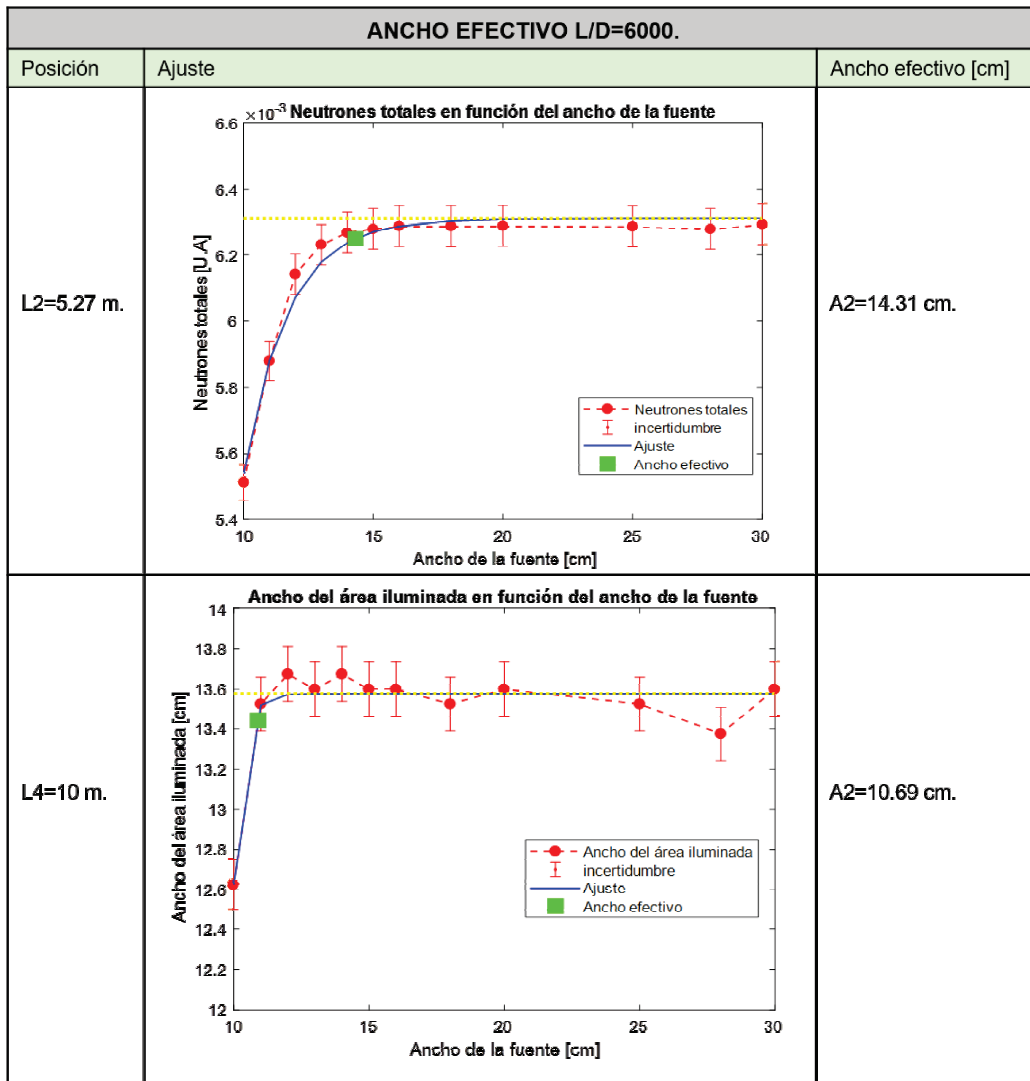


Figura B.11

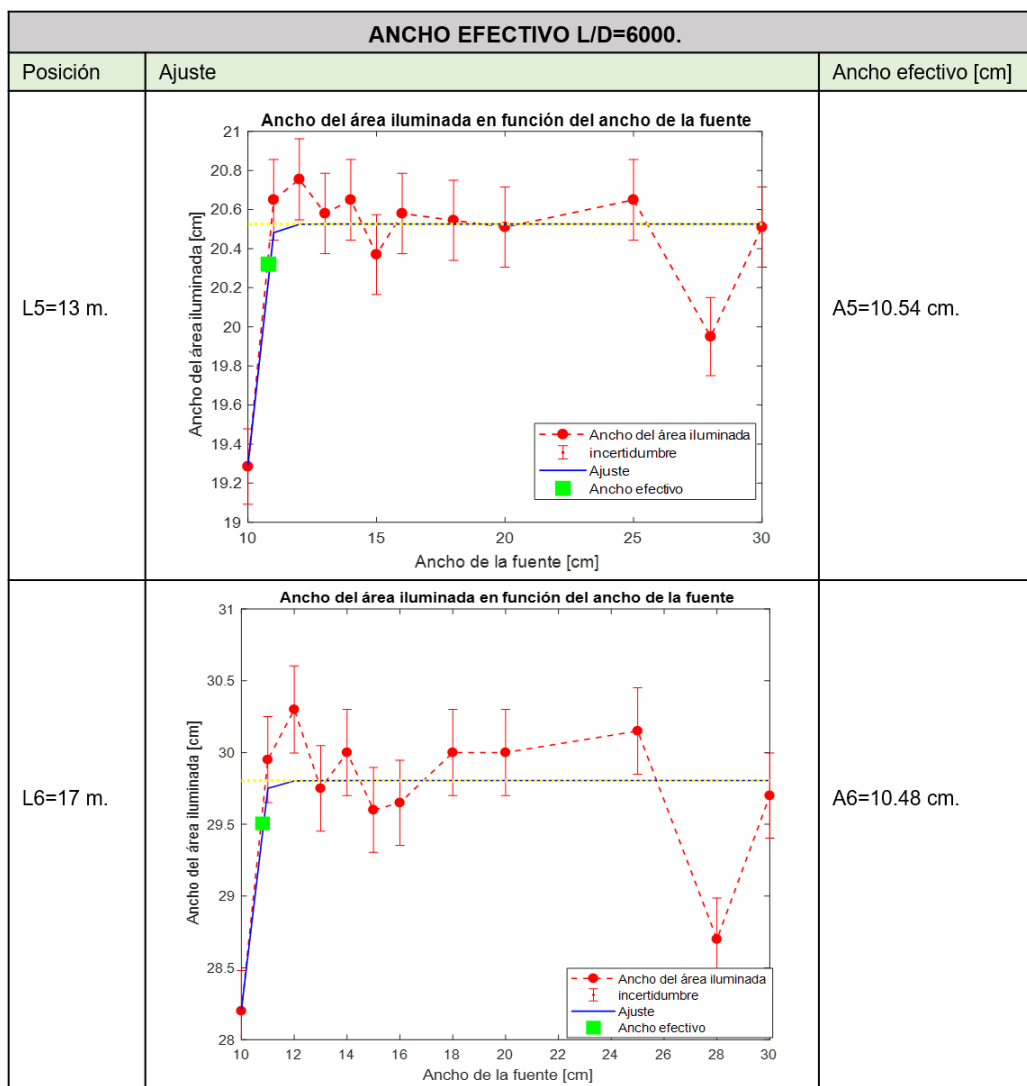


Figura B.12

Bibliografía

1. Sánchez, F. A. Cintas y H. Blaumann. RA-10: Argentinean Multipurpose Reactor. Neutron News 25, N.o 4 , (2 de octubre de 2014).
2. <https://www.ill.eu/reactor-and-safety/high-flux-reactor/technical-characteristics/>
3. <https://www.mlz-garching.de/englisch/neutron-research/neutron-source.html>
4. <http://www.ansto.gov.au/AboutANSTO/OPAL/index.htm>
5. Blaumann, H. "Reactor RA-10". Comisión Nacional de Energía Atómica X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica X Congreso Argentino de Protección Radiológica VI Congreso Iberoamericano de Sociedades de Protección Radiológica (Presentación)
6. Márquez, A. "Análisis de los haces de neutrones térmicos y fríos". CNEA, Informe Técnico IT-47/RA-10/ 6006-3-001 Rev. 1, (Marzo 2011)
7. <http://www.lahn.cnea.gov.ar/>
8. Tartaglione, A. "Conceptual desing and development plan for ASTOR" CNEA, Informe Técnico IN-LAHN-000N Rev. 0, (Marzo 2017-2014)
9. Banhart, J. Editor. "Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering. Monographs on the Physics and Chemistry of

-
- Materials” Oxford University Press, Oxford, New York (2008)
10. Domanus, J.C. Editor ”Practical neutron radiography”. Kluwer Academic Publishers (1992).
 11. <http://www.tritec-energy.com/>
 12. www.andor.com/
 13. Anderson, I. y Robert, L. ”Neutron Imaging and Applications” A Reference for the I
 14. Garbe, U.; Randall, Y. ; Hughes, C. ”The new neutron radiography/ tomography /imaging station DINGO at OPAL” Nucl. Instrum. Method Phys.(2011)
 15. Calzada et al. ”New design for the ANTARES II facility for neutron imaging at FRMII” (2009)
 16. Kaestner, A.P.; Hartmann, S.; Kühne, G.; Frei, G. ; Grünzweig, C.; Josic, L.; Schmid; F. y Lehmann, E.H. ”The ICON beamline-A facility for cold neutron imaging at SINQ”.
 17. <http://www.mlz-garching.de/antares>
 18. <https://www.nist.gov/pml/nif-facility-features>
 19. Kardijilov, N.; Hilger A.; Manke, I. ; Strobl, M. ; Dawson, M. ; Williams, S. y Banhart, J. ” Neutron tomography instrument CONRAD at HZB” Helmholtz Center, Berlín.
 20. Martín, J.; Sanchez, F. ; Blaumann H. ”Rediseño, construcción y caracterización de la nueva instalación de neurografía del RA-6” Centro Atómico Bariloche CNEA

-
21. Rogulich L., Bellino A. N., "Characterization of a Beam for its Use in Neutron Imaging at the RA-3 Reactor"
 22. "Diseño conceptual del tomógrafo de neutrones fríos para el RA-10" IN-LAHN- 001/0100
 23. Grünauer, F. "Tesis Design, optimization, and implementation of the new neutron radiography facility at FRM-II"
 24. Josic, L. "Cold neutron imaging near Bragg edges as a tool for material research"(2009)
 25. Josic, L. " Energy selective neutron imaging in solid state materials science" (2011).
 26. A.P. Kaestner et al. The ICON beamline "A facility for cold neutron imaging at SINQ"(2011)
 27. J.R.Granada, Z. Naturforsch.39a (1984).
 28. B. Hammouda, "Multidisk Neutron Velocity Selectors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A321, 275-283 (1992).
 29. Willendrup, P. Farhi, E., Knudsen E., Filges, U. y Lefmann, K. "Journal of Neutron Research" 17 (2014), p. 35.
 30. Lefmann, K. y Nielsen, K. "Neutron News "10/3 , 20, (1999).
 31. Willendrup, P., Farhi, E. y Lefmann, K., "Physica B", 350 (2004),
 32. MCNP4 "Monte Carlo Neutral Particle Transport Code System",
 33. Bazzana, S. "Obtención de fuentes de neutrones y fotones para los cálculos de tasas de dosis en ASTOR" IN-LAHN-034/0104

34. Selector de velocidades ASTRIUM