

# **PROYECTO INTEGRADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA NUCLEAR**

**DISEÑO Y PERFORMANCE DE LAS GUÍAS DE  
NEUTRONES FRÍOS PARA EL INSTRUMENTO SANS  
DEL LABORATORIO ARGENTINO DE HACES DE  
NEUTRONES DEL REACTOR RA-10.**

**Gastón Emanuel Cisterna**

Director:

**Javier Santisteban**

Co-Director:

**Ariel Marquéz**

Instituto Balseiro  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Universidad Nacional de Cuyo

Junio, 2020

*“THE WORLD IS NOT IN YOUR BOOKS AND MAPS. IT IS OUT THERE”.*

*Gandalf*

# Dedicatoria

Para mi abuelo, Oscar Felipe Cisterna, que siempre me recuerda: “*Usted es Cisterna*”.

# **Agradecimientos**

A mi familia y amigos, por ser incondicional conmigo.

# Resumen

El presente trabajo integrador se centró en la implementación de una cadena de cálculo asociada al haz de neutrones GF2 y ulterior haz GF2b del Reactor RA-10 para un instrumento SANS Multipropósitos. Se obtuvo información estadística de la distribución neutrónica de la corriente incidente al haz GF2 proveniente de la fuente fría del reactor mediante el empleo de fuentes de tracks. Con esta información se realizó una caracterización detallada de las distribuciones neutrónicas en distintas posiciones del haz GF2 y ulterior haz GF2b mediante el empleo de fuentes de distribuciones. Las distribuciones neutrónicas fueron obtenidas y analizadas mediante detectores colocados en distintos puntos de importancia en la extensión del haz. Se realizó una evaluación de la performance de 3 diseños de guías curvas del haz neutrónico frío GF2b para transportar neutrones hasta un instrumento SANS multipropósito a ser instalado en el Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones, tomando como modelo el instrumento V4 del Helmholtz Zentrum Berlin. Los criterios de la evaluación fueron: el desempeño neutrónico determinado por la intensidad de la corriente incidente en la muestra en el instrumento SANS para distintas configuraciones de uso, el costo de la guía y finalmente aspectos geométricos determinados fundamentalmente por la distancia de separación resultante entre las guías curvas GF2a y GF2b, al final de las mismas. Se concluyó que un diseño basado en un guía curva con  $m=1$  en todas sus paredes y un radio de curvatura de 929 m es la opción más adecuada de la consideradas por el proyecto LAHN.

# Abstract

The present integrative work focused on the implementation of a calculation chain associated with the GF2 neutron beam and subsequent GF2b beam of the RA-10 Reactor for a multipurpose SANS instrument. Statistical information on the neutron distribution of the incident current to the GF2 beam from the cold source of the reactor was obtained using track sources. With this information, a detailed characterization of the neutron distributions in different positions of the GF2 beam and subsequent GF2b beam was carried out using distribution sources. Neutron distributions were obtained and analyzed by detectors placed at different points of importance in the beam extension. A performance evaluation of 3 curved guide designs of the GF2b cold neutron beam was carried out to transport neutrons to a multipurpose SANS instrument to be installed in the Argentine Laboratory of Neutron Beams, taking as a model the V4 instrument of the Helmholtz Zentrum Berlin. The evaluation criteria were: the neutron performance determined by the intensity of the incident current in the sample in the SANS instrument for different configurations of use, the cost of the guide and finally geometric aspects determined fundamentally by the resulting separation distance between the curved guides GF2a and GF2b, at the end of them. It was concluded that a design based on a curved guide with  $m = 1$  in all its walls and a radius of curvature of 929 m is the most appropriate option considered by the LAHN project.

# Glosario

- **HAZ:** Cada una de las líneas de utilización de neutrones.
- **HAZ FRÍO:** Haz que emerge de la fuente fría del reactor.
- **HAZ TÉRMICO:** Haz que emerge del moderador de agua pesada del reactor.
- **ESPEJO DE NEUTRONES:** Material o superposición de materiales en forma de films delgados, que permite la reflexión especular de neutrones que inciden sobre su superficie con determinadas combinaciones energía-ángulo.
- **GUÍA DE NEUTRONES:** Conducto de sección rectangular en cuyas caras internas se alojan los espejos de neutrones.
- **CONDUCTO DE EXTRACCIÓN:** Conducto lleno de helio instalado dentro del tanque del reflector con el fin de comunicar ópticamente las fuentes de neutrones con las diversas guías y colimadores que conducen los neutrones hacia los puntos de utilización.

# Abreviaturas

- **HG:** Hall de guías del reactor.
- **CR:** Cara del reactor.
- **GT:** Haz térmico (las siglas provienen de “guía térmica”, sin embargo no todos los haces poseen guías y aun así se adopta la denominación GT).
- **GF:** Haz frío (las siglas provienen de “guía fría”, sin embargo no todos los haces poseen guías y aun así se adopta la denominación GF).
- **In-pile:** Dentro del blindaje biológico. Si se habla de una guía in-pile, se hace referencia a una guía que está ubicada dentro del blindaje biológico.
- **Out-of-pile:** Fuera del blindaje biológico.
- **Shutter:** Obturador giratorio que actúa como blindaje para cerrar los haces.
- **HZB:** Helmholtz-Zentrum Berlin
- **RA-10:** Reactor Argentino Número 10
- $\mu = \cos \theta$ .

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Reactor RA-10 . . . . .	1
1.2	Fuente fría, térmica y haces del reactor RA-10 . . . . .	2
1.3	LAHN: Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones . . . . .	4
1.4	Objetivos . . . . .	6
1.5	Guías de neutrones . . . . .	6
1.5.1	Definición y calidad de guías . . . . .	6
1.5.2	Guías de neutrones con curvatura: tipos de reflexiones. . . . .	9
1.6	McStas . . . . .	10
1.7	MCNP vs McStas . . . . .	13
1.8	Reactor BER II . . . . .	14
1.9	Small-angle neutron scattering (SANS) . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Herramientas de cálculo</b>	<b>19</b>
2.1	Implementación en Mcstas . . . . .	19
2.2	Fuentes de tracks . . . . .	20
2.3	Fuentes de distribuciones . . . . .	21
2.3.1	EPA Detector . . . . .	22
2.3.2	Source Builder . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Cálculos de magnitudes</b>	<b>26</b>
3.1	Cálculo de magnitudes integrales . . . . .	26
3.1.1	Cálculo de la corriente total $J_T^+$ cuando se utiliza únicamente la fuente de tracks . . . . .	27
3.1.2	Cálculo de la corriente total $J_T^+$ cuando se utiliza la fuente de distribución . . . . .	27
3.2	Cálculo de las magnitudes de distribución . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Descripción del haz neutrónico GF2</b>	<b>32</b>
4.1	Generalidades . . . . .	32
4.2	GF2: In Pile . . . . .	33

4.3	GF2: Out of Pile . . . . .	36
4.3.1	GF2b: Guía Curva . . . . .	37
4.3.2	The Small Angle Scattering Instrument (SANS) . . . . .	38
4.4	Descripción de las posiciones de los detectores . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Resultados In pile</b>	<b>43</b>
5.1	Fuente de tracks vs Fuente de Distribuciones . . . . .	43
5.1.1	Análisis de $\phi$ en la posición POS 0 . . . . .	46
5.2	Guia GF2: In Pile . . . . .	47
5.2.1	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 1 . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Resultados Out of Pile</b>	<b>52</b>
6.1	Guía Curva Out of Pile: Diseño I . . . . .	52
6.1.1	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 2 . . . . .	56
6.1.2	Análisis de la variable $\mu$ y $E$ . . . . .	57
6.2	Análisis en el instrumento SANS: diseño I . . . . .	63
6.2.1	Análisis en la posición POS 3 . . . . .	63
6.2.2	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 3 . . . . .	64
6.2.3	Análisis en la posición POS 4 . . . . .	64
6.2.4	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 4 . . . . .	68
6.3	Guía Curva Out of Pile: Diseño II . . . . .	69
6.3.1	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 2 . . . . .	74
6.3.2	Análisis en la posición POS 4 . . . . .	76
6.3.3	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 4 . . . . .	77
6.4	Guía curva Out of Pile: Diseño III . . . . .	78
6.4.1	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 2 . . . . .	82
6.4.2	Análisis en la posición POS 4 . . . . .	83
6.4.3	Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 4 . . . . .	84
6.5	Discusión de los resultados de los 3 diseños analizados . . . . .	85
<b>7</b>	<b>Trabajo complementario: simulación de experimento en el instrumento SANS.</b>	<b>88</b>
7.1	Resultados esperados . . . . .	88
7.2	PARTE A . . . . .	89
7.2.1	Presentación de los resultados . . . . .	90
7.2.2	Discusión de los resultados . . . . .	92
7.3	PARTE B . . . . .	92
7.3.1	Presentación de los de los resultados . . . . .	93
7.3.2	Análisis de los de los resultados . . . . .	94

<b>8 Conclusiones</b>	<b>96</b>
<b>Bibliografía y Referencias</b>	<b>97</b>
<b>Apéndices</b>	<b>100</b>
<b>A Error estadístico en McStas</b>	<b>100</b>

# Índice de tablas

Tabla 1.2.1	Denominación de los haces y características principales . . . . .	3
Tabla 3.2.1	Descripción de magnitudes fundamentales que serán empleadas a lo largo del trabajo. . . . .	31
Tabla 4.2.1	Longitudes y aberturas de las secciones de guía de neutrones fríos de GF2 In Pile . . . . .	36
Tabla 4.3.1	Longitudes y aberturas de las secciones de guía de neutrones fríos de GF2 In Pile . . . . .	37
Tabla 5.1.1	Corriente total $J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2.s} \right]$ en distintas posiciones calculada con la fuente de tracks y la fuente de distribuciones. Se presenta también el error porcentual y la relación F definida anteriormente. . . . .	46
Tabla 6.1.1	Datos integrales obtenidos en la posición POS 2 para el diseño I. Se ha calculado la corriente total, el valor del intervalo de divergencia en el cual la intensidad es máxima y finalmente el valor del intervalo de energía en el cual la intensidad es máxima. . . . .	52
Tabla 6.2.1	Características de las configuraciones realizadas en el selector de velocidades para la obtención de los resultados de la Figura 6.2.1 . . .	63
Tabla 6.3.1	Datos integrales obtenidos en la posición POS 2 para el diseño II. Se ha calculado la corriente total, el valor del intervalo de divergencia y el valor del intervalo de energía en el cual la intensidad es máxima. . .	70
Tabla 6.4.1	Datos integrales obtenidos en la posición POS 2 para el diseño III. Se ha calculado la corriente total, el valor del intervalo de divergencia en el cual la intensidad es máxima y finalmente el valor del intervalo de energía en el cual la intensidad es máxima. . . . .	78
Tabla 7.3.1	Intensidades de las distintas configuraciones experimentales registradas en el detector. . . . .	93

# Índice de figuras

Figura 1.1.1	Reactor nuclear RA-10 . . . . .	2
Figura 1.2.1	Corte superior de reactor RA-10. Se observan los haces neutrónicos que fueron descriptos en la Tabla 1.2.1 . . . . .	4
Figura 1.3.1	Vista de las instalaciones del Proyecto RA-10 y LAHN. En el hall del reactor están dos instrumentos. El resto se encuentra en el hall de guías.	5
Figura 1.5.1	Guía de neutrones del fabricante SwissNeutronics [1] . . . . .	7
Figura 1.5.2	Diagrama de reflectividad (en %) en función de “ $m$ ” para espejos de $m_C=2,3,4,5$ . . . . .	9
Figura 1.5.3	Tipos de reflexiones del neutrón en guías curvas. . . . .	10
Figura 1.6.1	Ilustración de la estructura de McStas. . . . .	12
Figura 1.6.2	Instrumento típico de McStas. . . . .	12
Figura 1.6.3	Sistema de coordenadas de McStas y variables representativas. . . . .	13
Figura 1.7.1	Sistema de coordenadas de MCNP. . . . .	14
Figura 1.8.1	Sección transversal horizontal del núcleo con elementos combustibles (negro), berilio (verde y magenta), extremos de los canales de irradiación (rosa claro) . . . . .	15
Figura 1.8.2	Sección horizontal en el plano con 7 de los 9 haces y la fuente de neutrones fríos dentro del tubo cónico con dos haces . . . . .	16
Figura 1.9.1	Esquema de un instrumento de dispersión de neutrones de ángulo pequeño. Los neutrones pasan de izquierda a derecha. El rayo incidente es monocromado y colimado antes de que llegue a la muestra. La intensidad de neutrones dispersos se detecta en función del ángulo de dispersión. . . . .	17
Figura 2.2.1	Representación esquemática de la geometría que se modeló en MCNP. . . . .	20
Figura 2.2.2	Representación esquemática de la función que cumple el componente Ptracks. . . . .	20
Figura 2.3.1	Representación esquemática de la arquitectura del detector del ejemplo . . . . .	23
Figura 2.3.2	Detalle de los 6 detectores confeccionados dentro del componente EPA Detector . . . . .	24

Figura 3.2.1	El eje de las abscisas presenta el promedio de los límites inferior y superior de cada micro grupo de $\phi$ . . . . .	30
Figura 4.1.1	Esquema del tanque reflector y núcleo del RA-10. . . . .	32
Figura 4.1.2	Sistema de coordenadas intrínseco a la guía. . . . .	33
Figura 4.2.1	Ubicación del haz GF2 . . . . .	34
Figura 4.2.2	Haces In Pile térmicos (GT1, GT2) y fríos (GF1a, GF1b, GF2a, GF2b). . . . .	35
Figura 4.2.3	Vista detallada de una sección In Pile . . . . .	35
Figura 4.2.4	Esquema de las guías de neutrones . . . . .	36
Figura 4.3.1	Construcción de guía de neutrones dividida. . . . .	37
Figura 4.3.2	Sistema colimador. Cuatro elementos de tambor giratorios independientes con conexiones herméticas al vacío que contienen guías y aberturas de neutrones, que producen 6 distancias de colimación entre 1 m y 16 m, o proporcionan una lámpara y un láser para el posicionamiento de la muestra. . . . .	40
Figura 4.3.3	Modelo a escala del instrumento V4 SANS Multipropósito que se instalará en Argentina. . . . .	40
Figura 4.3.4	Haz neutrónico simulado. La simulación comienza en el inicio de la guía In Pile, hasta el detector del instrumento SANS Multipropósito. . . . .	41
Figura 4.4.1	Diagrama general de todo el haz que alimenta al instrumento SANS simulado en McStas. Desde la posición POS 0 en la entrada de la guía in pile hasta la posición POS 5, en el detector del instrumento SANS. Se observa la guía curva (cuya radio de curvatura se ha dibujado exagerado). La guía será simulada con las dimensiones de los diseños descriptos.	42
Figura 5.1.1	Distribución angular en $\phi$ al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. En verde, la fuente de distribuciones. En azul, la fuente de tracks. . . . .	44
Figura 5.1.2	Factor de mérito $F$ calculado con todos los puntos de la distribución angular en $\phi$ al inicio de la guía GF2. . . . .	44
Figura 5.1.3	Distribución angular en $\mu$ al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. En verde, la fuente de distribuciones. En azul, la fuente de tracks. . . . .	44
Figura 5.1.4	Distribución espacial al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. A la derecha, la fuente de distribuciones. A la izquierda, la fuente de tracks. . . . .	45
Figura 5.1.5	Distribución espectral al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. En verde, la fuente de distribuciones. En azul, la fuente de tracks. . . . .	45
Figura 5.1.6	Representación esquemática de la posición de la entrada de la guía GF2 y la posición donde fue grabada la fuente de tracks, en la entrada de los tubos de vuelo. . . . .	47

Figura 5.2.1	Esquema de la división de la guía GF2 en dos guías: GF2a y GF2b. Se observa además detector en azul ubicado en la posición POS 1. El detector se encuentra referenciado en el sistema de coordenadas de color verde. . . . .	48
Figura 5.2.2	Distribución neutrónica en $\phi$ en la posición POS 1 . . . . .	48
Figura 5.2.3	Distribución neutrónica en $\mu$ en la posición POS 1 . . . . .	49
Figura 5.2.4	Distribución neutrónica espacial en la posición POS 1 . . . . .	49
Figura 5.2.5	Distribución neutrónicapectral en la posición POS 1. A la izquierda se muestra el espectro hasta 20 meV. A la derecha se muestra el espectro hasta 150 meV. . . . .	50
Figura 5.2.6	Discretización de la intensidad $I$ en función del cambio en la componente normal del impulso del neutrón $Q$ calculada en la posición POS 1. Todos las discretizaciones de $Q$ presentan el mismo ancho $\Delta Q$ , con el fin de poder comparar las intensidades. . . . .	51
Figura 5.2.7	Discretización de la intensidad $I$ en función del parámetro adimensional $m$ . Todos las discretizaciones de $m$ presentan el mismo ancho $\Delta m$ , con el fin de poder comparar las intensidades. . . . .	51
Figura 6.1.1	Distribución angular en $\phi$ en la posición POS 2, a la salida de la guía curva. . . . .	53
Figura 6.1.2	Distribución angular en $\mu$ en la posición POS 2, a la salida de la guía curva. . . . .	54
Figura 6.1.3	Distribución espacial en la posición POS 2, a la salida de la guía curva. . . . .	55
Figura 6.1.4	Distribución espectral en la posición POS 2, a la salida de la guía curva. . . . .	55
Figura 6.1.5	Discretización de la intensidad $I$ en función del cambio en la componente normal del impulso del neutrón $Q$ calculada en la posición POS 2. Todos las discretizaciones de $Q$ presentan el mismo ancho $\Delta Q$ , con el fin de poder comparar las intensidades. . . . .	56
Figura 6.1.6	Discretización de la intensidad $I$ en función del cambio en la componente normal del impulso del neutrón $m$ calculada en la posición POS 2. Todos las discretizaciones de $m$ presentan el mismo ancho $\Delta m$ , con el fin de poder comparar las intensidades. . . . .	57
Figura 6.1.7	Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía. . . . .	58
Figura 6.1.8	Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía.(Continuación. Zoom 1) . . . . .	59
Figura 6.1.9	Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía.(Continuación. Zoom 2) . . . . .	59
Figura 6.1.10	Espectro de neutrones para distintos grupos de $\mu$ . . . . .	60

Figura 6.1.11	Espectro de neutrones para distintos grupos de $\mu$ .(Continuación. Zoom 1) . . . . .	60
Figura 6.1.12	Espectro de neutrones para distintos grupos de $\mu$ .(Continuación. Zoom 2) . . . . .	61
Figura 6.1.13	Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía. Bajas energías. . . . .	62
Figura 6.1.14	Espectro de neutrones para distintos grupos de $\mu$ . Baja divergencia. . . . .	63
Figura 6.2.1	Distribuciones neutrónicas en $\lambda$ obtenidas en la posición POS 3, es decir inmediatamente después del selector de velocidades, para distintas configuraciones del mismo. . . . .	64
Figura 6.2.2	Distribución en $\mu$ en la posición POS 4, con el selector de velocidades configurados para las energías mostradas y una colimación nula en el instrumento SANS. . . . .	65
Figura 6.2.3	Distribución en $\mu$ en la posición POS 4, con el selector de velocidades configurados para las energías mostradas y una colimación de 16 metros en el instrumento SANS. . . . .	66
Figura 6.2.4	Corriente neutrónica medida en V4 en el reactor BER-II para distintas configuraciones de colimación y del selector de velocidades[2] . . . . .	67
Figura 6.2.5	Corriente neutrónica total obtenida en la posición POS 4 para distintas longitudes de onda $\lambda$ seleccionadas mediante el selector de velocidades y distintas configuraciones de colimación. . . . .	68
Figura 6.3.1	Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 1. . . . .	71
Figura 6.3.2	Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 2. . . . .	72
Figura 6.3.3	Distribuciones en $\mu$ normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 1. . . . .	72
Figura 6.3.4	Distribuciones en $\mu$ normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 2. . . . .	73
Figura 6.3.5	Distribuciones en $\mu$ del diseño II y I normalizadas. Se aprecia la divergencia de neutrones para distintos grupos de energía. . . . .	73
Figura 6.3.6	Distribuciones espectrales del diseño II y I normalizadas para distintos macro grupos de $\mu$ . . . . .	74
Figura 6.3.7	Corriente neutrónica total obtenida en la posición POS 4 para distintas longitudes de onda $\lambda$ seleccionadas mediante el selector de velocidades y distintas configuraciones de colimación. Los resultados visualizados corresponden al diseño I, diseño II y digitalizados obtenidos por Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB). . . . .	76

Figura 6.4.1	Distribuciones en $\mu$ normalizadas calculadas con el diseño III y I. Se ha utilizado la normalización 2. . . . .	79
Figura 6.4.2	Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño III y I. Se ha utilizado la normalización 2. . . . .	80
Figura 6.4.3	Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño III y I para distintos grupos de $\mu$ . Se ha utilizado la normalización 2. . . . .	81
Figura 6.4.4	Distribuciones en $\mu$ normalizadas calculadas con el diseño III y I para distintos grupos de E. Se ha utilizado la normalización 2. . . . .	82
Figura 6.4.5	Diagrama que intenta explicar el aumento de la corriente del diseño III con respecto al diseño I para la posición POS 2. El ángulo $\theta$ existente entre la tangente al punto donde colisiona el neutrón y el rayo incidente descripto por el mismo es menor para la guía con menor radio de curvatura. . . . .	83
Figura 6.4.6	Corriente neutrónica total obtenida en la posición POS 4 para distintas longitudes de onda $\lambda$ seleccionadas mediante el selector de velocidades y distintas configuraciones de colimación. Los resultados visualizados corresponden al diseño I, diseño III y digitalizados obtenidos por <i>Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)</i> . . . . .	84
Figura 7.1.1	Intensidad $I$ vs $x$ para distintas muestras monodispersas de radios distintos. . . . .	89
Figura 7.2.1	Configuración experimental. Parte A. . . . .	90
Figura 7.2.2	Distribución espacial en el detector. . . . .	91
Figura 7.2.3	Divergencia resultante luego de la muestra SANS. . . . .	91
Figura 7.3.1	Configuración experimental. Parte B. . . . .	93
Figura 7.3.2	Distribuciones en $\mu$ normalizadas resultantes de la dispersión de neutrones en las dos muestras monodispersas de radios distintos con las configuraciones de colimación descriptas. . . . .	94

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

### **1.1. Reactor RA-10**

La CNEA inició en el año 2010 la ejecución del proyecto de diseño, construcción y puesta en marcha del reactor nuclear multipropósito RA-10, cuyas principales funciones serán la producción de radiofármacos para uso medicinal, la investigación científica y las aplicaciones industriales. El sitio de emplazamiento será el Centro Atómico Ezeiza.

Este reactor es de tipo piletta y presenta las siguientes características: potencia nominal 30 MW, agua liviana como moderador y refrigerante en caudal ascendente, y agua pesada como reflector. El núcleo es de diseño compacto y posee 19 elementos combustibles dispuestos en una grilla de 5x5. Las posiciones restantes están ocupadas por facilidades de irradiación in-core. El combustible es de tipo MTR, posee 21 placas planas de aluminio con meat de silicio de Urano y 20 alambres de cadmio como venenos quemables. El reactor se opera con 6 barras de control de Hafnio. En la Figura 1.1.1 puede apreciarse un corte transversal horizontal del mismo.

El reactor cuenta con diversas facilidades, las cuales se clasifican según sean internas al núcleo (4 posiciones de irradiación con espectro de reactor y 2 con espectro térmico) o externas (aquellas insertadas en el reflector de agua pesada circundante). Entre estas últimas se encuentran:

- Dopaje de Silicio.
- Producción de Molibdeno-99 y otros radioisótopos.
- Loop de irradiación de elementos combustibles.
- Posiciones de irradiación con intercambiador neumático.
- Haz de neutrografía in-pool.

- Fuente fría de neutrones.
- Haces fríos y térmicos.

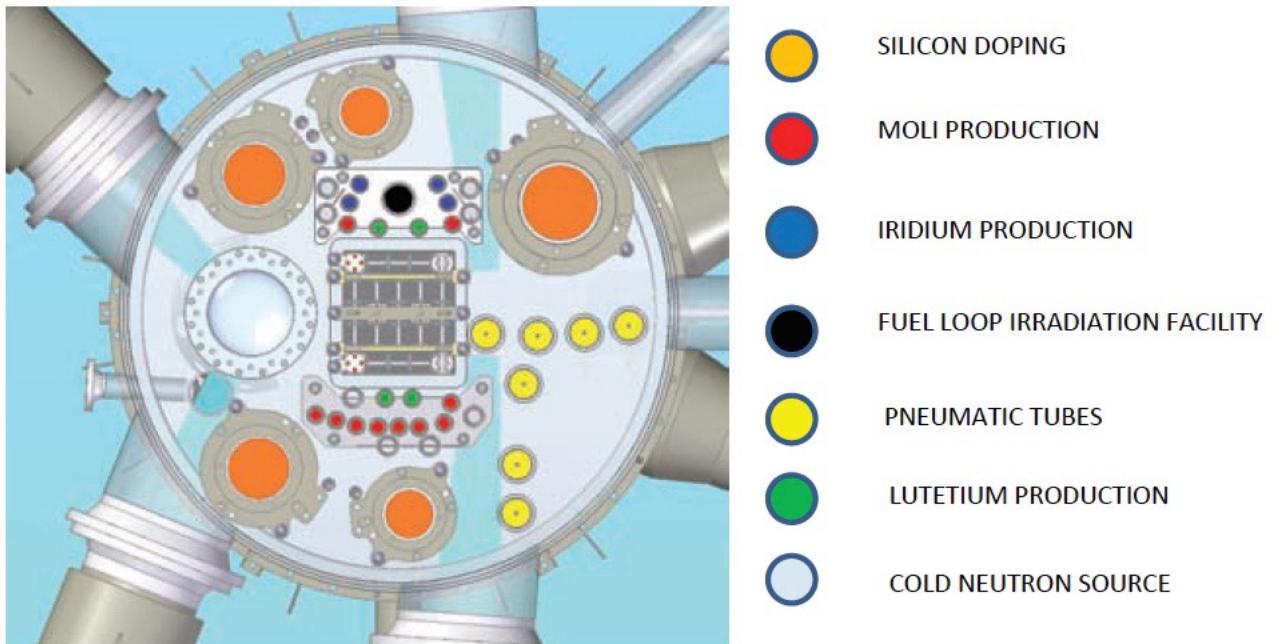


Figura 1.1.1: Reactor nuclear RA-10

## 1.2. Fuente fría, térmica y haces del reactor RA-10

Un haz de neutrones es una corriente neutrónica de baja divergencia, esta es encausada mediante un conducto a fin de lograr transportar los neutrones para su posterior utilización en experimentos. El reactor RA-10 posee una fuente fría y una fuente térmica para la provisión de un amplio espectro de neutrones a ser utilizados en dichos haces.

La fuente fría consiste en un moderador de deuterio líquido a 23 K que “enfría” el espectro de neutrones. Los neutrones provenientes del reflector sufren colisiones con el moderador frío, y como consecuencia, algunos de ellos emergen del evento de scattering con energías y direcciones deseables, que permiten su extracción a través de dos conductos.

La fuente térmica corresponde a una posición dentro del tanque del reflector ubicada aproximadamente a 10 cm del núcleo, donde los neutrones moderados producen picos térmicos cuyo espectro es maxwelliano con  $kT = 27 \text{ meV}$ . Cercano a uno de estos picos térmicos se colocan dos conductos de extracción.

Los conductos de extracción son compartimentos cuyas paredes son de zircaloy y están llenos

de helio. Estos poseen una sección transversal vertical rectangular donde su ancho aumenta a medida que se incrementa la distancia con respecto a la fuente, como puede apreciarse en la Figura 1.2.1. A diferencia del ancho variable, la altura de dichos conductos permanece constante a lo largo de los mismos. Estos permiten que los neutrones viajen con muy baja probabilidad de colisión desde su entrada hasta su salida. Luego, los neutrones siguen su trayectoria a través de tubos de vuelo que se insertan en el tanque de agua liviana, que comunican la salida de los conductos de extracción con la entrada a las guías y colimadores.

El reactor cuenta con ocho haces de neutrones, cuatro fríos (GF1, GF2, GF3 y GF4) y cuatro térmicos (GT1, GT2, GT3 y GT4). Dos haces térmicos (GT3 y GT4) y dos haces fríos (GF3 y GF4) están destinados a su uso en el hall del reactor (sobre la cara del reactor), mientras que el resto se dirigen hacia el hall de guías. Estos últimos poseen guías de neutrones que permiten la instalación de experimentos en posiciones lejanas a la fuente ( $\sim 60\text{m}$ ).

Los haces en la cara del reactor no prevén la utilización de guías de neutrones, con excepción del haz GF4. A su vez, el haz GT4 no será utilizado en forma inmediata, por lo que inicialmente se colocará un tapón-blindaje dentro del orificio in-pile y porción asociada del obturador primario.

La Tabla 1.2.1, extraída de [3], presenta la denominación de los haces y sus características principales. En la Figura 1.2.1 se muestra un corte superior del reactor del RA-10 y los haces mencionados.

	Espectro	Nombre	Características
Haces hacia el hall de guías	Haces fríos	GF1	Con guías de neutrones
		GF2	Con guías de neutrones
	Haces térmicos	GT1	Con guías de neutrones
		GT2	Con guías de neutrones
Haces hacia la cara del reactor	Haces fríos	GF3	Colimador sin guía, compatible con facilidad de neutrografía
		GF4	Con guías de neutrones
	Haces térmicos	GT3	Colimador sin guía
		GT4	Con tapón-blindaje (aún no se prevé su utilización)

Tabla 1.2.1: Denominación de los haces y características principales

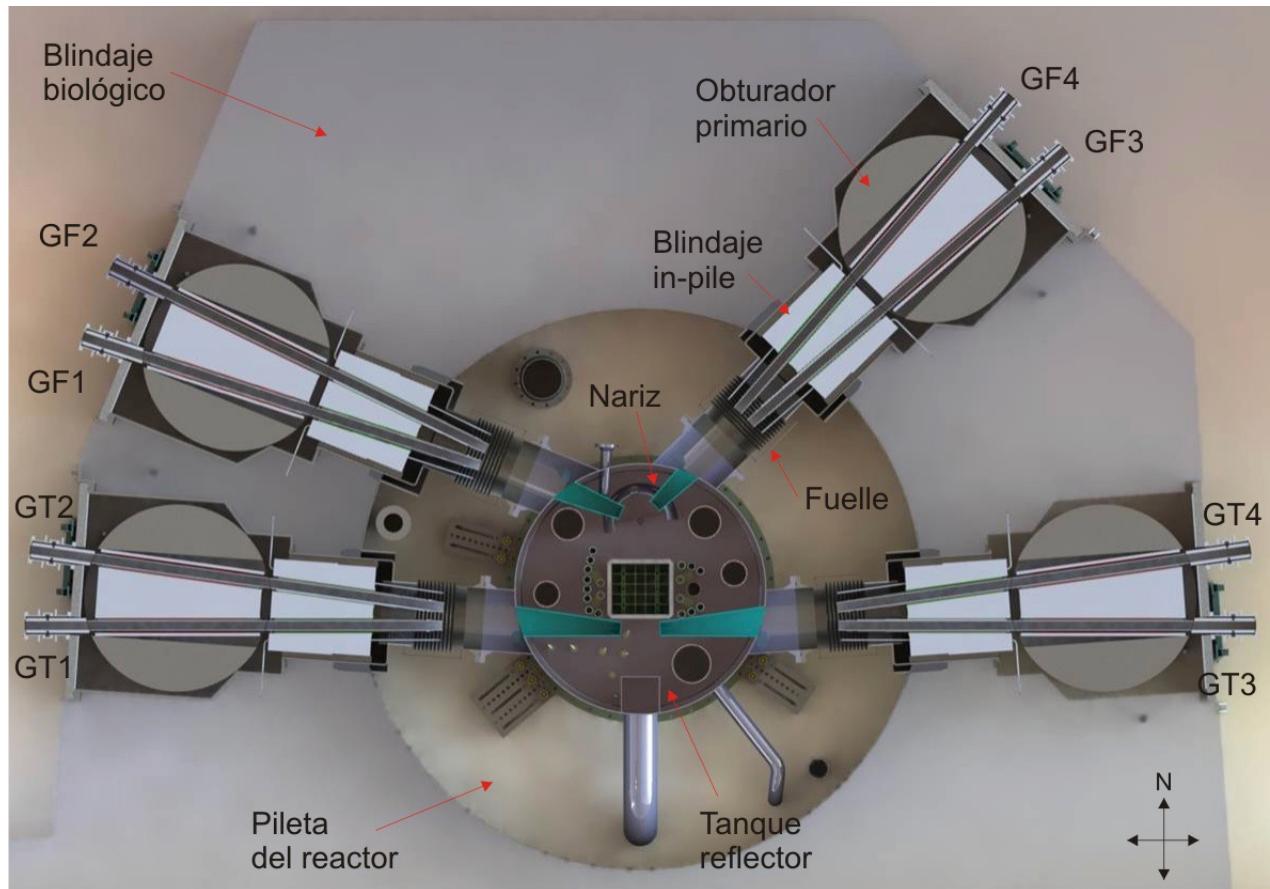


Figura 1.2.1: Corte superior de reactor RA-10. Se observan los haces neutrónicos que fueron descriptos en la Tabla 1.2.1

### 1.3. LAHN: Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones

De la mano del avance constante del Proyecto RA-10 en la Comisión Nacional de Energía Atómica, está en marcha el proyecto para el diseño y ejecución de un Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN) con el objeto de cumplir con uno de los propósitos del Reactor RA-10: proveer haces de neutrones térmicos y fríos para aplicaciones en ciencia y tecnología. En la actualidad, los instrumentos previstos y en desarrollo son:

- Reflectómetro de Neutrones (Polarizados).
- Difractómetro de Neutrones para Monocristales quasi-Laue.
- SANS Multipróposito.
- SANS Materia blanda.

- Difractómetro de Polvos de Alta Resolución.
- Espectrometría de Neutrones.
- Estación experimental para estudios de Cáncer por BNCT.
- Instrumento de imágenes por neutrones.
- Difractómetro escáner.
- Difractómetro de polvos de alta intensidad.

El instrumento SANS multipropósito será implementado por medio de una donación del Helmholtz Zentrum Berlin (HZB, Alemania) a CNEA. Dicho centro ha cerrado en diciembre de 2019 el reactor BER-II, por lo que puso a disposición de otras instituciones su suite de instrumentos, que han sido relocalizados y serán instalados en otros laboratorios de haces de neutrones de Alemania y del mundo. LA CNEA firmó un acuerdo con HZB para recibir los instrumentos V4 (SANS multipropósito) y V6 (reflectómetro de neutrones polarizados), los cuales serán instalados en el hall de guías del reactor RA-10, según se representa en la Figura 1.3.1. Para más información puede consultarse [4].

La mayoría de los instrumentos descriptos se encuentran en el hall de guías, por esta razón surge la necesidad de transportar los neutrones originados en el reactor hacia estos.

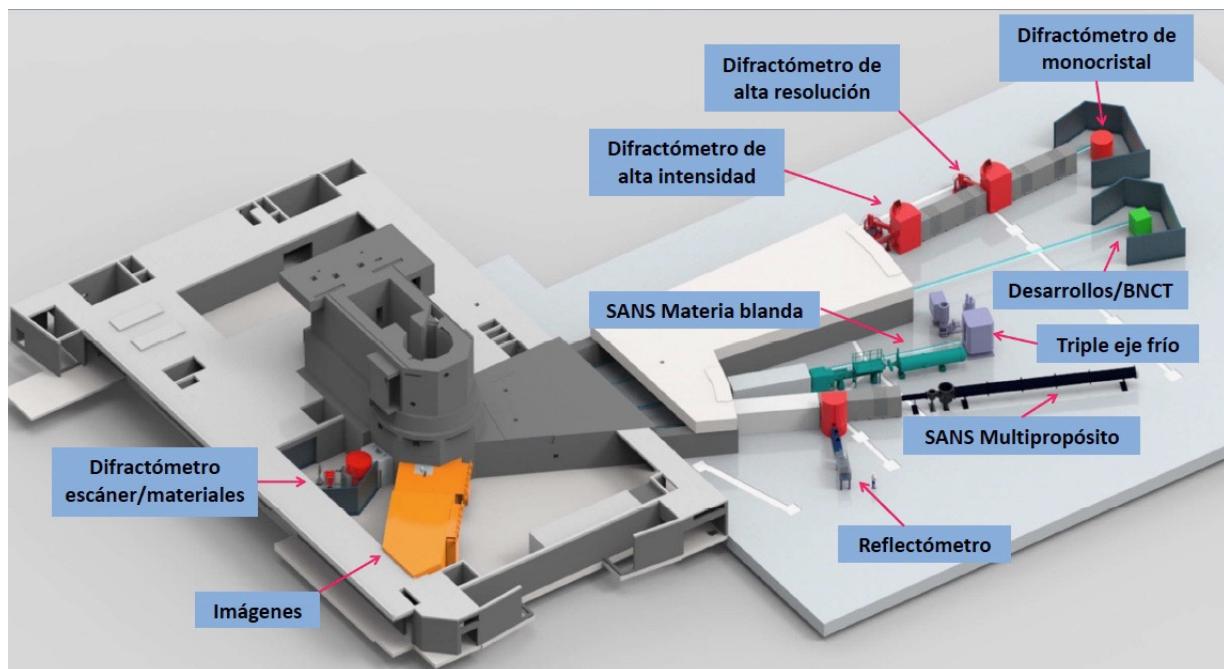


Figura 1.3.1: Vista de las instalaciones del Proyecto RA-10 y Lahn. En el hall del reactor están dos instrumentos. El resto se encuentra en el hall de guías.

## **1.4. Objetivos**

En particular, el presente trabajo estudia el desempeño de distintos diseños de guías que alimentan al instrumento SANS Multipropósitos. Los objetivos del presente trabajo son:

- Estimar el flujo sobre la muestra para las distintas configuraciones del SANS multipropósito (V4) en el reactor RA-10, y compararlo con el reportado en BER-II.
- Comprender las propiedades de los instrumentos ópticos presentes en los haces y los efectos de los mismos sobre las distribuciones neutrónicas.
- Evaluar el desempeño de distintos posibles diseños de guías curvas de neutrones y analizar las diferencias entre las distribuciones neutrónicas debido a cada diseño.
- Desarrollar las herramientas de cálculo neutrónico necesarias para tal fin.

## **1.5. Guiás de neutrones**

### **1.5.1. Definición y calidad de guías**

Una guía de neutrones puede definirse como un conducto en cuyas paredes internas se alojan espejos de neutrones. Los mismos poseen la capacidad de reflejar cierta calidad de neutrones. Al estar el interior de las guías sometido al vacío, los neutrones solo colisionan con sus paredes, conservando en esta colisión tanto la energía como el ángulo con el cual incidieron en forma especular. La capacidad que estas presentan de reflejar los neutrones es conocida como reflectividad, la cual representa la probabilidad que tienen los neutrones incidentes de ser reflejados. Un ejemplo de guía puede verse en la Figura 1.5.1.



Figura 1.5.1: Guía de neutrones del fabricante SwissNeutronics [1]

Con el fin de caracterizar la calidad de las guías de neutrones, los fabricantes evalúan experimentalmente la reflectividad de los espejos neutrónicos en función de la variable característica  $Q$ , el cambio en la componente normal del impulso del neutrón al colisionar con el espejo, que se relaciona con la energía del neutrón  $E$  y ángulo de impacto  $\theta$  (medido entre la trayectoria del neutrón y el plano del espejo) mediante:

$$Q(\text{\AA}) = 1.3894\sqrt{E(\text{meV})} \sin(\theta) \quad (1.1)$$

El diagrama de reflectividad de un superespejo es la probabilidad “ $r$ ” de reflexión del neutrón como función de  $Q$ . Este diagrama exhibe una zona de probabilidad constante y aproximadamente igual a 1 para valores bajos de  $Q$  (menores a  $0.0219 \text{ \AA}^{-1}$ ), luego una disminución lineal de  $r(Q)$  cuya pendiente se denomina frecuentemente “*alpha*” y finalmente un flanco en el que la reflectividad cae prácticamente a 0. El valor de  $Q$  en el que comienza este flanco se lo conoce como “ $Q$  crítico” o “ $Q_C$ ”. También se define usualmente la variable “ $m$ ”, según:

$$m = \frac{Q}{Q_{C-Ni}} \quad (1.2)$$

Donde  $Q_{C-Ni} = 0.0219 \text{ \AA}^{-1}$  es el valor de  $Q$  crítico para el níquel puro, que se toma como caso de referencia. A su vez, se conoce como “m de un espejo neutrónico” al valor de m asociado a  $Q_C$ :

$$m_C = \frac{Q_C}{Q_{C-Ni}} \quad (1.3)$$

De esta forma, una guía “ $m_C = 3$ ” será capaz de reflejar neutrones con valores de “ $Q$ ” 3 veces más grandes que una guía de níquel puro. Otra relación útil vincula el ángulo crítico  $\theta_C$  con la longitud de onda del neutrón  $\lambda$ :

$$\theta_C = m_C \gamma \lambda \quad (1.4)$$

con  $\gamma = 0.1^\circ/\text{\AA}$

Con el objetivo de modelar la curva de reflectividad, se aproxima su forma funcional tomando como parámetros  $R_0$  (reflectividad para  $m < 1$ ),  $m$  del espejo,  $Q_{C-Ni}$ ,  $alpha$  (pendiente para  $1 < m < m_C$ ) y  $W$  (ancho del flanco de caída). Además, estos cuatro parámetros se pueden especificar para cada uno de los cuatro espejos que conforman una guía de neutrones. Para todos los casos se ha considerado  $R_0 = 1$ ,  $Q_{C-Ni} = 0.0219\text{\AA}^{-1}$  y  $W = 0.003\text{\AA}^{-1}$ . El valor de “ $m$ ” varía en forma específica para cada tramo de guía y cada espejo. El valor de  $alpha$  puede ser considerado independiente de  $m_C$ , e igual a  $4\text{\AA}$  aproximadamente. Este último valor se ajusta de acuerdo a los espejos disponibles comercialmente. En la Figura 1.5.2 se muestra la curva de reflectividad para espejos de Mirrotron [5] y la pendiente alpha considerada para los cálculos. Una pendiente similar se obtiene para el fabricante SwissNeutronics.

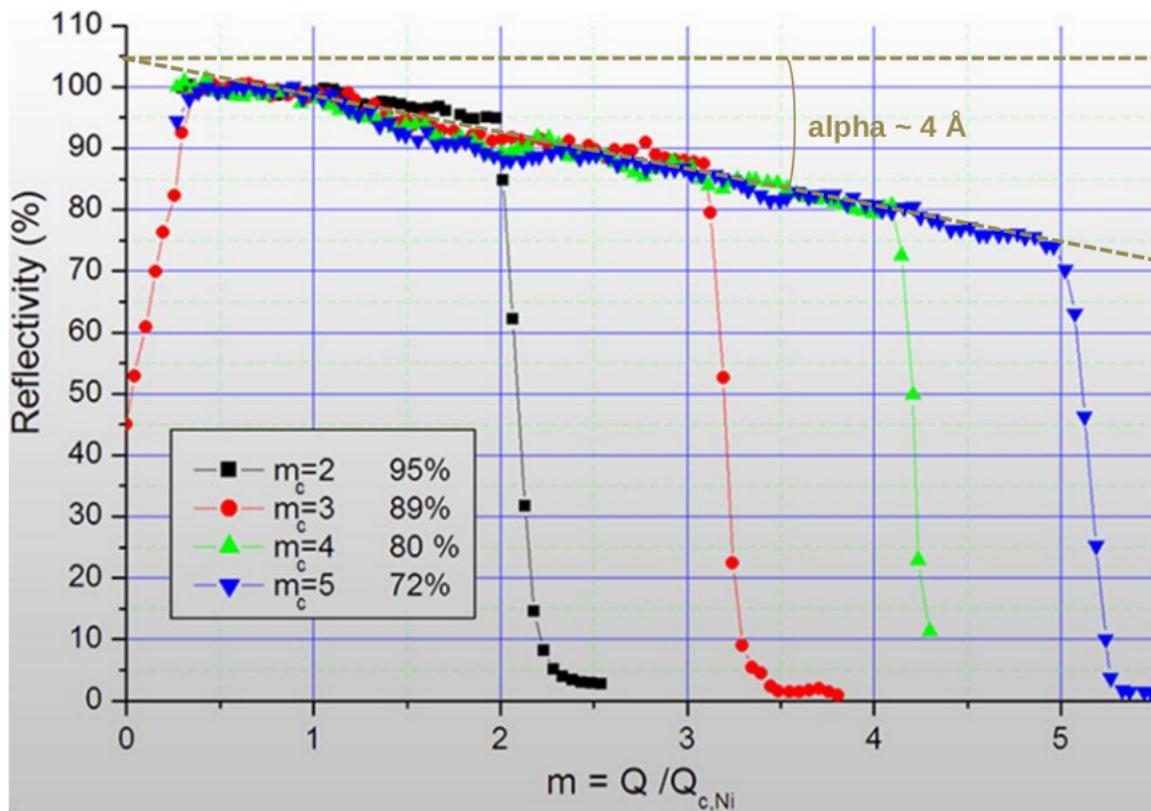


Figura 1.5.2: Diagrama de reflectividad (en %) en función de “ $m$ ” para espejos de  $m_C=2,3,4,5$ .

### 1.5.2. Guías de neutrones con curvatura: tipos de reflexiones.

Las guías de neutrones curvas cumplen la función de eliminar la visión directa de la fuente, disminuyendo considerablemente el flujo de neutrones rápidos y gammas a la salida de las mismas. La curvatura se logra mediante tramos rectos instalados con un pequeño ángulo entre los mismos. Luego a esta guía curva formada por tramos, generalmente se añade un tramo recto con el fin de homogeneizar el flujo espacialmente sobre la superficie de salida de la guía a expensas de una disminución de intensidad. Este último tramo es a veces necesario ya que el flujo saliente de la guía curva exhibe un gradiente, que puede explicarse mediante la presencia de dos tipos de interacción del neutrón con la guía (ver Figura 1.5.3):

- **Reflexiones Zig-Zag:** el neutrón colisiona alternadamente con un espejo y con su opuesto geométrico. Este tipo de reflexiones ocurre tanto en las guías curvas como en las rectas.
- **Reflexiones de Garland:** el neutrón colisiona sucesivamente solo con el espejo externo de una guía curva.

Observando un neutrón que sigue una trayectoria de tipo zig-zag dentro de una guía curva, es

fácil notar que el ángulo de colisión medido entre dicha trayectoria y el plano del espejo es mayor para el caso del espejo externo que para el interno. Por este motivo, es una práctica usual utilizar espejos de mayor calidad sobre la cara externa.

Otra observación importante es que, para grandes radios de curvatura las reflexiones de Garland suceden para ángulos pequeños comparados con el caso zig-zag, por lo cual estos neutrones permanecen cercanos al espejo externo. Debido a este fenómeno se observa un mayor flujo neutrónico del lado del espejo externo a la salida del tramo curvo. Cabe mencionar que los neutrones con trayectorias zig-zag generan flujos uniformes a la salida del tramo curvo, ya que se produce un “mezclado de rayos” de diversos ángulos dentro de la guía. Sobre esta “componente “zig-zag” homogénea se suma la “componente Garland” sesgada hacia el espejo externo.

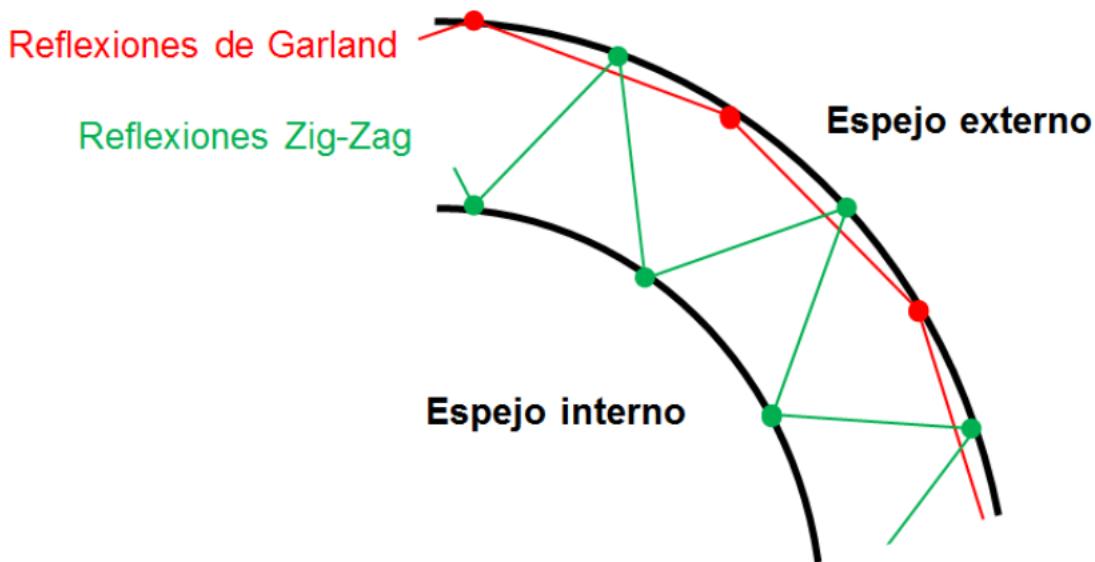


Figura 1.5.3: Tipos de reflexiones del neutrón en guías curvas.

La información obtenida respecto a las guías de neutrones puede ser encontrada en la página SWISSNEUTRONICS [1] y en el informe técnico ANÁLISIS DE LOS HACES DE NEUTRONES TÉRMICOS Y FRÍOS de la Comisión Nacional de Energía Atómica [3], ya citados anteriormente.

## 1.6. McStas

Dada la necesidad de estudiar en forma detallada los haces, fue necesario emplear una herramienta de simulación capaz de modelar guías de neutrones. El paquete de software McStas es

una herramienta para llevar a cabo simulaciones de trazado de rayos Monte Carlo de instrumentos de dispersión de neutrones con alta complejidad y precisión. Las simulaciones pueden calcular todos los aspectos del rendimiento de los instrumentos, por lo tanto, pueden utilizarse para optimizar el uso de los equipos existentes, diseñar nuevos instrumentos y llevar a cabo experimentos virtuales. Un compilador especial traduce un lenguaje específico de dominio que describe la geometría del instrumento de neutrones y las definiciones de componentes (escritas en C) a un código C independiente. Este diseño simplifica la configuración de simulaciones típicas y también brinda libertad esencialmente ilimitada para manejar casos más inusuales. Además la escritura en lenguaje C otorga cierta facilidad para incorporar nuevos desarrollos realizados por el usuario. El código de transporte de neutrones MCNP [6] no presenta dicha capacidad, por lo que la herramienta seleccionada fue McStas debido a su amplia gama de componentes ópticos ya disponibles. Así, la herramienta presenta colimadores, espejos y guías de neutrones, monocromadores y choppers, entre otros. Para mayor información, puede consultarse la página de McStas [7].

A fin de explicar el funcionamiento de esta herramienta de simulación de transporte por Monte Carlo de neutrones, la estructura de McStas se ilustra en la Figura 1.6.1. Para usar McStas, se debe escribir un archivo de definición de instrumento que describa el instrumento a simular. Los archivos de entrada (archivos de instrumentos y componentes) se escriben en el metalenguaje McStas y se editan utilizando el editor elegido por el usuario o el que tiene incorporado en la interfaz gráfica de usuario (mcgui). En el ejemplo de la figura el instrumento presenta 4 “componentes”: el primero simula una fuente de neutrones, el segundo es una guía, el tercero es un chopper y el cuarto es un detector, representado por una placa con la capacidad de clasificar los neutrones que lo atraviesan. Debe expresarse la ubicación de los componentes respecto al sistema de coordenadas expresada en metros, indicado en la figura con “AT”, debajo de la declaración del componente.

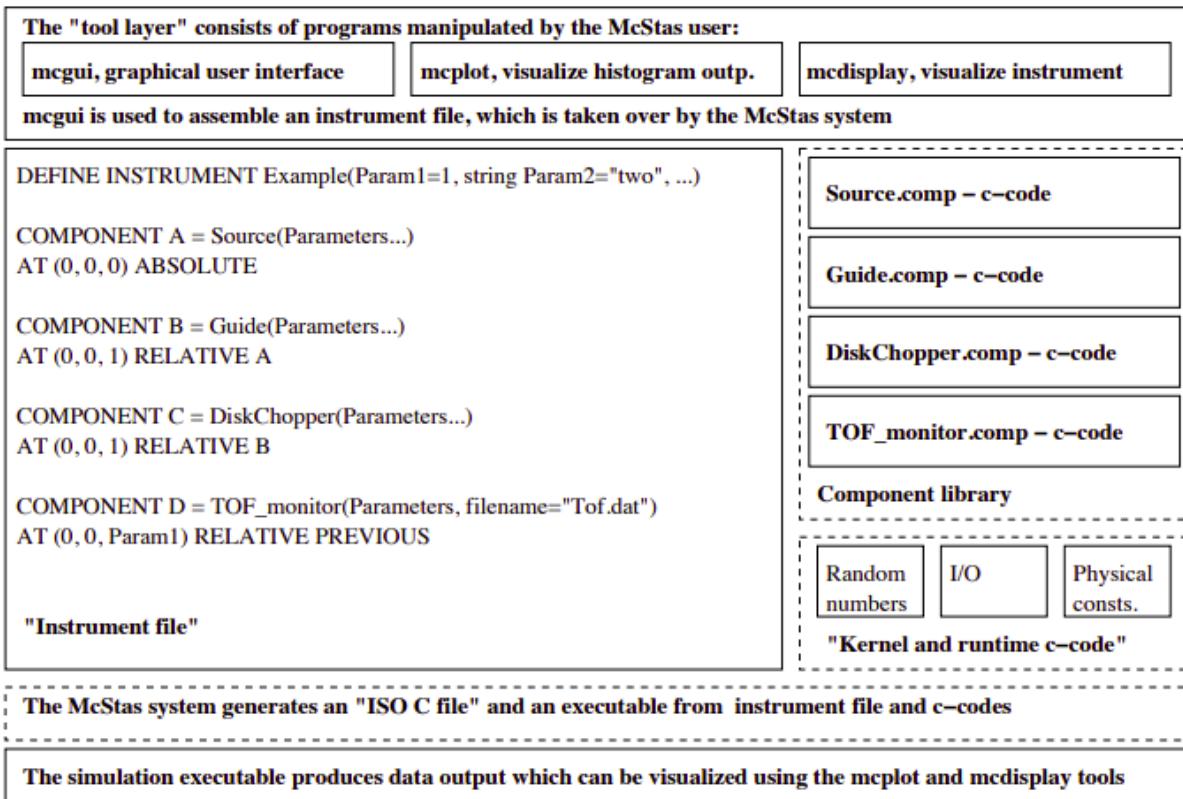


Figura 1.6.1: Ilustración de la estructura de McStas.

Para definir los componentes, es preciso asignar valores a los parámetros que los caracterizan. Todos los parámetros que representan una longitud son especificados en metros. Para el caso de energías, se especifican en meV. McStas sitúa los componentes a lo largo del eje z, como puede notarse en la Figura 1.6.2. A su vez, esta figura presenta el esquema del ejemplo de instrumento.

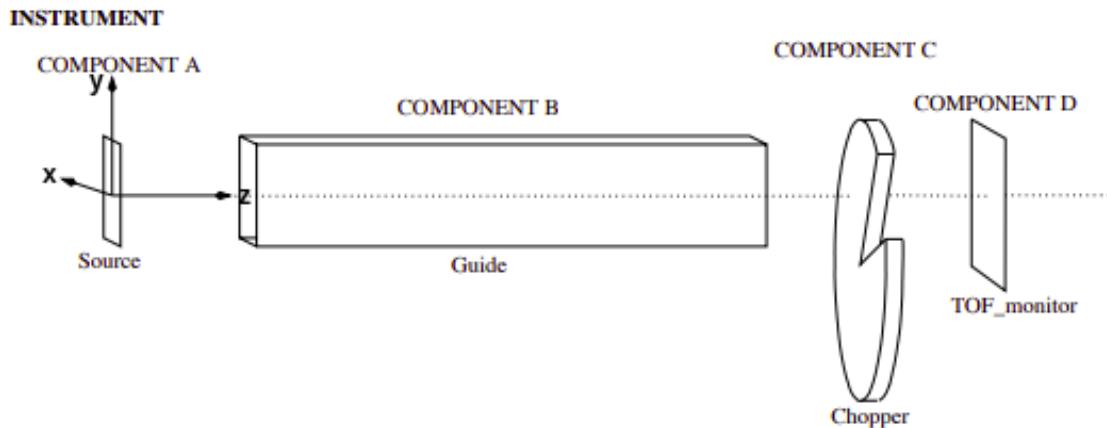


Figura 1.6.2: Instrumento típico de McStas.

El estado del neutrón en McStas queda definido mediante las siguientes variables:

- **De posición:**  $x, y, z$ .
- **De dirección:**  $v_x, v_y, v_z$ . De los cuales se desprende:

$$\bullet \quad \phi = \arctan \frac{v_y}{v_x}$$

$$\bullet \quad \theta = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

$$\bullet \quad \mu = \cos \theta$$

- **De spin:**  $S_x, S_y, S_z$

- **Peso:**  $p$

- **Tiempo:**  $t$

Para poder hacerlo, McStas utiliza el sistema de coordenadas previamente mencionado. En la Figura 1.6.3, se observa nuevamente el sistema de coordenadas junto a las variables más importantes a la hora de caracterizar un neutrón con dirección de vuelo  $\vec{\Omega}$ . Mediante las variables  $\theta$  y  $\phi$  se puede describir el versor  $\hat{\Omega}$  de forma tal que:

$$\hat{\Omega} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta) \quad (1.5)$$

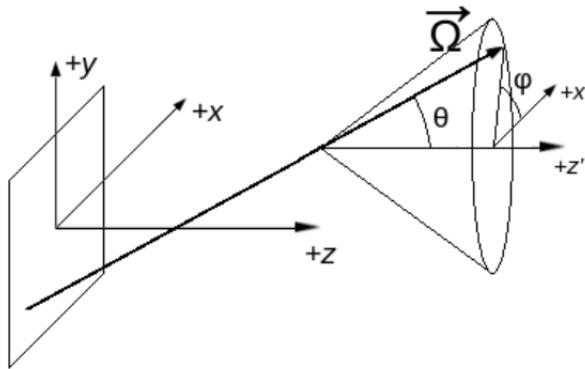


Figura 1.6.3: Sistema de coordenadas de McStas y variables representativas.

## 1.7. MCNP vs McStas

Para caracterizar el estado de los neutrones, MCNP emplea otro sistema de variables que se detalla a continuación:

- **De posición:**  $x, y, z$ .

- **De dirección:**  $d_x, d_y, d_z$

- **Energía:**  $E$

- **Peso:**  $W$

- **Tiempo:**  $t$

Mientras que McStas sitúa su eje z en dirección del experimento, MCNP, para el caso del RA-10, posiciona su eje z en la dirección vertical ascendente, es decir, en la dirección saliente respecto al corte del reactor mostrado en la Figura 1.1.1. Para esquematizar esto, en la Figura 1.7.1 se indican las variables de posición y dirección empleadas en MCNP.

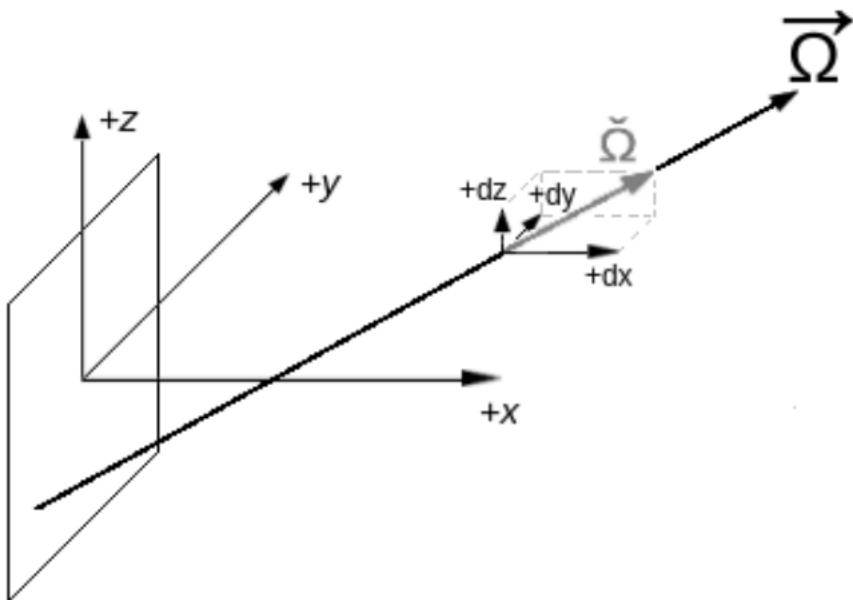


Figura 1.7.1: Sistema de coordenadas de MCNP.

Como se verá más adelante, continuar el modelado en McStas partiendo de MCNP requerirá la conversión de un sistema de variables a otro.

## 1.8. Reactor BER II

El BER-II es un reactor de 10 MW tipo piscina refrigerado por agua liviana con elementos combustible de placa (Uranio-Aluminio) tipo MTR. El núcleo consta de 30 elementos combustible, en una grilla de 6 x 7. Algunas posiciones están llenas de reflectores de berilio. Posee 6 barras

de control con una altura total de 60 cm, un reflector de berilio permanente alrededor del núcleo, y un canal de irradiación in-core, ver Figura 1.8.1. El núcleo está sumergido en una piscina de 3.5 metros de diámetro y una profundidad de 11 metros. Junto a la piscina del reactor, hay una segunda piscina para elementos combustible gastados, ambas están rodeadas de enormes estructuras de hormigón.

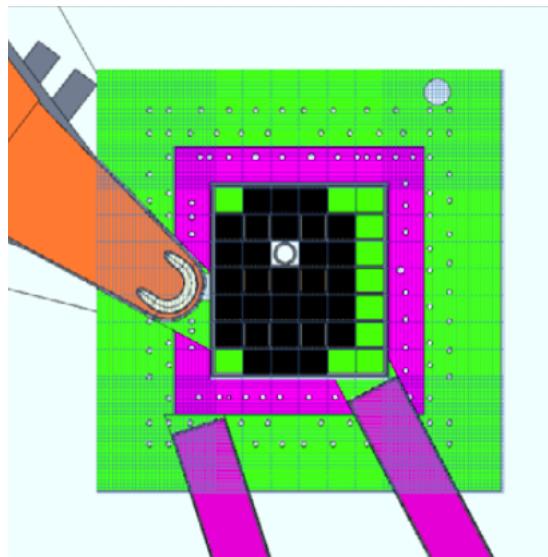


Figura 1.8.1: Sección transversal horizontal del núcleo con elementos combustibles (negro), berilio (verde y magenta), extremos de los canales de irradiación (rosa claro)

Las estructuras de hormigón son penetradas por múltiples tubos de irradiación para permitir experimentos de neutrones. El reactor tiene 10 canales de irradiación tangencial, diagonal y radial; también cuenta con un tubo de haz cónico que aloja la fuente de neutrones fríos insertada horizontalmente, ver Figura 1.8.2. La fuente fría funciona a temperaturas de 25-35 K con hidrógeno hipercrítico en el rango de presión de 14-17 bar.

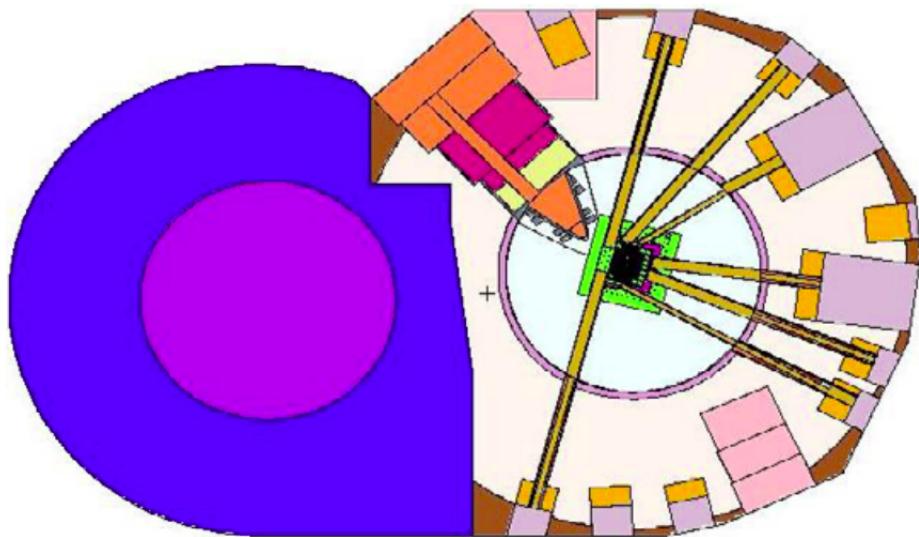
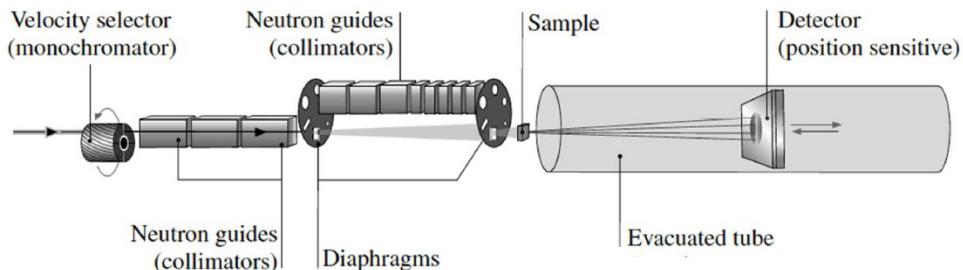


Figura 1.8.2: Sección horizontal en el plano con 7 de los 9 haces y la fuente de neutrones fríos dentro del tubo cónico con dos haces

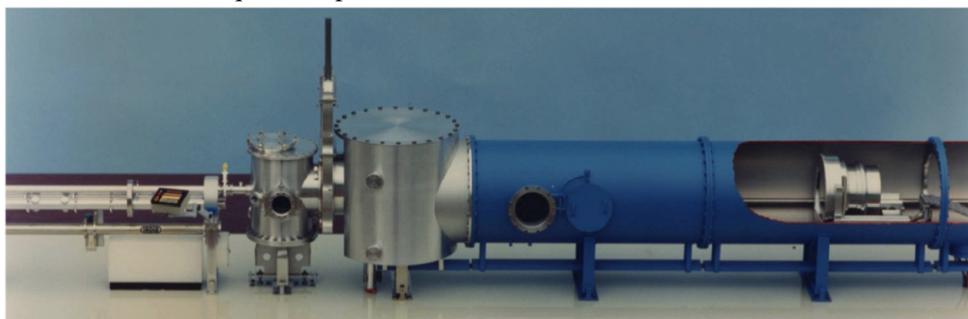
## 1.9. Small-angle neutron scattering (SANS)

Los primeros instrumentos de dispersión de neutrones de ángulo pequeño se han desarrollado en fuentes de neutrones estacionarias, es decir, en reactores de investigación. Los neutrones son moderados por la fuente fría que se encuentra a 20-30K. Las longitudes de onda típicas se encuentran entre 4 y 6 Å, y se obtienen intensidades razonables con hasta 20 Å. En la Figura 1.9.1 se muestra un esquema típico de un instrumento de dispersión de neutrones de bajo ángulo (SANS). Los neutrones fríos son transportados por guías hasta el instrumento. El primer elemento importante es el selector de velocidad de neutrones (Figura 1.9.2a), este consiste en láminas inclinadas en un cilindro giratorio que selecciona la velocidad de neutrones deseada mecánicamente. La incertidumbre de la longitud de onda resulta del ancho y la longitud del espacio entre las láminas y típicamente toma valores de  $\pm 5$  a  $\pm 10\%$ . Luego, la colimación se consigue mediante un canal evacuado con una apertura de entrada, cerca del selector de velocidades, y otra cercana a la muestra, separada por una cierta distancia  $L_C$  en la que los neutrones se propagan libremente. Para variar la distancia de colimación, los neutrones se guían con guías de neutrones móviles de 1 m hasta la distancia deseada relativa a la posición fija de la muestra. Frecuentemente, la longitud máxima es de 20 metros. La muestra se coloca directamente detrás del diafragma de la muestra (consulte la posición de la muestra en la Figura 1.9.2b). La mayoría de los neutrones (entre 50 y 90 %) pasan la muestra sin dispersión. Frente al detector, un tope de haz absorbe estas intensidades altas porque el detector altamente sensible podría quedar in-

habilitado o incluso dañarse con este flujo incidente. Los neutrones dispersados son registrados por un detector de área sensible a la posición. De esta manera, es posible registrar la intensidad de dispersión en función del ángulo de dispersión  $2\theta$ . Los tamaños típicos del tope del haz son  $4 \times 4 \text{ cm}^2$ , y para el área sensible entre  $60 \times 60$  a  $100 \times 100 \text{ cm}^2$ . Para variar el ángulo cubierto, el detector se coloca a diferentes distancias  $L_D$  (simétricamente a la distancia de colimación  $L_C$ ) dentro de un gran tubo de vacío.



Esquema representativo de un instrumento SANS.



Esquema del instrumentos SANS utilizado por *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)* en el BER II.

Figura 1.9.1: Esquema de un instrumento de dispersión de neutrones de ángulo pequeño. Los neutrones pasan de izquierda a derecha. El rayo incidente es monocromado y colimado antes de que llegue a la muestra. La intensidad de neutrones dispersos se detecta en función del ángulo de dispersión.

El instrumento SANS multipropósito que será implementado en el proyecto del *Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN)* es debido a una donación del *Helmholtz Zentrum Berlin (HZB, Alemania)* a *CNEA*. En el capítulo 4 se verá con mayor detalle cada parte del instrumento.



(a) El selector de velocidad de neutrones del instrumento SANS, KWS-3, en el reactor de investigación Garching FRM-2.



(b) Vista de la posición de la muestra del instrumento SANS, KWS-1, en el reactor de investigación Garching FRM-2. Los neutrones provienen de la izquierda a través de la colimación y la apertura de la muestra (este último indicado). Un cambiador de muestras permite ejecutar 27 muestras (soluciones parcialmente coloreadas) en un archivo por lotes. La ventana de silicio al tubo detector se ve detrás.

# Capítulo 2

## Herramientas de cálculo

### 2.1. Implementación en McStas

McStas permite la incorporación de componentes diseñados por los usuarios con el fin de atender las necesidades de los mismos, que quizás no se alcanzan con los componentes de McStas propiamente. A continuación se detallan aquellos que se diseñaron, tanto su función y en algunos casos la necesidad de su confección.

- Fuente\_simple: fuente de neutrones plana rectangular o circular con distribución uniforme en espacio y energía. Los vectores de velocidad se pueden elegir para cumplir una divergencia deseada con la restricción de la energía ya seleccionada. Es una fuente sencilla, de pocas variables y utilizada para la verificación del desempeño de otros componentes o instrumentos.
- Selector\_Velocidades: es un selector de velocidades como lo indica su nombre. Lo esencial en este diseño a diferencia del propio de McStas radica en la distribución espacial al ingreso de las aspas. En el diseño de McStas los neutrones que arriban al selector de velocidades (a la ventana de entrada de las aspas) llegan siempre con la misma distancia relativa a las aspas. En la versión personalizada, la distancia entre las aspas y el neutrón incidente cambia, con lo cual es mejor el modelo de selector de velocidad diseñado.

Los restantes componentes diseñados son de mayor importancia y necesitan verse con mayor profundidad, por lo que serán explicados a continuación.

## 2.2. Fuentes de tracks

Fuente de tracks se denomina a neutrones que se registraron o “grabaron” cuando los mismos atraviesan una superficie de interés. Al decir “registro de neutrón”, nos referimos a registrar las variables relevantes intrínsecas del neutrón en cuestión, a saber:  $x$  ,  $y$  ,  $z$  ,  $v_x$  ,  $v_y$  ,  $v_z$  y el peso  $p$  que se describirá más adelante. De estas variables podemos obtener  $E$ ,  $\phi$  y  $\theta$  o  $\mu$ .

Las fuentes de tracks pueden ser grabadas por códigos de cálculo neutrónico como MCNP. Luego pueden ser leídas nuevamente en MCNP y continuar con Monte Carlo en una geometría adyacente, o bien pueden ser transformadas al formato PTRAC mediante una corrida adicional de MCNP para luego ser utilizadas y proseguir con Monte Carlo de neutrones en McStas. Al realizar esto último, necesitamos un intérprete entre los dos códigos, MCNP y McStas. Recordemos que el sistema de ejes y la descripción del neutrón en términos de las variables del neutrón, son distintas para ambos códigos, explicado anteriormente en la introducción.

McStas presenta un componente llamado Ptrack, este es el componente encargado de interpretar la fuente de tracks grabada en MCNP y transportar esos neutrones en McStas.

La Figura 2.2.1 es una representación esquemática de la geométrica que se modeló en MCNP. Se observa el lugar donde se grabó la fuente de tracks, a la entrada de los tubos de vuelo. La Figura 2.2.2 es la representación de la función del componente Ptrack de McStas, el mismo lee la fuente de tracks, cambia las variables que describen al neutrón a la estructura de McStas y los transporta en el instrumento.

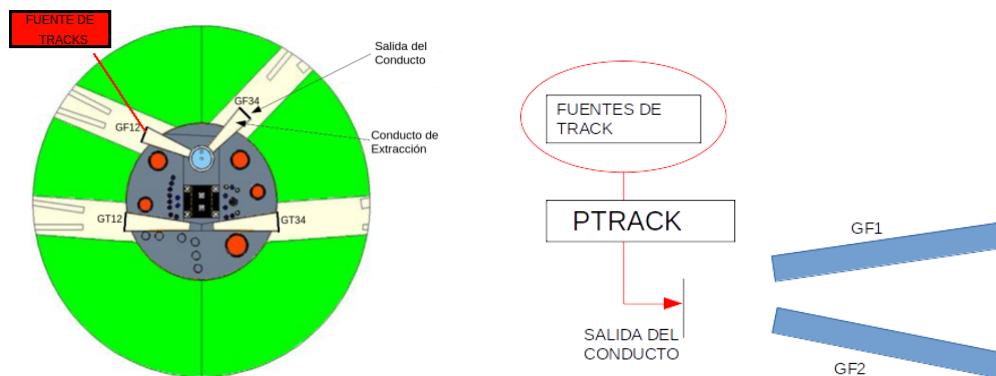


Figura 2.2.1: Representación esquemática de la geometría que se modeló en MCNP.

Figura 2.2.2: Representación esquemática de la función que cumple el componente Ptracks.

Como ya se mencionó, la fuente de tracks se graba registrando los neutrones que atraviesan una superficie de interés. Es posible que pocos neutrones atraviesen dicha superficie, por lo

que la fuente contará con poca estadística para los fines que se pretende utilizar. Esto puede suceder simplemente, porque no se ha corrido MCNP con la suficiente cantidad de neutrones como para generar en la superficie de interés una fuente de tracks numerosa. Si tenemos en cuenta este punto, la solución parece ser aumentar la cantidad de neutrones corridos en MCNP. El problema radica que al hacerlo, involucra grandes gastos computacionales. Sin embargo, si aún se decide trabajar con esta fuente de tracks provista por el código MCNP, la estadística será insuficiente tanto para determinar las distribuciones neutrónicas presentes en la guía, como para obtener resultados integrales a distancias lejanas de la posición en la cual se grabó la fuente de tracks. Surge la necesidad entonces de aumentar la estadística provista por la fuente de tracks. Para ello se utilizaron las fuentes de distribución, diseñadas originalmente para el proyecto [8] y modificadas y mejoradas para el presente trabajo.

### **2.3. Fuentes de distribuciones**

Las fuentes de distribuciones son aquellas en que se utiliza el conocimiento previo de la distribución estadística (espectral, espacial y angular) que poseen los neutrones en una determinada posición, para generar neutrones de fuente en una simulación de Monte Carlo. La información estadística se obtiene generalmente a partir de simulaciones previas y estas son las que hacen uso de las fuentes de tracks descriptas en la sección anterior. Entonces, en base a la información estadística de las fuentes de tracks, se generan las fuentes de distribuciones, es decir, se lee la información estadística de las fuentes de tracks y se generan neutrones mediante una fuente capaz de reproducir las distribuciones neutrónicas leídas. Por tanto, podemos generar una cantidad mayor de neutrones sin violar las distribuciones neutrónicas de la corriente inicial provista por la fuente de track.

Ahora bien, la pregunta es cómo generar fuentes de distribuciones a partir de las fuentes de tracks. La fuente de distribuciones consta básicamente de dos componentes principales: el primero es un detector de neutrones cuyas funciones más importantes son dos: establecer correlaciones entre las variables que describen al neutrón y discriminar los neutrones en bins de las variables del neutrón . El segundo componente es la fuente propiamente dicha, que se encarga de generar los neutrones con las distribuciones analizadas por el detector.

En resumen, el detector de la fuente de distribuciones lee la información de la fuente de tracks, procesa la misma y la acondiciona para que luego la fuente propiamente dicha genere los neutrones.

En la siguiente sección se explica con mayor detalle el detector y la fuente de las fuentes de distribución.

### 2.3.1. EPA Detector

La utilidad de este detector reside en caracterizar la corriente, a fin de conocer su distribución espectral, espacial y angular. La corriente incidente al detector se puede escribir como:

$$J^+(E, x, y, \mu, \phi) = J_T^+ \cdot p(E, x, y, \mu, \phi)$$

Donde  $J^+(E, x, y, \mu, \phi)$  es la corriente expresada en función de esas variables,  $J_T^+$  es la corriente total, es decir integrada en todas las variables y  $p(E, x, y, \mu, \phi)$  es la densidad de probabilidad con unidades  $(cm^2 \cdot meV \cdot sr)^{-1}$ .

Para generar la distribución  $p(E, x, y, \phi, \mu)$  se deben tener en cuenta las 5 variables mencionadas. Si se cuenta con  $N_E$  intervalos en E,  $N_x$  en x,  $N_y$  en y,  $N_\mu$  en  $\mu$  y  $N_\phi$  en  $\phi$ , la intensidad  $J^+$  se encuentra dividida en  $N_E \cdot N_x \cdot N_y \cdot N_\mu \cdot N_\phi$  intervalos. Notar que un neutrón incidente contribuye a una muy baja porción de la  $J_T^+$ . Esto permite tener una idea de la magnitud de cantidad de partículas mínimas necesarias para poder detallar adecuadamente  $J^+(E, x, y, \mu, \phi)$ .

Por otro lado imaginemos que cada variable esta discretizada en 10 intervalos cada una (una cantidad bastante reducida si se pretende generar una distribución como se verá más adelante). Entonces necesitaríamos  $10^5$  neutrones para que en cada bin haya al menos un neutrón. Para mejorar la estadística necesitamos más neutrones, pero como mencionamos, generar una fuente de tracks de muchos neutrones es un costo computacional muy grande.

La solución esta dada por macro y micro grupos con el propósito de separar las dos funciones del detector: generar correlaciones entre las variables y generar la distribución fina de los neutrones en cada variable. Los macro grupos son discretizaciones gruesas (o de correlación). Tienen como fin último la descripción fina de otra variable. Los micro grupos son discretizaciones finas que describen bien la distribución neutrónica en esa variable. De ahí el término macro grupo y micro grupo.

Con el fin de entender mejor lo mencionado, a continuación se presenta el siguiente ejemplo:

Supongamos que deseamos conocer la distribución neutrónica en la variable  $\phi$  pero queremos además saber cómo se correlaciona esta variable con todas las demás. Entonces se harán macro grupos en las variables E, x, y y  $\mu$  y micro grupos en la variable  $\phi$ . La Figura 2.3.1 muestra la arquitectura del detector realizado para este objetivo.

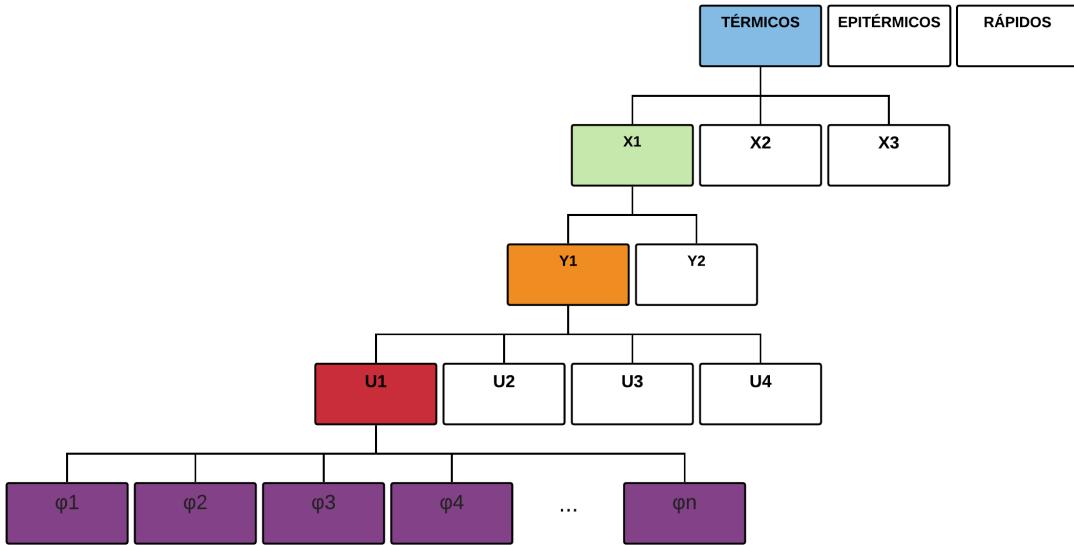


Figura 2.3.1: Representación esquemática de la arquitectura del detector del ejemplo

Se han elegido 3 grupos de energías, los cuales podrían ser: térmico, epitérmico y rápido. Cada macro grupo de energía, tiene macro grupos de  $x$ , que en principio podrían ser de distinta cantidad para cada grupo de energía. En modo de ejemplo se seleccionaron 3 macro grupos de  $x$  denominados X1, X2 y X3 para el macro grupo de energía térmico. Lo mismo sucede con las demás variables hasta llegar a la variable  $\phi$ . Se observa claramente en este punto que la diferencia entre los macro grupos y micro grupos radica principalmente en la cantidad ampliamente superior de grupos para los micro con respecto de los macro grupos.

Obsérvese además que los micro grupos siempre se encuentran al final de la “cascada” en el diagrama de la Figura 2.3.1. Esto será siempre así. Cabe mencionar que solo se ha dibujado los macro grupos y el micro grupo de los grupos que están coloreadas, para no complejizar el dibujo más de lo necesario. Por ejemplo, no se ha dibujado los macro grupos “x” para el grupo epitérmico, los macro grupos “y” para el grupo X2, etc.

Finalmente, un aspecto importante es el orden en el que las variables están correlacionadas. En este ejemplo, la energía aparece como la primera variable de correlación con las demás variables. Esto implica que siempre debemos primero seleccionar el rango de energía para ”descender” hacia las otras variables. No necesariamente esto debe ser así, también se podría seleccionar otra variable como la primer variable de correlación y seguir alterando el orden según las necesidades deseadas. En el capítulo 6 se verá la importancia de este punto cuando se utilicen los detectores 4 y 5 de la Figura 2.3.2 que presentan a E como macro grupo y solo a  $\mu$  como micro grupos y viceversa.

A continuación se presenta la Figura 2.3.2. Se detallan en ella los detectores confeccionados siguiendo la arquitectura explicada en los párrafos anteriores.

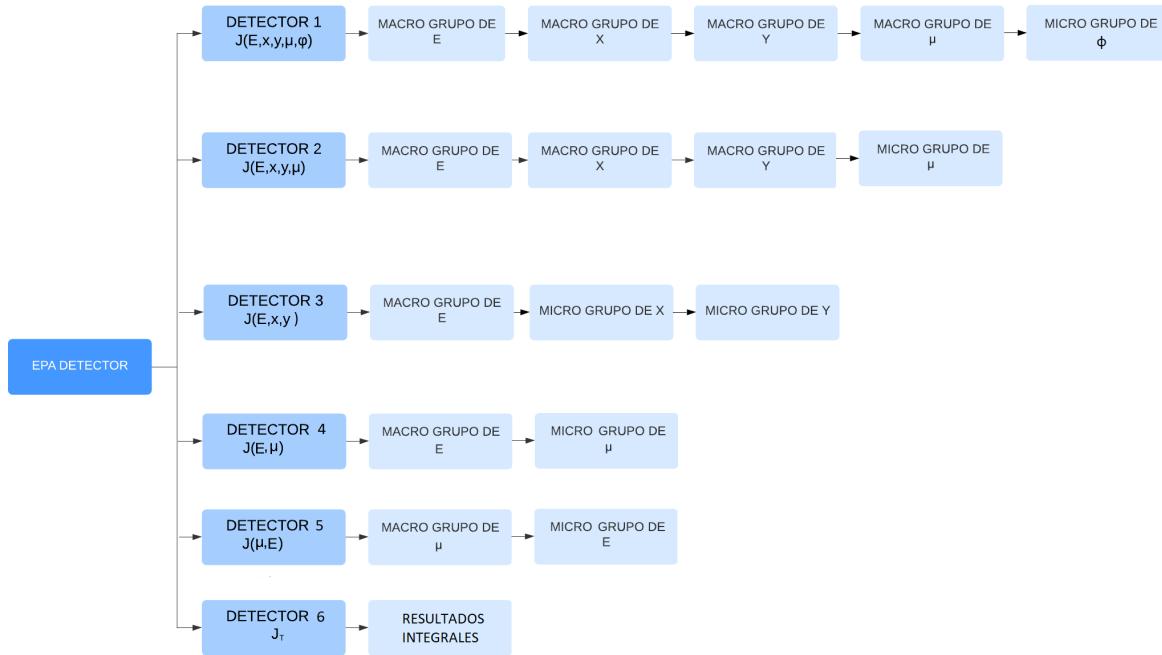


Figura 2.3.2: Detalle de los 6 detectores confeccionados dentro del componente EPA Detector

### 2.3.2. Source Builder

Este es un componente que reproduce una fuente que genera sus neutrones según una distribución estadística conocida. Esta distribución surge de la información estadística previamente generada por el EPA\_detector. La función que cumple es asignar un valor a todas las variables neutrónicas de importancia, es decir, todas las variables que dan identidad al neutrón. Si bien se pueden crear varios detectores con distintas correlaciones de variables y en un orden deseado, la Source Builder genera las distribuciones utilizando los primeros 4 detectores nombrados en la Figura 2.3.2, es decir, el componente fue confeccionado para interpretar solo a estos 4 detectores.

Cabe destacar que si bien solo 4 detectores actúan en la generación de las distribuciones neutrónica, todos pueden ser utilizados (y son utilizados) para recabar información de las distribuciones neutrónicas en distintos puntos deseados del haz.

Sin entrar tanto en el detalle fino, se verá rápidamente como asigna valores a las variables del neutrón.

1. Se leen las distribuciones generadas por los detectores.

2. Se suman todos los neutrones que pertenecen a un macro grupo. Por ejemplo, para el caso de la energía, los 4 primeros detectores tienen a la energía como macro grupo y esta suma podría realizarse sobre cualquiera de ellos. Por lo tanto, debemos sumar para cada macro grupo de energía (segregando las sumas entre los distintos macro grupo de energía) todos los neutrones que se encuentren en el mismo, sin importar luego en que micro/macro grupo se encuentren (todos los neutrones que se encuentran en la “cascada” debajo de ese macro grupo). Se realiza esto con todos los macro grupos de esa variable y finalmente se calcula la distribución acumulada para todos ellos que existan en la misma. Es decir a la suma resultante de cierto macro grupo, se suma adicionalmente la suma resultante de todos los macro grupos menores que ese. Luego cada distribución acumulada se normaliza a 1. Ahora bien, para el caso de la posición espacial  $x$  por ejemplo, existirán distintos macro grupos contenidos en distintos macro grupos de energía. Debe realizarse lo mismo que se describió en el paso anterior para todos los macro grupos de  $x$ . Y lo mismo con todas las variables.
3. Luego se calcula la distribución acumulada correspondiente a todos los micro grupos de todas las variables. Las sumas con las que luego se realizarán las distribuciones acumuladas también deben segregarse con los límites de los macro grupos de las mismas variables. Por ejemplo, retomando otra vez el caso de la energía, la misma está como macro grupos en los 4 primeros detectores y en el último se encuentra como micro grupo. Entonces, se calcula la suma de todos los neutrones presentes en los micro grupos de energía hasta llegar al micro grupo cuya energía asociada es igual al límite del primer macro grupo de energía. Posteriormente se realiza otra suma continuando desde ese punto hasta el límite del segundo macro grupo de energía. Y así, hasta abarcar todos los micro grupos. Luego se calcula la acumulada como se mencionó y se normaliza a 1 como se hizo en el paso anterior.
4. Finalmente, se sortean las variables en dos tandas teniendo en cuenta la distribuciones acumuladas normalizadas. La primera tanda sorteá un rango grueso de la variable, es decir, se sorteá en qué macro grupo estará. Luego se utilizan las demás acumuladas que se desprenden del primer sorteo para ubicar al valor de la variable en un micro grupo. Entonces, cuando se tiene el micro grupo, se tiene el valor exacto y final que adquirirá dicha variable a través de un sorteo aleatorio dentro del rango del micro grupo.

# Capítulo 3

## Cálculos de magnitudes

### 3.1. Cálculo de magnitudes integrales

Una simulación semicásica totalmente realista requerirá que cada neutrón esté presente o perdido en cualquier momento. En muchos instrumentos, se detectará una fracción muy pequeña de los neutrones iniciales, por lo tanto, las simulaciones de este tipo perderán mucho tiempo al tratar con neutrones que nunca llegan al detector o monitor relevante.

Una forma importante de acelerar los cálculos es introducir un "factor de peso" de neutrones para cada rayo de neutrones simulado y ajustar este peso de acuerdo con la trayectoria del rayo. Si por ejemplo, la reflectividad de un determinado componente óptico es del 10 %, y los rayos de neutrones reflejados se consideran más adelante en las simulaciones; el peso de neutrones se multiplicará por 0.10 al pasar este componente, pero cada neutrón puede reflejarse en este. Por el contrario, la simulación totalmente realista del componente requeriría en promedio diez neutrones entrantes por cada uno reflejado. En general, la multiplicación del peso de todos los neutrones por el valor de reflectividad del componente es una técnica de reducción de varianza en Monte Carlo. Supongamos que el peso inicial de neutron i-ésimo es  $p_0$  y denotemos el factor de multiplicación de peso en el componente j-ésimo por  $\pi_j$ . El factor de peso resultante para el rayo del neutrón i-ésimo después del paso de los n componentes en el instrumento se convierte en el producto de todas las contribuciones.

$$p_n^i = p_0^i \prod_{j=1}^n \pi_j$$

Para conocer el valor de la intensidad  $I$  en una superficie dada, McStas identifica a las partículas que la atraviesan y suma sus correspondientes pesos estadísticos. Si consideramos que se corrieron N neutrones de fuentes, por ejemplo, de la fuente de tracks; la intensidad  $I$  de los neutrones

luego de  $n$  componentes (que es donde se encuentra la superficie de interés) se define como:

$$I = \sum_{i=0}^N p_n^i$$

Ahora bien, a partir de la intensidad total de neutrones en una superficie dada, podemos conocer la corriente total  $J_T^+$  en dicha superficie. Para esto primero debemos considerar diferentes casos: cuando la fuente utilizada es la fuente de tracks (sin la fuente de distribución) y cuando se utiliza la fuente de distribución. Entonces veremos primero como calcular la corriente total  $J_T^+$  cuando es utilizada únicamente la fuente de tracks.

### 3.1.1. Cálculo de la corriente total $J_T^+$ cuando se utiliza únicamente la fuente de tracks

Para calcular la corriente de neutrones  $J \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$  cuando se utiliza únicamente la fuente de tracks se debe recurrir a la relación:

$$J \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right] = \frac{FP \cdot I}{NPS \cdot A_{sup}}$$

Donde  $I$  es la intensidad.  $FP$  corresponde a un factor de escala dado por la cantidad de neutrones nacidos de fisión por segundo. Para el caso de estudio, a potencia nominal de  $30 MW$ , este valor es igual a  $2.3 \cdot 10^{18} \frac{n}{s}$ .  $NPS$  corresponde a la cantidad de partículas corridas en la simulación de MCNP que dió origen a la fuente de tracks utilizada, el cual toma un valor de  $3.9 \cdot 10^9$ . Obsérvese que se normaliza la corriente a la intensidad de operación (*término*  $\frac{I}{NPS}$ )

### 3.1.2. Cálculo de la corriente total $J_T^+$ cuando se utiliza la fuente de distribución

Para calcular la corriente total cuando se utiliza la fuente de distribuciones se debe previamente tener la corriente inmediatamente antes de la posición de la fuente de distribuciones. Luego se recurre a la siguiente relación:

$$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right] = J_{T \text{antes}}^+ \cdot \frac{I(z)}{I_0}$$

Donde  $J_{T \text{antes}}^+$  es la corriente total inmediatamente antes de la fuente de distribuciones.  $I(z)$  es la intensidad total en la posición que se encuentra la superficie de interés y  $I_0$  es la intensidad total emitida por la fuente. Esta relación es válida porque recordemos que la fuente de distribuciones fue concebida, tal como lo indica su nombre, para generar distribuciones neutrónicas.

En otras palabras, la corriente generada tendrá la misma “*forma*” que la corriente antes de este componente, con la única diferencia en un factor de escala.

Ahora bien, observemos que  $J_T^+_{antes}$  podría ser el caso de la corriente total calculada con la fuente de tracks mencionada anteriormente. En tal caso:

$$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right] = \frac{FP \cdot I}{NPS \cdot A_{sup}} \cdot \frac{I(z)}{I_0}$$

Donde en este caso  $I$  es la intensidad total calculada inmediatamente antes de la fuente de distribuciones.

A continuación se explicará como calcular las magnitudes de distribución.

## 3.2. Cálculo de las magnitudes de distribución

Como vimos en los 6 detectores del EPA\_Detector (2.3.2), cada uno de ellos posee macro y micro grupos diseñados y ordenados de tal forma de asistir a la magnitud que se intenta representar. Para el estudio que vamos a comprender consideremos el detector 1. El mismo tiene a  $E$ ,  $x$ ,  $y$  y  $\mu$  como macro grupos y a  $\phi$  como micro grupo. Cada micro grupo de  $\phi$  tiene asociado una intensidad que denominaremos:

$$I_{E_i x_j y_k \mu_m \phi_l}$$

Donde:

- $E_i$  es el macro grupo i-ésimo de  $E$ .
- $x_j$  es el macro grupo j-ésimo de  $x$ .
- $y_k$  es el macro grupo k-ésimo de  $y$ .
- $\mu_m$  es el macro grupo m-ésimo de  $\mu$ .
- $\phi_l$  es el micro grupo l-ésimo de  $\phi$ .

Un neutrón que aporta a  $I_{E_i x_j y_k \mu_m \phi_l}$  es un neutrón cuyo valor de sus variables están dentro del umbral que definen los límites de los macro grupos  $E_i$ ,  $x_j$ ,  $y_k$  y  $\mu_m$  y los límites del micro grupo  $\phi_l$ . Por otro lado, la corriente de neutrones asociada a  $I_{E_i x_j y_k \mu_m \phi_l}$  puede escribirse como:

$$J_T^+ \cdot P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l) \left[ \frac{n}{s} \right] = \int_{\Delta E_i} dE \int_{A_{jk}} d^2 \vec{r} \int_{\Delta \mu_m} \mu \cdot d\mu \int_{\Delta \phi_l} d\phi \varphi(E, \vec{r}, \widehat{\Omega})$$

Los términos del miembro izquierdo de la ecuación son:

- $J_T^+ \left[ \frac{n}{s} \right]$  es la corriente total en una superficie.
- $P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)$  adimensional, es la probabilidad de que neutrones que atraviesan la superficie de interés, presenten valores de sus variables dentro de los límites definidos por los grupos  $E_i, x_j, y_k, \mu_m$  y  $\phi_l$ .

Los términos del miembro derecho de la ecuación son:

- $A_{jk}$  es el área demilitada por  $\Delta x_j \cdot \Delta y_k$ .
- $\varphi$  es el flujo angular  $\left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot meV \cdot sr} \right]$ .
- Los restantes términos son las integrales correspondientes al cálculo de la corriente. Observar que cada integral tiene como límite de integración a los límites del grupo correspondiente.

Nos falta determinar a  $P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)$ . Para conseguirlo podemos utilizar su definición. Como se mencionó,  $P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)$  es la probabilidad de que neutrones que atraviesan la superficie de interés (donde se pretende calcular la corriente), presenten valores de sus variables tal que:  $E$  está contenida en el grupo  $E_i$ ,  $x$  está contenida en el grupo  $x_j$ ,  $y$  está contenida en el grupo  $y_k$ ,  $\mu$  está contenida en el grupo  $\mu_m$  y  $\phi$  está contenida en el grupo  $\phi_l$ . Entonces esta probabilidad la podemos determinar como:

$$P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l) = \frac{I_{E_i x_j y_k \mu_m \phi_l}}{I_T}$$

Donde  $I_T$  es la intensidad total en la superficie de interés. Sin embargo, podemos expresar la corriente como distribución, es decir con unidades  $\left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot meV \cdot sr} \right]$ , si dividimos por el ancho de cada grupo a  $J_T^+ \left[ \frac{n}{s} \right] \cdot P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)$ :

$$J^+ (E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l) \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot meV \cdot sr} \right] = J_T^+ \cdot \frac{P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)}{\Delta E_i \cdot \Delta x_j \cdot \Delta y_k \cdot \Delta \mu_m \cdot \Delta \phi_l} = J_T^+ \cdot p(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)$$

Donde  $p(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)$  es la densidad de probabilidad. Observar que esta ecuación tiene la misma forma de la ecuación del Capítulo 2 de la Sección 2.3.1 página 22.

Como aclaración en este capítulo cabe decir que cuando observemos gráficos en este trabajo, y en particular para seguir con el ejemplo del detector 1, veremos que el eje de las ordenadas corresponderá a  $J_T^+ \cdot p(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi)$ . Observe que el micro grupo  $\phi$  no tiene subíndice. Esta nomenclatura intenta representar la gráfica típica  $f(x)$  vs  $x$ . Es decir, la variable  $\phi$  es la variable independiente que tomará a cada micro grupo de  $\phi$ . Los macro grupos actuarán como parámetros, estarán fijos a menos que se detalle lo contrario. En general, los macro grupos serán siempre los mismos pero el micro grupo variará para mostrar las diferentes corrientes asociadas a estos micro grupos. Puede ser el caso que se muestren dos curvas en una misma gráfica para

dos macro grupos distintos, pero en tal caso se detallará. El eje de abscisas, en este caso, tendría los micro grupos ordenados:  $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \dots, \phi_l, \dots, \phi_L$  donde  $L$  es el índice del último micro grupo. Sin embargo, lo que se realizó es definir el eje de abscisas desde el menor ángulo de  $\phi$  que deseamos graficar hasta el máximo ángulo (no necesariamente el menor corresponde al primer micro grupo, es decir, podemos decidir graficar una parte de los resultados, en tal caso se detallará) y los puntos trazados corresponderán en el eje de las abscisas al promedio de los límites inferior y superior de cada micro grupo de  $\phi$ . Por ejemplo, si el micro grupo  $\phi_l$  tiene como límites  $\frac{\pi}{6}$  y  $\frac{\pi}{2}$ , entonces el punto en el eje de ordenadas correspondiente a una corriente  $J_T^+ \cdot P(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi_l)$  tendrá a  $\frac{\pi}{3}$  como valor de abscisa. Ver Figura 3.2.1.

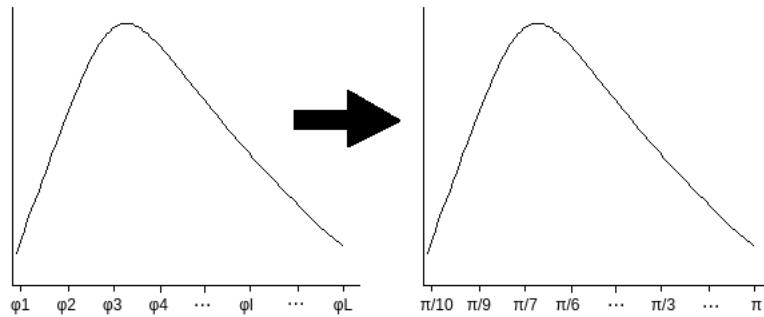


Figura 3.2.1: El eje de las abscisas presenta el promedio de los límites inferior y superior de cada micro grupo de  $\phi$ .

Si bien todo el análisis se realizó considerando como ejemplo al detector 1, el análisis es exactamente similar para todas las magnitudes de distribución que se calculan en este trabajo. A continuación se presenta la Tabla 3.2.1. En ella se muestran y definen las magnitudes calculadas.

Magnitud de distribución	Interpretación Física
$J_T^+ \cdot p(x_j, y_k, E) \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot meV} \right]$	Distribución espectral de la corriente promediada en cada micro grupo de $E$ y promediada espacialmente sobre la superficie de salida de interés, integrada en $\mu$ entre 0 y 1 e integrada en $\phi$ entre 0 y $2\pi$
$J_T^+ \cdot p(E_i, x, y) \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot meV} \right]$	Distribución espacial de la corriente promediada en el intervalo de energías especificadas cuyo macro grupo tiene como límites $E1$ y $E2$ , integrada en $\mu$ entre 0 y 1, integrada en $\phi$ entre 0 y $2\pi$ y promediada en el área $x_j \cdot y_k$ , es decir los micro grupos en $x$ y $y$
$J_T^+ \cdot p(E_i, x_j, y_k, \mu) \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot meV \cdot \mu} \right]$	Distribución en $\mu$ de la corriente promediada en el intervalo de energías correspondiente a un macro grupo dado, promediada en el área descripta por $x_j \cdot y_k$ (macro grupos espaciales), integrada en $\phi$ entre 0 y $2\pi$ y promediada en el micro grupo $\mu$ en cuestión.
$J_T^+ \cdot p(E_i, x_j, y_k, \mu_m, \phi) \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s \cdot meV \cdot \mu} \right]$	Distribución en $\phi$ de la corriente promediada en el intervalo de energías correspondiente a un macro grupo dado, promediada en el área descripta por $x_j \cdot y_k$ (macro grupos espaciales), promediada en el micro grupo $\mu_m$ y promediada en el micro grupo $\phi$ en cuestión.

Tabla 3.2.1: Descripción de magnitudes fundamentales que serán empleadas a lo largo del trabajo.

# Capítulo 4

## Descripción del haz neutrónico GF2

### 4.1. Generalidades

Como se mencionó en la Introducción, el reactor RA-10 contará con 8 haces de neutrones. Estos haces comprenden desde las fuentes hasta los puntos de utilización de dichos haces. En la Figura 4.1.1, se puede observar los primeros segmentos que componen a cada uno de ellos.

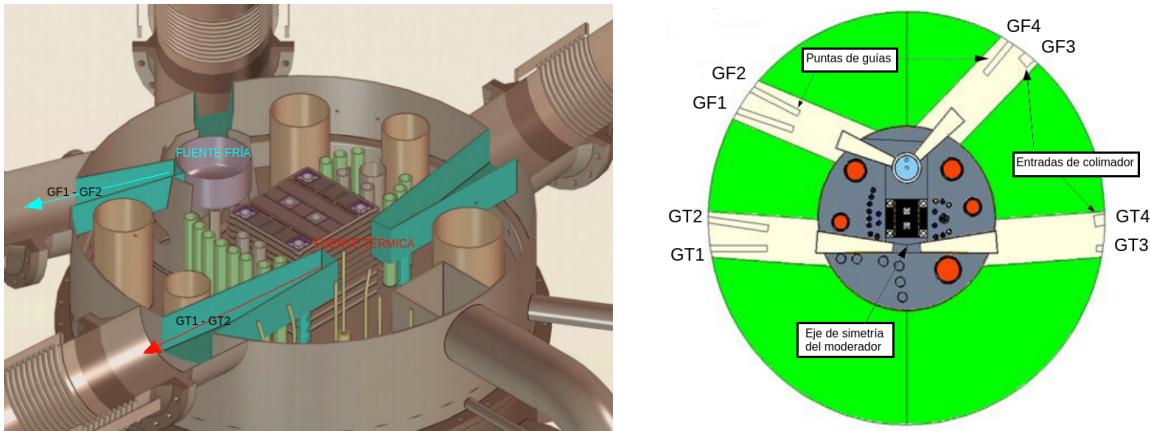


Figura 4.1.1: Esquema del tanque reflector y núcleo del RA-10.

Se utilizó un sistema de referencia  $(x', y', z')$  de tipo intrínseco, con el eje  $z'$  siguiendo la forma de la guía sobre su eje principal, ver Figura 4.1.2. Además para el caso de la guía curva, el eje  $z$  sigue la misma curvatura que la guía.

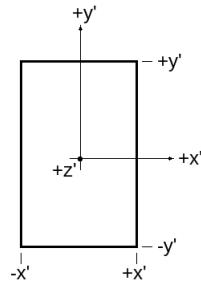


Figura 4.1.2: Sistema de coordenadas intrínseco a la guía.

A esta altura cabe mencionar que el detalle de calidad de guías, geometría de conductos y layout final de los haces quedará determinado por el proyecto *LAHN*. Por lo tanto, no todas las especificaciones que se darán a continuación permanecerán sin variaciones. Sin embargo, el trabajo se enfoca en el desarrollo de herramientas de uso general que quedarán disponibles para el cálculo de los instrumentos en su versión final.

Los sistemas de guías, tanto para el caso frío como el térmico, consisten en cuatro tramos principales: el tramo recto in-pile (se extiende desde las “punta de guía” y se introduce dentro del blindaje biológico hasta llegar al obturador primario), el tramo recto dentro del obturador primario, el tramo curvo out-of-pile y finalmente el instrumento.

## 4.2. GF2: In Pile

La Figura 4.2.1 muestra la ubicación del haz GF2.

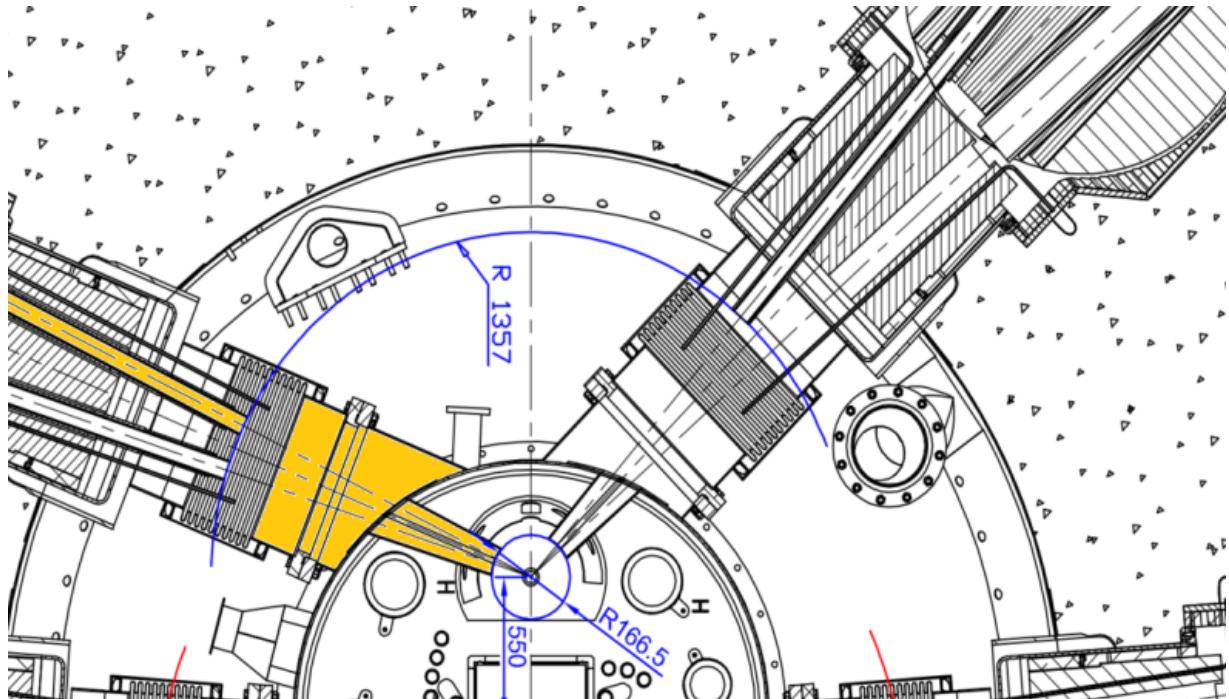


Figura 4.2.1: Ubicación del haz GF2

Los neutrones provenientes del tanque del reflector sufren colisiones con el moderador frío (fuente fría) y como consecuencia, algunos de ellos emergen del evento de scattering con energías y direcciones deseables, que permiten su extracción a través de dos conductos de extracción. Luego los neutrones siguen su trayectoria a través de tubos de vuelo, atraviesan el tanque de agua liviana y viajan desde la salida de los conductos de extracción hasta la entrada a las guías GF1 y GF2, en este caso. Los haces fríos GF1 y GF2 emergen de una única unidad conteniendo dos guías de neutrones In Pile, dentro del blindaje biológico como se muestra en la Figura 4.2.2, que consta de dos partes principales:

- Obturador primario (Primary Shutter).
- Colimador In Pile (In-pile plug).

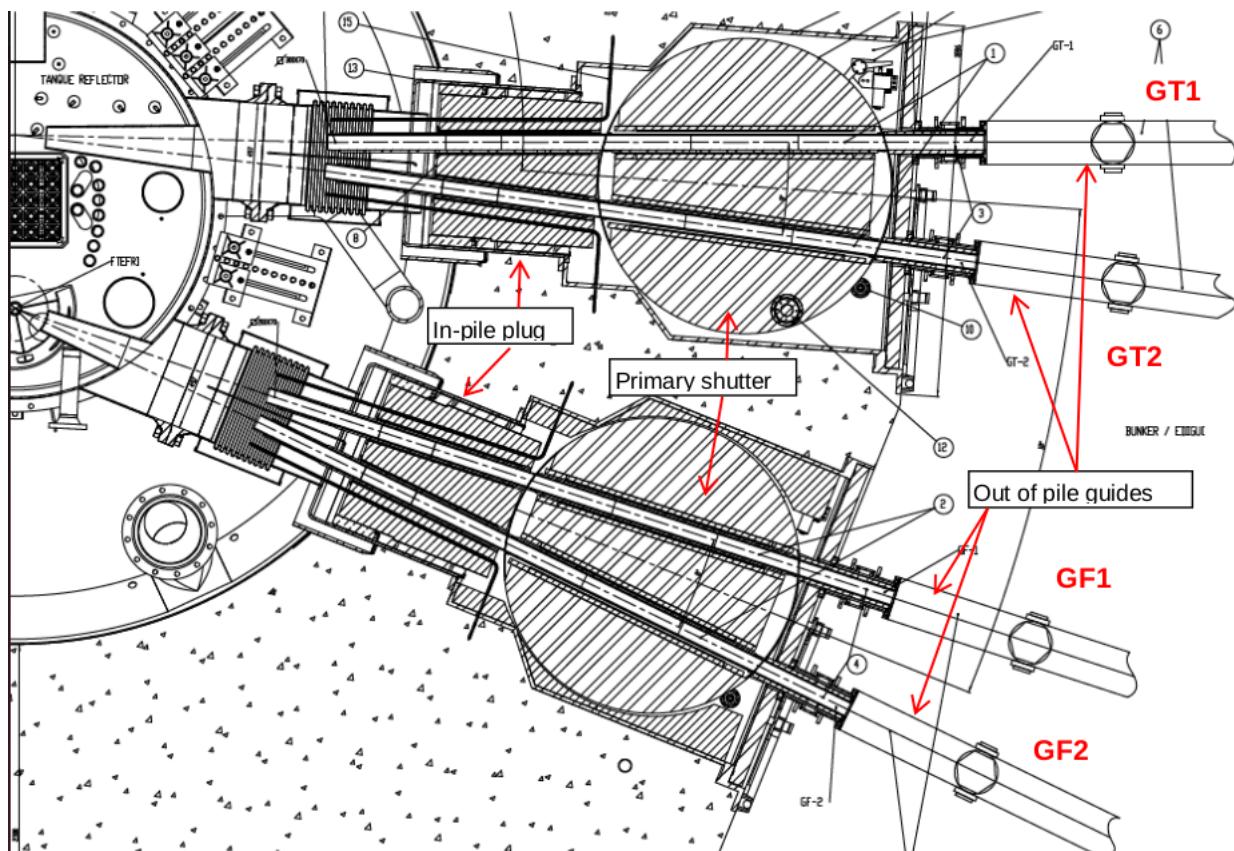


Figura 4.2.2: Haces In Pile térmicos (GT1, GT2) y fríos (GF1a, GF1b, GF2a, GF2b).

Se muestra una vista detallada de las partes principales de la unidad de guía de neutrones In Pile en la Figura 4.2.3.

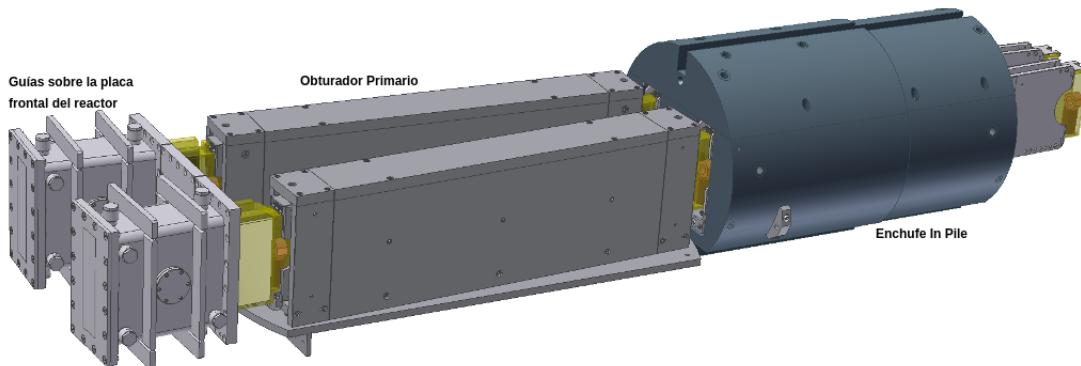


Figura 4.2.3: Vista detallada de una sección In Pile

La Figura 4.2.4 junto con la Tabla 4.2.1 identifican las principales distancias involucradas en el sistema In Pile, que aplican tanto para GF1 como para GF2.

En esta representación, “A” corresponde a un tramo entre el centro de la fuente fría y la entrada de la guía in-pile, “B” y “R” corresponde a una guía recta.

	Sección	m espejos				Longitudes			
		x+	x-	y+	y-	A[m]	B[m]	Gap[m]	R[m]
Guía de Neutrones	Alto x Ancho [mm x mm]								
GF2	200 x 70	3	3	3	3	1.357	1.404	0.004	1.422

Tabla 4.2.1: Longitudes y aberturas de las secciones de guía de neutrones fríos de GF2 In Pile

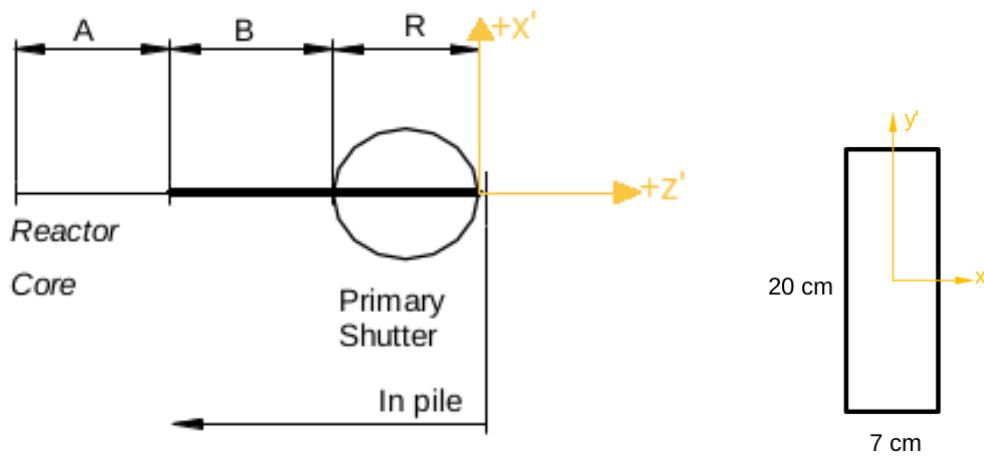


Figura 4.2.4: Esquema de las guías de neutrones

### 4.3. GF2: Out of Pile

La guía GF2 de 200 mm de altura y 70 mm de ancho se divide a la salida de la pared del reactor en dos guías (ver Figura 4.3.1):

- Un canal superior de 120 mm de alto x 70 mm de ancho (**GF2a**) para futuros instrumentos.
- Un canal inferior de 50 mm de alto x 30 mm de ancho (**GF2b**) para un instrumento SANS.

A continuación explicaremos la guía GF2b, ya que es la que está destinada para el instrumento SANS.

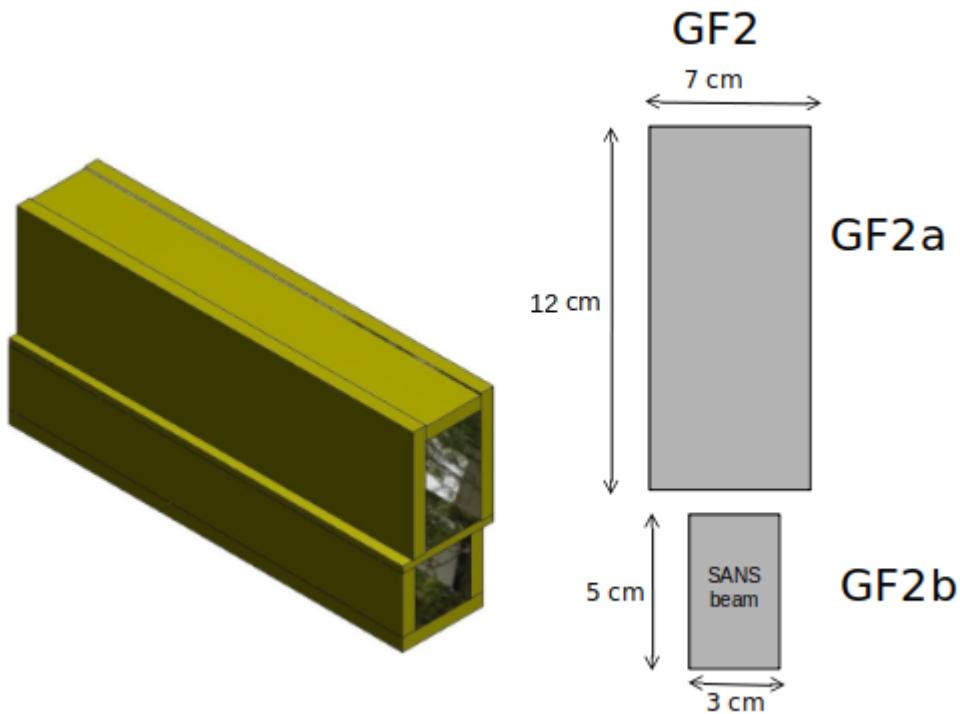


Figura 4.3.1: Construcción de guía de neutrones dividida.

### 4.3.1. GF2b: Guía Curva

La guía de neutrones curva Out of Pile que será utilizada en el proyecto de un *Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN)*, aún no está determinada. Como se mencionó en la Introducción, la *Comisión Nacional de Energía Atómica* ha gestionado la donación de distintos instrumentos ópticos por parte de *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*. En razón de lo expuesto anteriormente el presente trabajo evalúa, entre otras cosas, el desempeño de diferentes diseños de guías, considerados para el transporte de neutrones hasta el instrumento V4 SANS. Dichos diseños se describen a continuación en la Tabla 4.3.1:

Guía de neutrones curva	Sección	m espejos				Longitudes	
		x+	x-	y+	y-	Longitud[m]	Radio de Curvatura[m]
Diseño	Alto x Ancho [mm x mm]						
<i>Diseño I</i>	50 x 30	1	1	1	1	18	929
<i>Diseño II</i>	50 x 30	2	2	2	2	18	929
<i>Diseño III</i>	50 x 30	1	1	1	1	18	1300

Tabla 4.3.1: Longitudes y aberturas de las secciones de guía de neutrones fríos de GF2 In Pile

Todos los diseños presentan la misma sección. El *diseño III* corresponde a la guía *NG3a-Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*, en la cual no se ha realizado ninguna modificación. Esta es la guía que utilizan para el instrumento *SANS* instalado. El diseño I tiene distinto radio de curvatura, ha sido disminuido a 929 m. Este valor de radio de curvatura fue estudiado en diseños preliminares de *CNEA*, por lo que estos resultados permitirán puntos de contacto con dichos trabajos. El punto esencial por el cual se disminuye el radio de curvatura es por el hecho de que al “curvarse” la guía, a la vez se separa más de la guía curva GF2a, por lo tanto la distancia relativa entre ellas es mayor, lo que conlleva simplemente en ventajas de espacio para futuros instrumentos en GF2a o distintos diseños. En principio la guía GF2a tendrá el mismo radio de curvatura que GF2b, por lo que podemos calcular la distancia de separación al final de las guías. Finalmente el diseño II tiene las mismas dimensiones que el diseño I pero el  $m_C$  de la guía aumenta a un valor de 2. Esto se realiza para evaluar si existe necesidad de incrementar el  $m$  de la guía (comparado al usado originalmente en HZB), debido a que el diseño preliminar de GF2 consideraba un  $m_C$  mayor que 1. Por esto, se compararán las distribuciones debidas a estos dos últimos diseños.

Por últimos se simuló la curvatura de todos los diseños de guías curvas en McStas con tramos de guías rectos de 0.5 m de longitud rotados entre sí para generar la curvatura deseada.

Luego de la guía curva GF2b con los posibles diseños ya mencionados, comienza el instrumento *V4 SANS*.

Se muestra un esquema del diseño de la guía curva GF2b en la Figura 4.3.4 en la siguiente sección. En ella también se incorpora la parte In Pile y el instrumento *SANS Multipropósitos*.

### **4.3.2. The Small Angle Scattering Instrument (SANS)**

En el presente trabajo el instrumento *SANS* se ha modelado en 3 partes fundamentales:

- Un selector de velocidades.
- Un sistema de colimación.
- La muestra y el detector.

#### **Selector de Velocidades**

El selector de velocidades simulado tiene un radio de  $R_{sv} = 0.3$  m y el ángulo de las aspas es de  $\alpha_{aspas} = 45^\circ$ . Como ya se mencionó en la introducción del presente capítulo, no necesariamente serán estas las dimensiones finales de este componente. Sin embargo, lo que se intentó reproducir

al fijar estas dimensiones es que  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10\%$  en particular para  $\lambda = 0.5\text{ nm}$ . Esto es, como se verá posteriormente, porque algunos resultados que se obtendrán en este trabajo serán contrastados con información/resultados brindados por *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*, los cuales fueron obtenidos fijando  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10\%$ . Para entender un poco más la programación de este componente, vease Capítulo 2 de la Sección 2.1 página 19.

## Sistema de Colimación

El sistema colimador que se muestra en la Figura 4.3.3 ha sido construido para proporcionar un conjunto variable de distancias de colimación. Un cambio de colimación se puede realizar rápidamente bajo el control de 4 elementos giratorios independientes, cada uno con 3 posiciones. Cada tramo colimador se logra a través de dos aperturas separadas una distancia igual a 4 metros, el largo del tambor. Cada posición puede ser un colimador, una guía de neutrones o un tubo cuya característica ha sido equipar con un láser para ajustar la posición de la muestra en el haz, y con una lámpara para determinar la sección transversal del haz en la muestra. El último tambor (el más cercano a la muestra) es ligeramente diferente del resto. También presenta 3 posiciones pero una de ellas tiene inicialmente un guía de 3 m de longitud. La otra posición tiene un guía de 2 m. En ambos casos, el espacio restante para completar los 4 m, se colocan dos aperturas, una al final de estas guías y otra inmediatamente antes de la muestra. Es decir, que antes de la muestra siempre habrá una configuración de colimación. Finalmente la última posición contiene dos aperturas que originan por si solas una colimación de 4 metros. Están ubicadas al inicio del tambor y antes de la muestra. Este sistema confiere al instrumento 6 distancias de colimación entre 1 m y 16 m.

La sección de todos los tambores, ya sea en su posición de guía o de colimador es de  $50 \times 30\text{ mm}^2$ , igual que la sección de la guía curva GF2b.

Por último, todas las guías de los tambores presentan en sus 4 caras,  $m = 1$

En la Figura 4.3.2 se enseña un modelo a escala del instrumento V4 SANS Multipropósito.

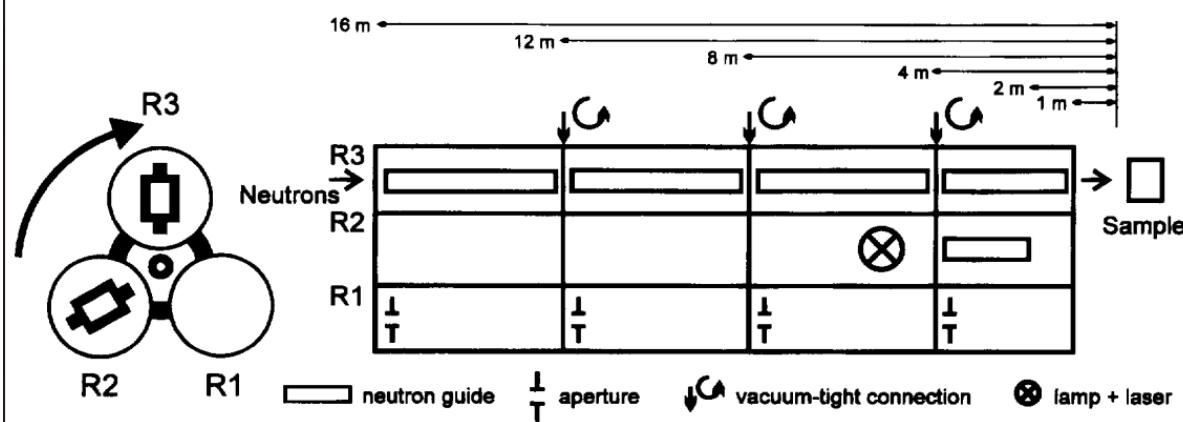


Figura 4.3.2: Sistema colimador. Cuatro elementos de tambor giratorios independientes con conexiones herméticas al vacío que contienen guías y aberturas de neutrones, que producen 6 distancias de colimación entre 1 m y 16 m, o proporcionan una lámpara y un láser para el posicionamiento de la muestra.

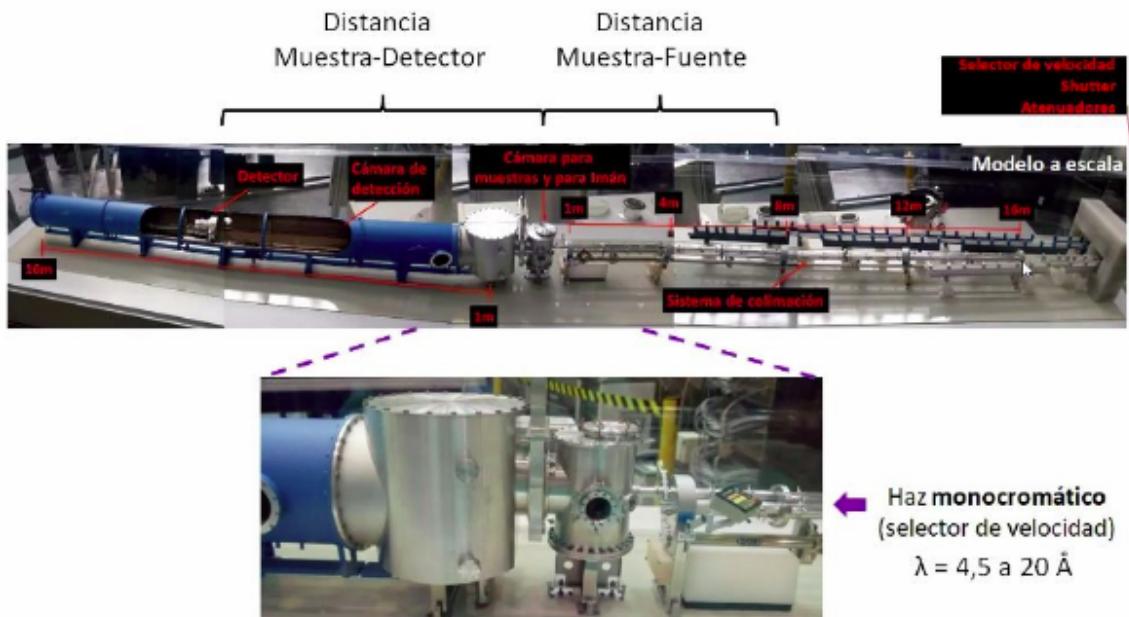


Figura 4.3.3: Modelo a escala del instrumento V4 SANS Multipropósito que se instalará en Argentina.

La Figura 4.3.4 presenta el haz GF2b desde el centro de la fuente fría hasta el final del instrumento SANS. La calidad y dimensiones de los componentes ópticos ya fueron dados en los párrafos anteriores. A su vez, en la Figura 4.4.1 también se puede visualizar un esquema del haz con la posición de los detectores que se explicará en la siguiente sección.



Figura 4.3.4: Haz neutrónico simulado. La simulación comienza en el inicio de la guía In Pile, hasta el detector del instrumento SANS Multipropósito.

Se describe a continuación la configuración de los detectores utilizados.

## 4.4. Descripción de las posiciones de los detectores

A lo largo del haz mostrado en la Figura 4.3.4 se han colocado diferentes detectores. Cada uno de ellos ha sido configurado de una forma especial para obtener resultados deseados.

Se presenta la Figura 4.4.1 que enseña la posición de los detectores a lo largo del haz.

Se han colocado detectores en las posiciones:

- **POS 0:** es el inicio de la guía GF2. Con el objetivo de poder comparar las distribuciones generadas por la fuente de distribución con respecto a la fuente de tracks. En esta posición se encuentra la fuente de distribuciones.
- **POS 1:** con el objetivo de analizar la influencia de las guías In Pile sobre la corriente neutrónica a la salida de las mismas.
- **POS 2:** con el objetivo de analizar la influencia de las guías curvas sobre la corriente neutrónica a la salida de las mismas. A su vez, comparar los resultados de los distintos diseños descriptos en el Capítulo 4 de la Sección 4.3.1 página 37.
- **POS 3:** con el objetivo de analizar la influencia del selector de velocidades sobre la corriente neutrónica a la salida del mismo.
- **POS 4:** con el objetivo de analizar la influencia del sistema colimador sobre la corriente neutrónica a la salida del mismo.
- **POS 5:** la posición 5 es el detector propiamente del instrumento SANS. Por lo tanto, simularemos un experimento sencillo para observar la dispersión de neutrones en bajo

ángulo.

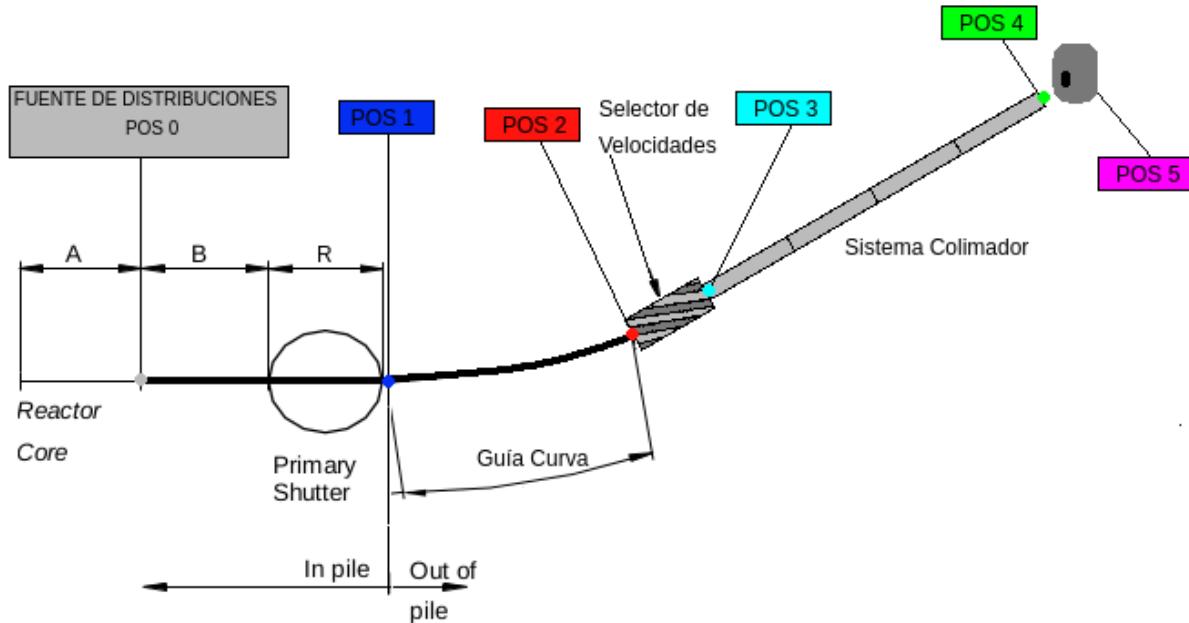


Figura 4.4.1: Diagrama general de todo el haz que alimenta al instrumento SANS simulado en McStas. Desde la posición POS 0 en la entrada de la guía in pile hasta la posición POS 5, en el detector del instrumento SANS. Se observa la guía curva (cuya radio de curvatura se ha dibujado exagerado). La guía será simulada con las dimensiones de los diseños descriptos.

# Capítulo 5

## Resultados In pile

### 5.1. Fuente de tracks vs Fuente de Distribuciones

Con el fin de producir en forma acorde las fuentes de distribuciones, primero fue necesario caracterizar adecuadamente las fuentes de tracks. Para esto, nos valemos de la información de trabajos previos que se citan en la Ref. [8], por lo que, en este trabajo, no se presentarán dichos resultados y se configurarán los parámetros descriptos de la fuente de distribución en base a ellos.

Para comparar el desempeño de la fuente de distribuciones con respecto a la fuente de tracks, se tuvo en cuenta que se cumplieran dos condiciones. La primera es que las discretizaciones usadas permitiesen una representación suave de la distribución en cada una de las variables. Para la segunda condición, se toma como figura de mérito la relación  $F$  entre la corriente integral generada por la fuente de distribuciones ( $J_T^D$ ) y la corriente integral generada por la fuente de tracks ( $J_T^T$ ) en distintas posiciones a lo largo del haz. Es decir:

$$F = \frac{J_D^+}{J_T^+}$$

Se estableció que la magnitud  $F$  calculada en los puntos de utilización del haz tuviese un valor superior a 0.9.

Se obtienen las distribuciones neutrónicas en la posición cero (POS 0), es decir, al inicio de la guía GF2. Dichas distribuciones fueron obtenidas mediante la fuente de tracks como con la fuente de distribuciones. Se presentan ambos resultados sobre un mismo gráfico con la intención de constatar discrepancias. Particularmente para la distribución en  $\phi$  se presenta el factor de mérito  $F$  para cada punto calculado de dicha distribución. Se omite este gráfico para las demás distribuciones dado la similitud en los mismos.

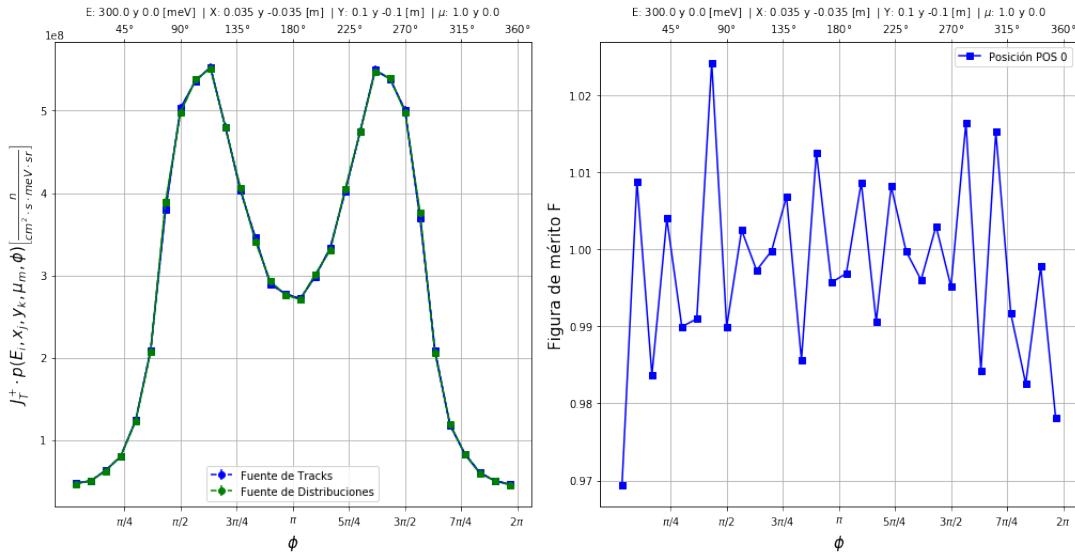


Figura 5.1.1: Distribución angular en  $\phi$  al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. En verde, la fuente de distribuciones. En azul, la fuente de tracks.

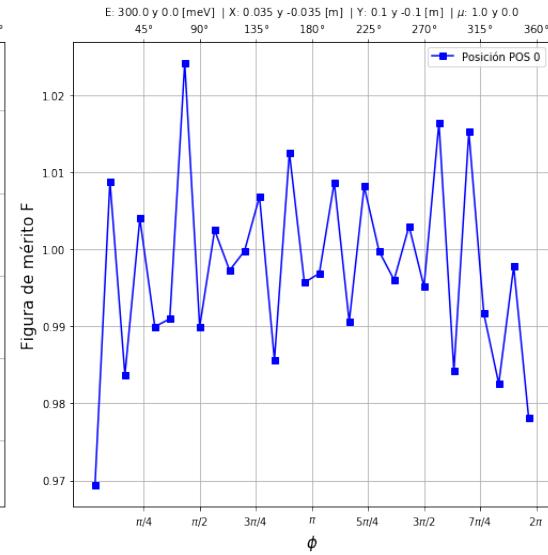


Figura 5.1.2: Factor de mérito  $F$  calculado con todos los puntos de la distribución angular en  $\phi$  al inicio de la guía GF2.

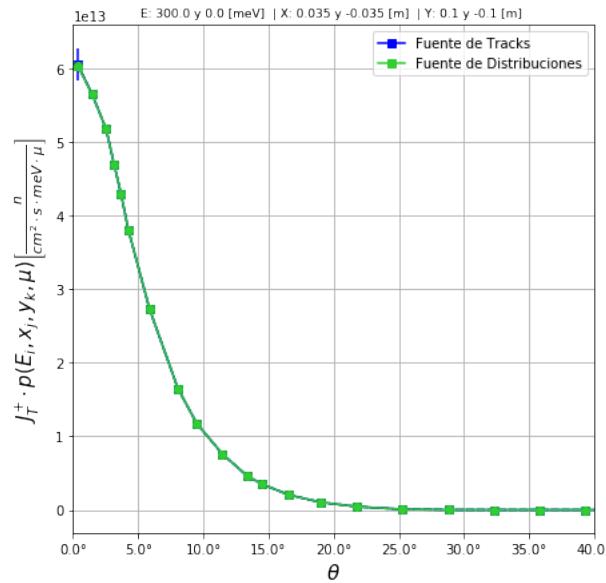


Figura 5.1.3: Distribución angular en  $\mu$  al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. En verde, la fuente de distribuciones. En azul, la fuente de tracks.

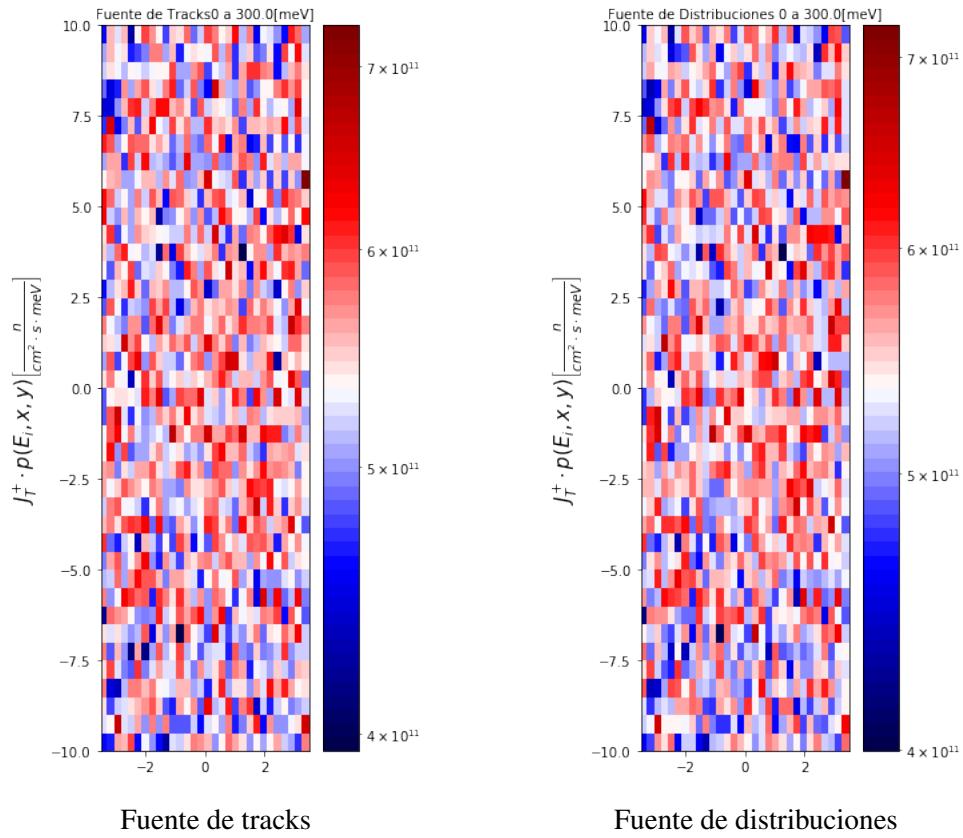


Figura 5.1.4: Distribución espacial al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. A la derecha, la fuente de distribuciones. A la izquierda, la fuente de tracks.

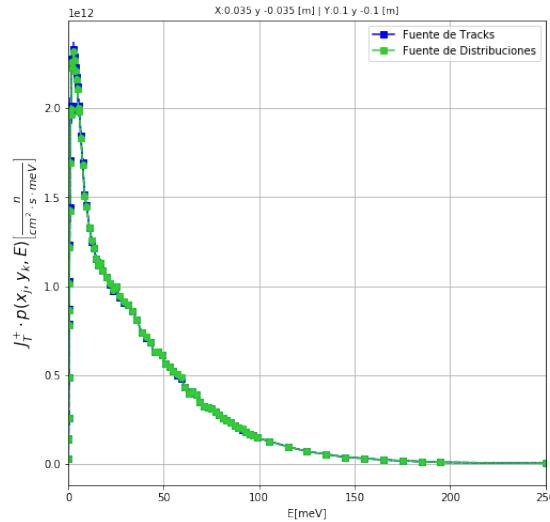


Figura 5.1.5: Distribución espectral al inicio de la guía GF2 con dos fuentes. En verde, la fuente de distribuciones. En azul, la fuente de tracks.

En la Tabla 5.1.1 se presentan cálculos integrales de la corriente en las posiciones POS 0, POS 1 y POS 2. La guía curva utilizada para la obtención de estos resultados fue el *Diseño I*.

Posición del experimento	Magnitud Calculada	Valor calculado para tracks	Valor calculado para distribuciones	Error porcentual [%]	F
POS 0	$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$	5.78E+11	5.78E+11	0.01	1
POS 1	$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$	2.74E+10	2.69E+10	1.79	0.98
POS 2	$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$	1.30E+09	1.25E+09	3.85	0.96

Tabla 5.1.1: Corriente total  $J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$  en distintas posiciones calculada con la fuente de tracks y la fuente de distribuciones. Se presenta también el error porcentual y la relación F definida anteriormente.

Se observa en las Figuras 5.1.1, 5.1.3, 5.1.4 y 5.1.5 las distribuciones resultantes de la fuente de tracks y la fuente de distribuciones. La Tabla 5.1.1 presenta la corriente total  $J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$  en las posiciones POS 0, POS 1, POS 2 (ver Figura 4.3.4) calculada con la fuente de tracks y la fuente de distribuciones. Se presenta también el error porcentual y la relación F definida como  $\frac{J_D^+}{J_T^+}$ .

En primer lugar, las curvas correspondiente a cada fuente se solapan entre sí, indicador de que efectivamente la fuente de distribución reproduce las distribuciones correctamente. Para el caso de la Figura 5.1.4, en la cual se observa la distribución espacial, en ambos casos la corriente está distribuida uniformemente.

Por otro lado, el error de la corriente integral total, da menor al 5 % en las 3 posiciones calculadas y el factor de merito tomado F, es mayor a 0.9 también en las 3 posiciones.

Cabe destacar que no se han incluido en este análisis el resto de las posiciones (POS 3, POS 4 y POS 5) por el hecho que para el caso, la fuente de tracks no alcanza la estadística para analizar las distribuciones correctamente y tampoco obtener resultados integrales con poco error, como se mencionó en Capítulo 2 de la Sección 2.2 página 20

De ahora en adelante, los resultados que se presenten en este trabajo, serán obtenidos utilizando la fuente de distribuciones.

### 5.1.1. Análisis de $\phi$ en la posición POS 0

Finalmente, se realiza un análisis de la variable de las distribuciones angular  $\phi$ . La Figura 5.1.6 es una esquema que muestra el lugar en el cual se grabó la fuente de tracks, la entrada a la guía

GF2 (POS 0) y la fuente de distribuciones. Estas dos últimas posiciones representan el mismo lugar, es decir, la fuente de distribuciones esta ubicada a la entrada de la guía.

La línea de trazos representa el centro geométrico de la superficie donde se grabó la fuente de tracks. Notar que la guía se encuentra desplazada de este eje. Esto produce que más neutrones que se encuentran en un entorno de  $\phi = 180^\circ$  entrarán a la guía. Del mismo modo, neutrones que se encuentren en un entorno de  $\phi = 0^\circ$ , se verán disminuidos en cantidad a la entrada de la guía. Recordemos que el sistema de referencia es el que se encuentra intrínseco a la guía, dibujado al final de la misma en la Figura 5.1.6. Ese sistema de referencias se encuentra rotado  $-4^\circ$  con respecto al eje  $y$  (perpendicular al dibujo) de un sistema de referencia cuyo eje  $z$  es normal a la superficie donde se grabó la fuente de tracks. Sin embargo, esta rotación es muy pequeña.

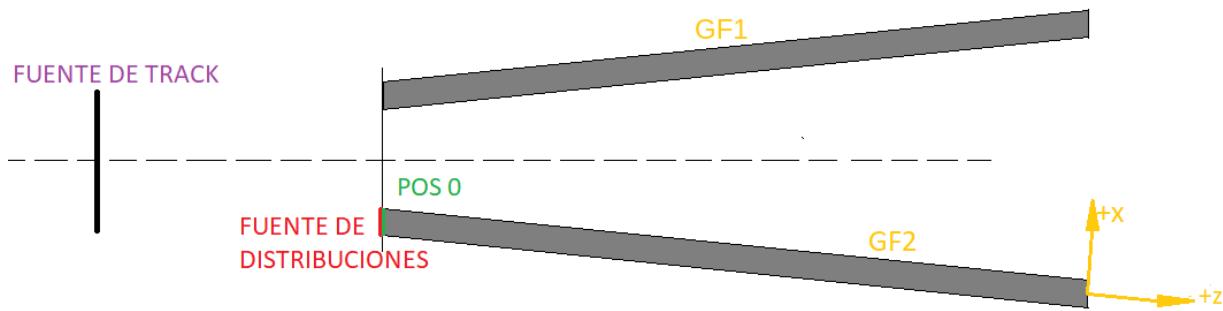


Figura 5.1.6: Representación esquemática de la posición de la entrada de la guía GF2 y la posición donde fue grabada la fuente de tracks, en la entrada de los tubos de vuelo.

Por otro lado, vemos que es mayor la corriente neutrónica para ángulos cercanos a  $\phi = 90^\circ$  y  $\phi = 270^\circ$ . Este efecto se debe a que la superficie de entrada de la guía es más alta que ancha, por lo que la posición central a la salida posee mayor longitud visible de fuente (fuente de tracks) en sentido vertical que en el horizontal.

## 5.2. Guia GF2: In Pile

Se presentan únicamente los resultados en la posición POS 1, dado que los resultados en la posición POS 0 ya fueron presentados. Sin embargo, se contrastarán los resultados de ambas posiciones para remarcar la influencia de las guías de neutrones sobre las distribuciones.

La Figura 5.2.1 es un esquema que presenta las guías de neutrones GF2, GF2a y GF2b. El detector se ha dibujado en azul y se encuentra al inicio de la guía GF2b. Por lo tanto, los resultados

que presentaremos en las siguientes figuras serán correspondientes a esta posición y se encuentran en la referencia del sistema de coordenadas verde, intrínseco a la guía GF2b. Es decir, el punto ( $x = 0, y = 0$ ) se encuentra sobre el eje de simetría de la guía GF2b, dibujado en color verde.

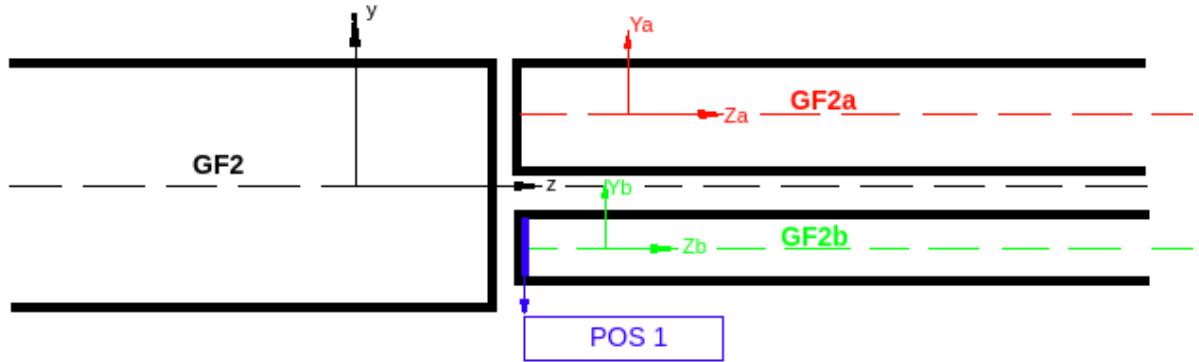


Figura 5.2.1: Esquema de la división de la guía GF2 en dos guías: GF2a y GF2b. Se observa además detector en azul ubicado en la posición POS 1. El detector se encuentra referenciado en el sistema de coordenadas de color verde.

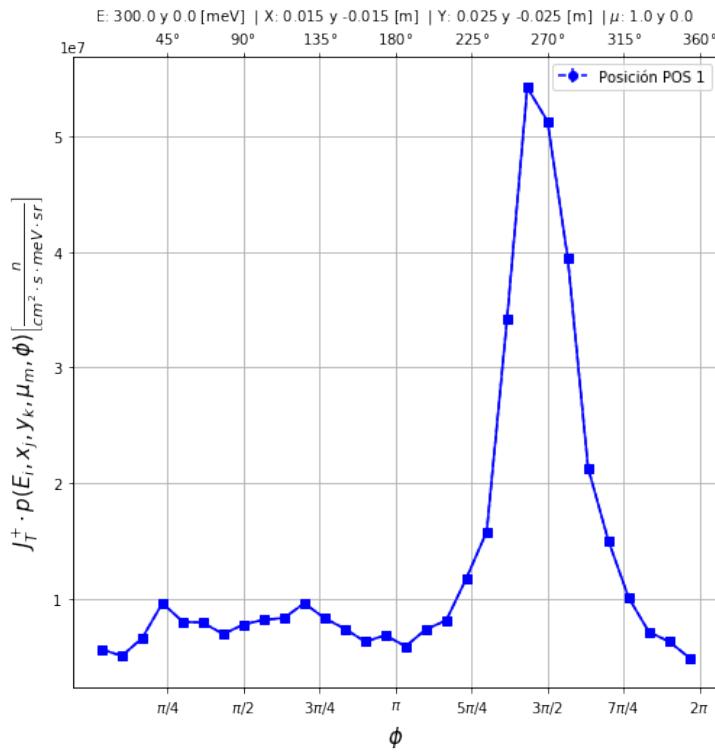


Figura 5.2.2: Distribución neutrónica en  $\phi$  en la posición POS 1

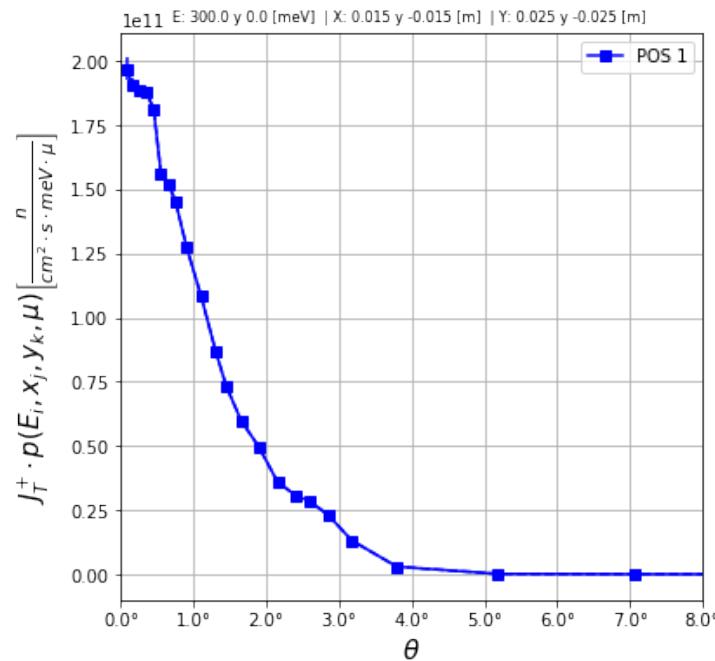
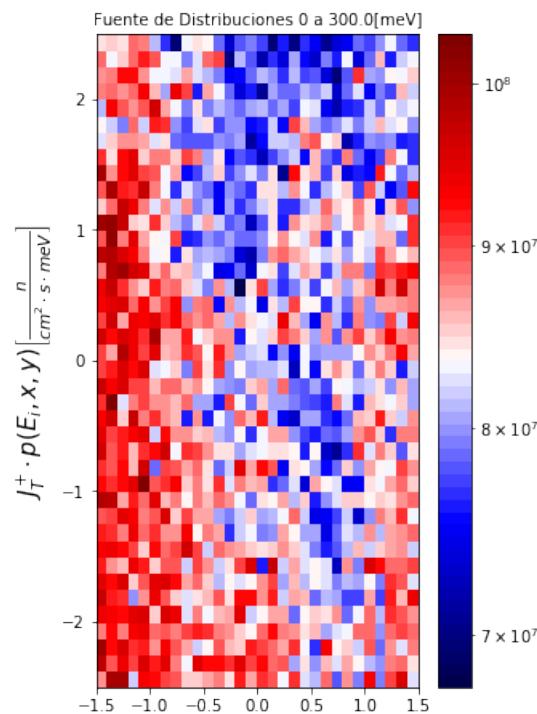
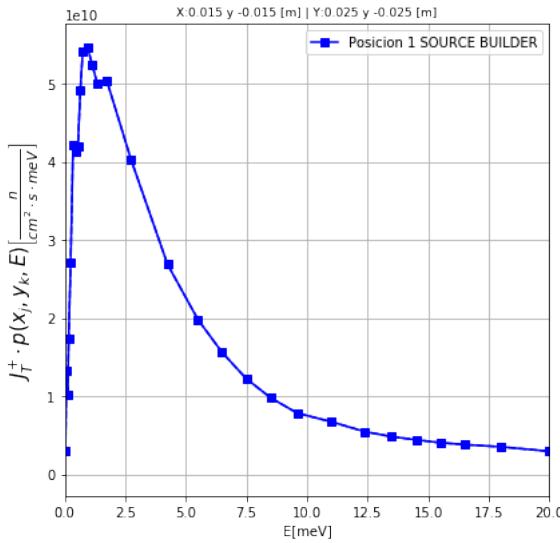
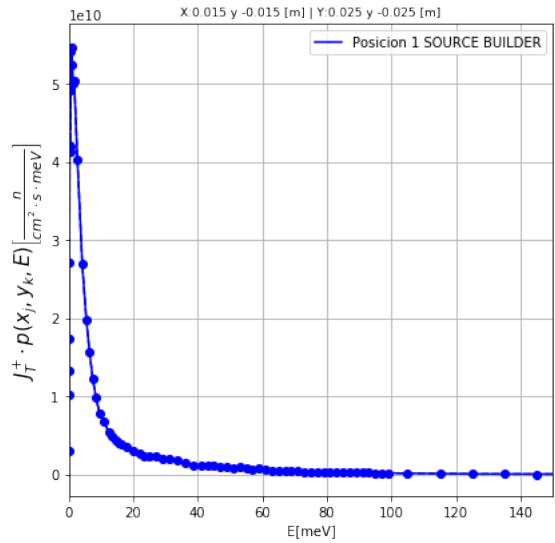
Figura 5.2.3: Distribución neutrónica en  $\mu$  en la posición POS 1

Figura 5.2.4: Distribución neutrónica espacial en la posición POS 1



Distribución neutrónica espectral en posición POS 1. Se muestra el espectro hasta 20 meV.



Distribución neutrónica espectral en posición POS 1. Se muestra el espectro hasta 150 meV.

Figura 5.2.5: Distribución neutrónica espectral en la posición POS 1. A la izquierda se muestra el espectro hasta 20 meV. A la derecha se muestra el espectro hasta 150 meV.

### 5.2.1. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 1

Comienza el estudio con el análisis de la variable  $\phi$ . La Figura 5.2.2 muestra una distribución cercana a ser uniforme salvo en un entorno de  $\phi = 270^\circ$ . La corriente en este entorno es 5 veces superior a la corriente en cualquier otro valor de  $\phi$ . Para explicar este comportamiento basta entender la configuración de la guía GF2 y GF2b. En la Figura 5.2.1 se observa que la guía GF2b esta por debajo del eje de simetría de la GF2. En la Figura 5.1.4 se observó que la distribución espacial es bastante uniforme. Por consiguiente, los neutrones de la mitad superior de la guía GF2 deben tener un ángulo cercano a  $\phi = 270^\circ$  para poder ingresar a la guía GF2b. Los demás neutrones tendrán mayor dificultad para ingresar. Esto hace que se presente un pico en la corriente para este ángulo por sobre los demás ángulos. Dicho de otra forma, podemos inferir que la gran mayoría de los neutrones que atraviesan la superficie del detector con ángulos cercanos a  $\phi = 270^\circ$ , provienen de la mitad superior de la guía GF2. Luego se analiza la distribución angular en  $\mu$  y en energía; se observa que la divergencia se reduce a  $\theta \sim 5^\circ$  máximo, frente a los  $25^\circ$  máximos reflejados en la posición POS 0. Lo mismo sucede con la energía, reduciéndose de 200 meV máximos en la posición POS 0 a 140 meV máximos en la posición POS 1. Se espera que la reducción de los valores máximos de estas variables sean consecuentes con las propiedades de reflectividad de la guía. Podemos condensar estos resultados de estas dos variables,  $\mu$  y

$E$ , en una única variable:  $Q$ , el cambio de momento en la dirección normal de la guía(véase la ecuación 1.1). Para ello se presenta las Figuras 5.2.6 y 5.2.7. Ambas figuras fueron calculadas en la posición POS 1. En la primera se calcula la intensidad  $I$  definida en el capítulo 3 como  $I = \sum_{i=0}^N p_n^i$  en función del parámetro  $Q$  definido en la introducción (véase la ecuación 1.1). En la segunda también se calcula la intensidad  $I$  en función del parámetro adimensional  $m$  definido en la introducción (véase la ecuación 1.2). Los anchos  $\Delta Q$  y  $\Delta m$  se mantienen constantes para poder comparar las intensidades.

Las guías in Pile tienen en sus cuatro caras  $m = 3$ . Es por eso que en la posición POS 1, el flanco de bajada está cercano a este valor.

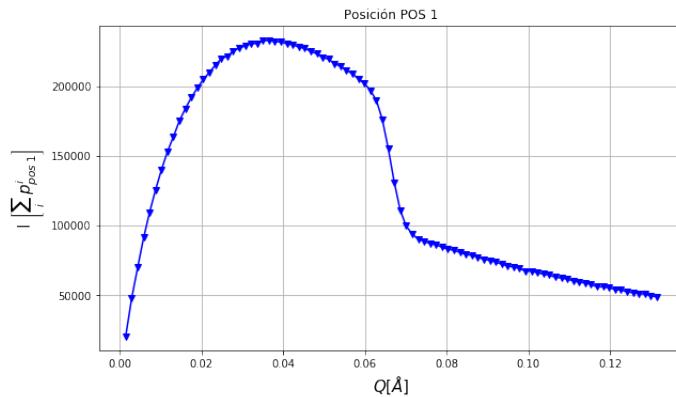


Figura 5.2.6: Discretización de la intensidad  $I$  en función del cambio en la componente normal del impulso del neutrón  $Q$  calculada en la posición POS 1. Todos las discretizaciones de  $Q$  presentan el mismo ancho  $\Delta Q$ , con el fin de poder comparar las intensidades.

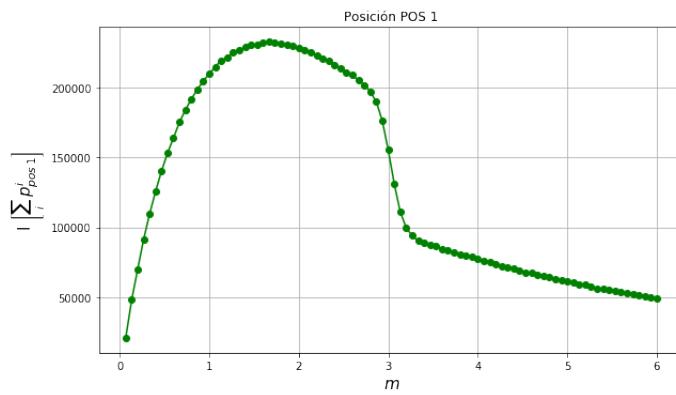


Figura 5.2.7: Discretización de la intensidad  $I$  en función del parámetro adimensional  $m$ . Todos las discretizaciones de  $m$  presentan el mismo ancho  $\Delta m$ , con el fin de poder comparar las intensidades.

# Capítulo 6

## Resultados Out of Pile

Como se mencionó, la guía de neutrones curva Out of Pile que será utilizada *Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN)*, aún no está determinada. El presente trabajo evalúa el desempeño de distintos diseños considerados, que han sido descriptos en el capítulo anterior. Se comienza por el diseño I.

### 6.1. Guía Curva Out of Pile: Diseño I

Se inicia el análisis con la presentación de Tabla 6.1.1. En ella se calcula la corriente total en la posición POS 2 y el intervalo en  $\theta$  y  $E$  que presentan máximos de intensidad, denotado como  $\Delta\theta$  y  $\Delta E$  respectivamente, el rango de energía y divergencia donde la intensidad es máxima. Se recuerda al lector que:  $\theta = \cos^{-1} \mu$

Posición	Diseño	Magnitud Calculada	Valor calculado
POS 2	I	$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2.s} \right]$	1.25E+09
POS 2	I	$\Delta\theta(J_{max})$	0.11° - 0.19°
POS 2	I	$\Delta E(J_{max})$	0.30 - 0.35 meV

Tabla 6.1.1: Datos integrales obtenidos en la posición POS 2 para el diseño I. Se ha calculado la corriente total, el valor del intervalo de divergencia en el cual la intensidad es máxima y finalmente el valor del intervalo de energía en el cual la intensidad es máxima.

Luego se presentan las Figuras 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 y 6.1.4. En estas figuras se muestran las distribuciones neutrónicas correspondiente a la posición POS 2, es decir, al final de la guía curva. En

estas figuras y al igual que los resultados mostrados en los capítulos anteriores, se ha colocado solo un macro grupo en todas las variables de correlación, de esta forma podemos tener una caracterización más integral de la corriente neutrónica.

En esta sección, se adelanta, que se analizará particularmente la distribución en  $\mu$  y  $E$ , utilizando mayor cantidad de macro grupos de correlación.

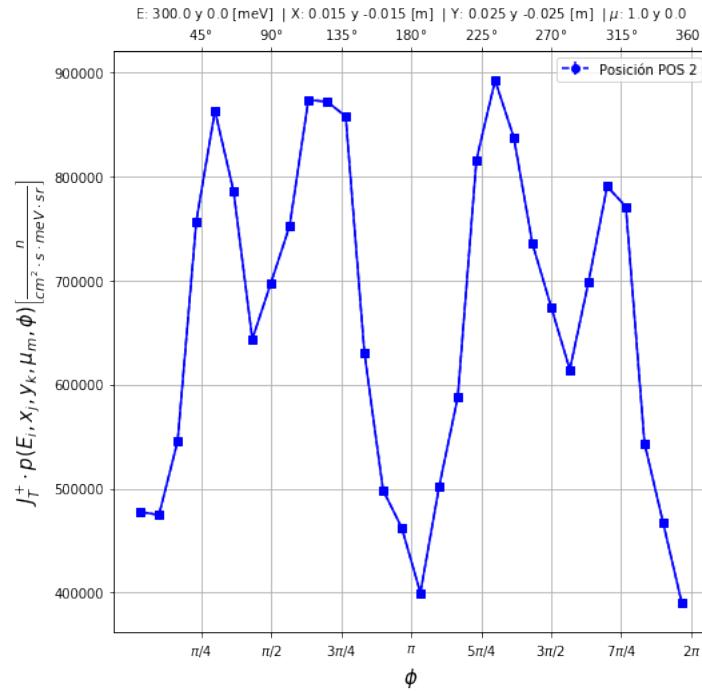


Figura 6.1.1: Distribución angular en  $\phi$  en la posición POS 2, a la salida de la guía curva.

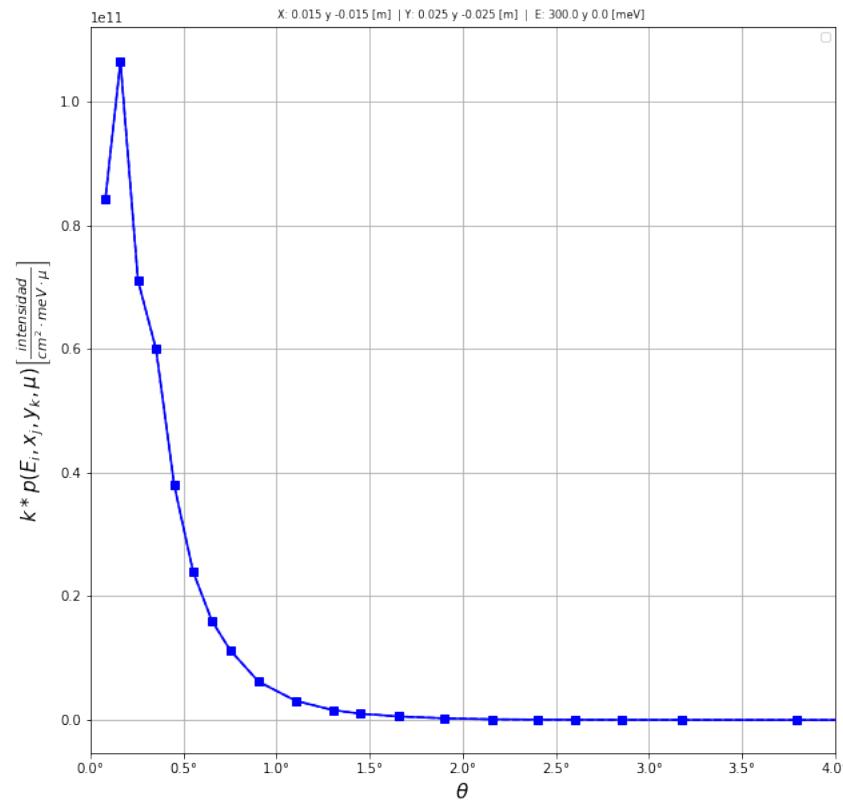


Figura 6.1.2: Distribución angular en  $\mu$  en la posición POS 2, a la salida de la guía curva.

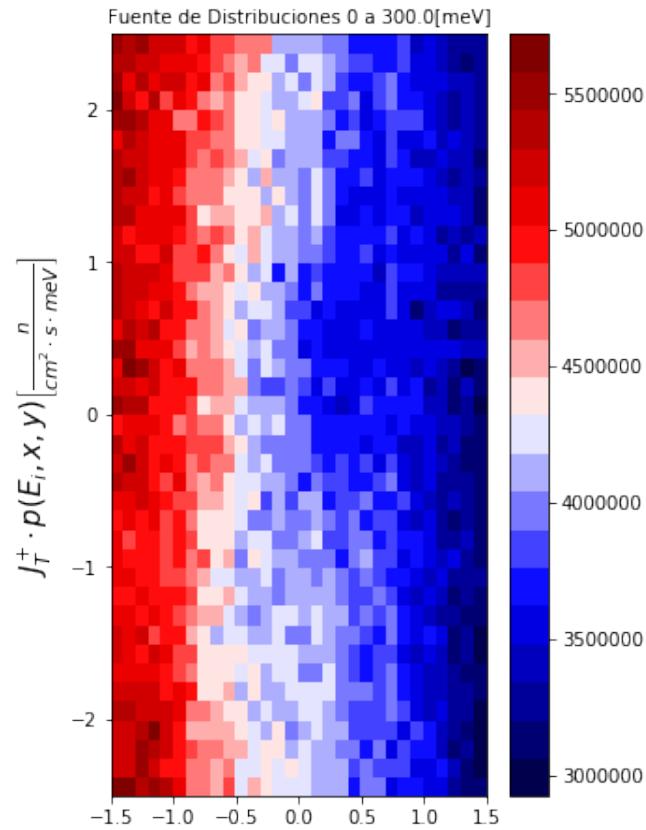


Figura 6.1.3: Distribución espacial en la posición POS 2, a la salida de la guía curva.

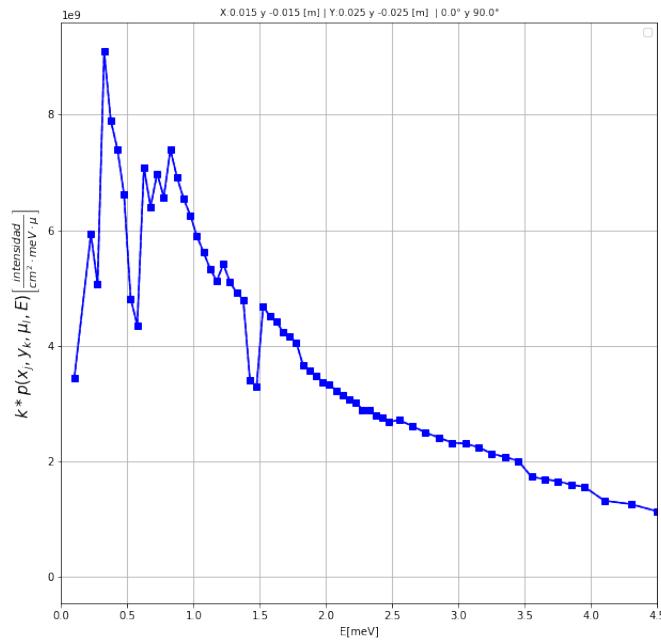


Figura 6.1.4: Distribución espectral en la posición POS 2, a la salida de la guía curva.

### 6.1.1. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 2

Se comienza el análisis con la observación de la distribución en  $\phi$  de la Figura 6.1.2. Una característica notoria es el valle presente en el entorno de  $\pi$  diferenciado del resto de los valores de  $\phi$ . Por otro lado, si se observa la distribución espacial, se distingue claramente un sesgo espacial en la distribución neutrónica hacia la izquierda de la figura. Como se observó en la introducción, las guías curvas dan lugar a las reflexiones de Garland y las mismas se desarrollan en la pared externa de la guía (circunferencia externa), produciendo este sesgo. Recordemos que el eje positivo  $x$  se encuentra apuntando el centro del “arco de circunferencia” que describe la guía. A su vez, neutrones que experimentan reflexiones de Garland no pueden reflejarse con  $\phi = \pi$  dado que se encuentran en la pared externa y como la distribución espacial esta mayoritariamente sobre este lado, se genera el valle observado en un entorno de  $\pi$ .

Finalmente para las variables  $\mu$  y  $E$  se limita a decir que ambos valores máximos apreciables han disminuido si se comparan los resultados con los obtenidos en la posición POS 1. Para entender mejor esta observación, se muestran las Figuras 6.1.5 y 6.1.6. En ellas se ha graficado la intensidad  $I$  en función del parámetro  $Q$  y el parámetro adimensional  $m$  respectivamente. Se recuerda que los anchos  $\Delta Q$  y  $\Delta m$  se mantienen constantes para poder comparar las intensidades de cada bin.

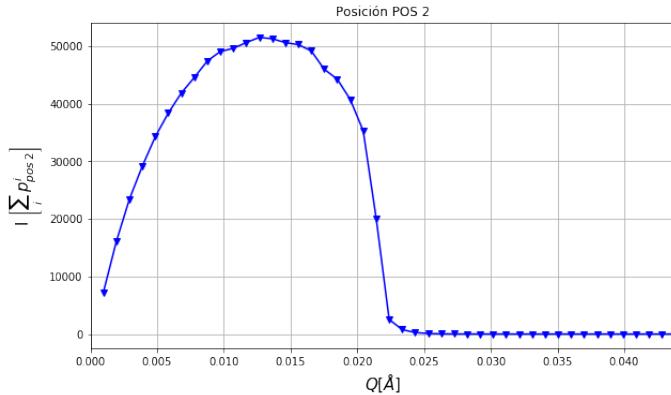


Figura 6.1.5: Discretización de la intensidad  $I$  en función del cambio en la componente normal del impulso del neutrón  $Q$  calculada en la posición POS 2. Todos las discretizaciones de  $Q$  presentan el mismo ancho  $\Delta Q$ , con el fin de poder comparar las intensidades.

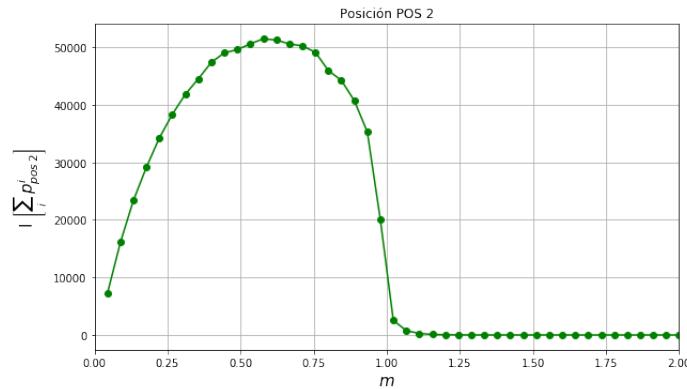


Figura 6.1.6: Discretización de la intensidad  $I$  en función del cambio en la componente normal del impulso del neutrón  $m$  calculada en la posición POS 2. Todos las discretizaciones de  $m$  presentan el mismo ancho  $\Delta m$ , con el fin de poder comparar las intensidades.

Nuevamente la influencia de las guías de  $m = 1$  (correspondiente al diseño I) es relevante en estos resultados, es por eso que en la posición POS 2, el flanco de bajada está cercano  $Q = 0.0219\text{\AA}^{-1}$  o  $m = 1$ .

Como se mencionó, estas últimas figuras de  $I$  vs  $Q$  y  $I$  vs  $m$  respectivamente fueron calculadas para la posición POS 2, es decir a la salida de la guía curva. El lector podría preguntarse cuál es el  $Q$  o  $m$  que se está analizando. O mejor dicho cuál es el valor de  $Q$  o  $m$  que acusan los neutrones al reflejarse en una guía, si la misma no continúa dado que es el final de ella. La respuesta está en que el valor de  $Q$  y  $m$  calculado se ha modelado con una guía ficticia infinita tangente al eje z (y a la vez este es siempre transversal a la sección de la guía) que tiene su inicio en la posición POS 2.

### 6.1.2. Análisis de la variable $\mu$ y $E$

Ya se mencionó que se analizará con mayor detalle las variables  $\mu$  y  $E$  dado que son de gran importancia para el desarrollo de distintas prácticas en el instrumento SANS que esta guía alimenta. Para este análisis se han utilizado dos detectores ya descriptos en el capítulo 2. El primero tiene macro grupo de energía y micro grupos de  $\mu$ . Obsérvese que este detector se consigue fácilmente a través del detector 2 si se configura a los macro grupos espaciales  $x$  e  $y$  con un macro grupo cada uno que abarque la totalidad de la sección de la guía. La idea por la que se pretende utilizar este detector se fundamenta en poder ver la divergencia de neutrones que cada grupo de energía lleva. Su necesidad radica por ejemplo, en la configuración del selector de velocidades, si se configura la frecuencia de giro de modo que seleccione un rango de energía, se logra conocer o estimar la divergencia de los neutrones seleccionados.

Por otro lado, también se podría estar interesado en lo opuesto a lo mencionado, es decir, elegir algún rango de divergencia y desear conocer la distribución espectral asociado a dicho rango. Para lograr este propósito se recurre al detector 4, el cual presenta macro grupos de  $\mu$  y micro grupos de  $E$ .

Los resultados se muestran a continuación.

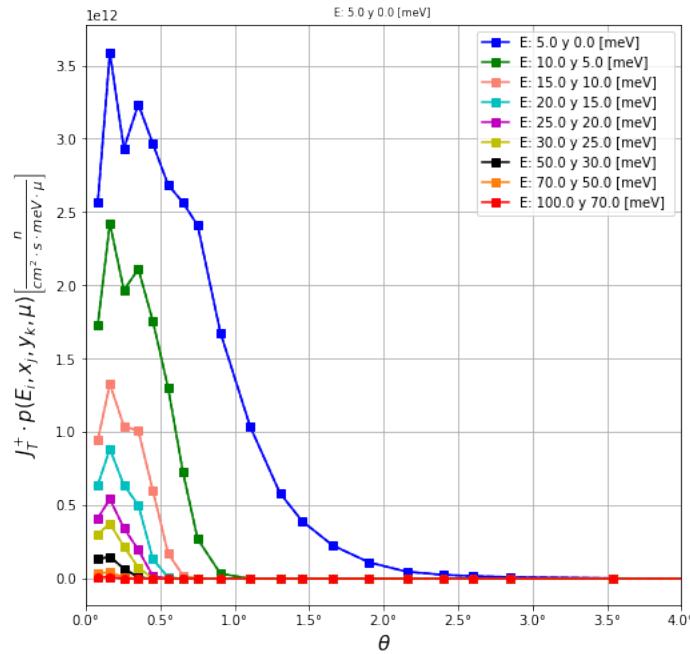


Figura 6.1.7: Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía.

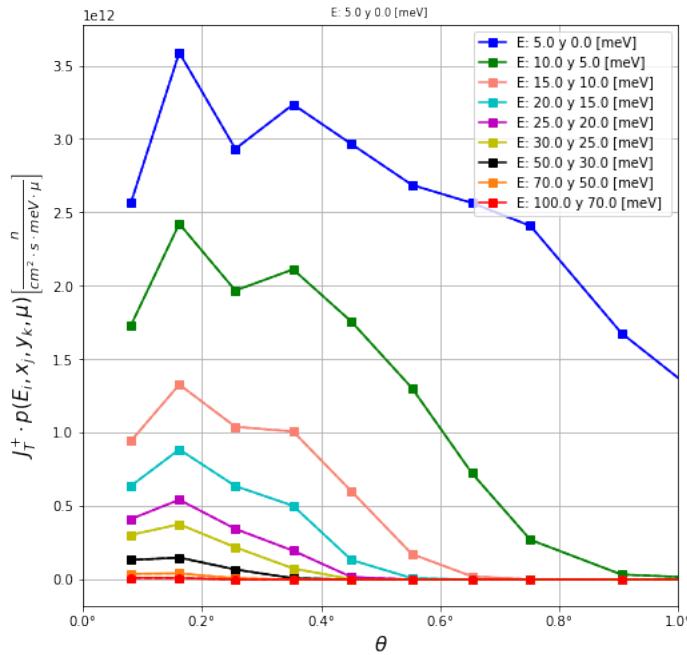


Figura 6.1.8: Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía.(Continuación. Zoom 1)

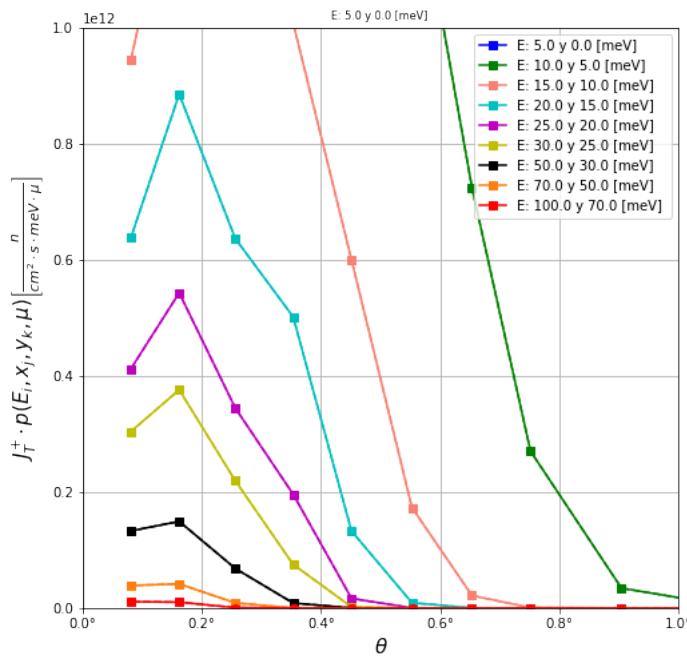


Figura 6.1.9: Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía.(Continuación. Zoom 2)

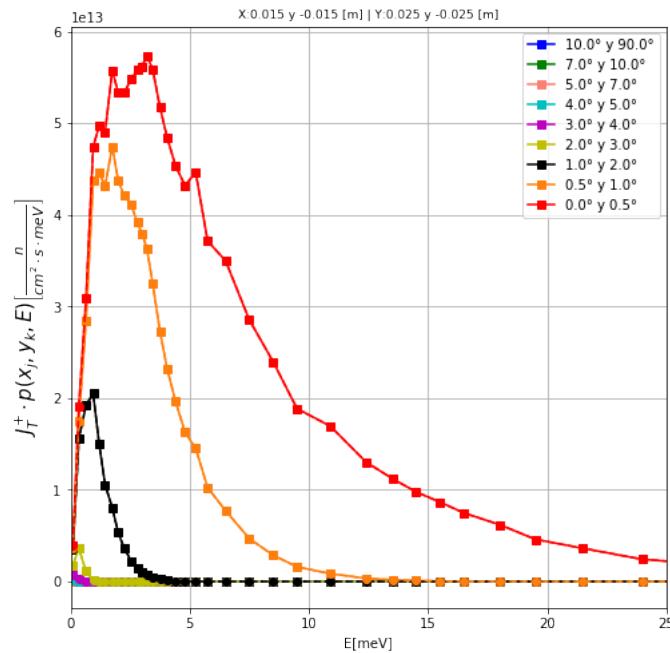


Figura 6.1.10: Espectro de neutrones para distintos grupos de  $\mu$ .

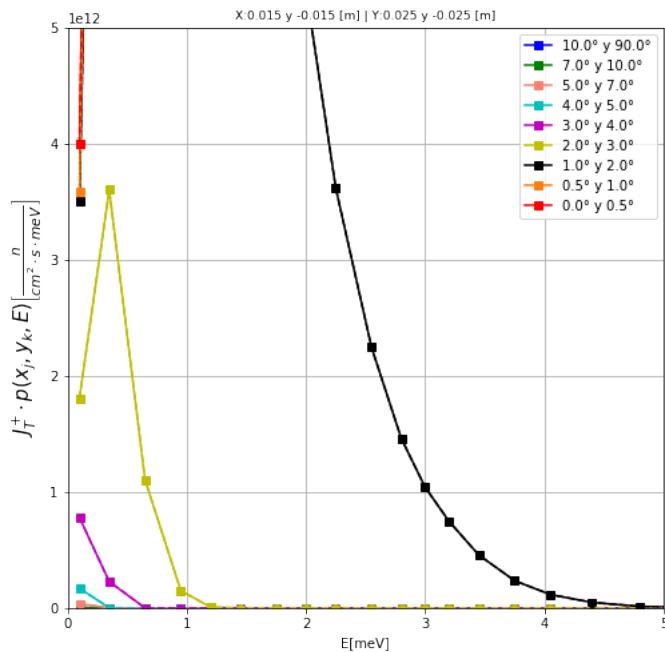


Figura 6.1.11: Espectro de neutrones para distintos grupos de  $\mu$ .(Continuación. Zoom 1)

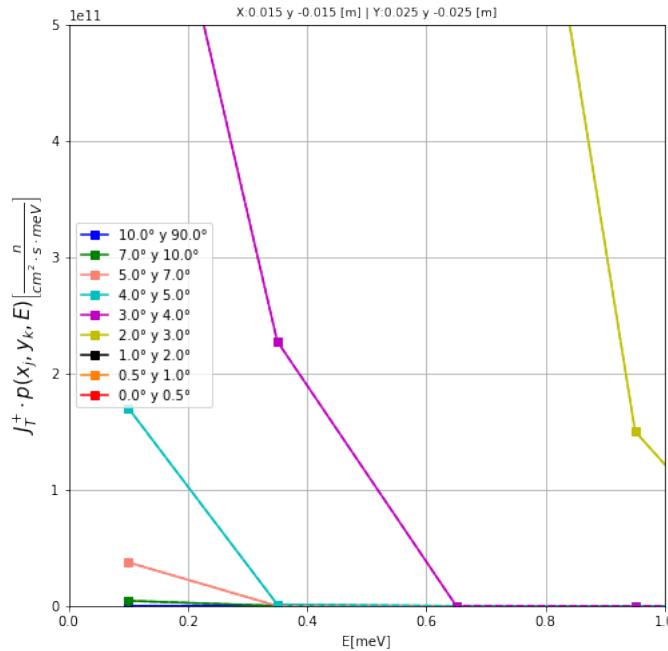


Figura 6.1.12: Espectro de neutrones para distintos grupos de  $\mu$ .(Continuación. Zoom 2)

La Figura 6.1.7 muestra la divergencia de neutrones presentes en distintos macro grupos de energías, como se explicó anteriormente. Primero consideremos observar las intensidades. El grupo que comprende energías de 0 meV hasta 5 meV es el más intenso. Como es el grupo menos energético, la guía admite mas neutrones de este que de otros grupos. A su vez, por la misma razón, este grupo es el que mayor divergencia presenta.

En el orden de crecimiento de la energía, los grupos van reduciendo su intensidad y su divergencia, donde puede apreciarse este efecto es en las Figuras 6.1.8 y 6.1.9. Obsérvese que los últimos dos grupos de energía casi no presentan neutrones. Como se mencionó en la introducción, las longitudes de onda típicas para el instrumento SANS se encuentran entre 4 y 20 Å. Esto es equivalente a energías que van desde 5 meV a 0.2 meV. Por lo tanto necesitamos realizar una discretización en macro grupos de energías para energías mas bajas.

Por otro lado, la Figura 6.1.10 se observan ahora distintas distribuciones espectrales para macro grupos de  $\mu$ . El grupo con menor divergencia es el más intenso y además el que mayor rango energético presenta. Disminuye el espectro en intensidad y rango de energía a medida que aumenta la divergencia de los grupos, al igual que el análisis con los grupos de energía. La explicación es análoga para el caso de la energía. Los grupos que tengan mayor divergencia, también tendrán sus neutrones mayor ángulo de incidencia, con respecto al plano de la guía y para que sean reflejados deben poseer energías cada vez menores, con lo que se explica el comportamiento de las curvas. Otra vez se logra responder el interrogante por el cuál se inició el

análisis.

A continuación se presentan las Figuras 6.1.13 y 6.1.14, en las cuales el análisis anterior es el mismo pero enfocado a bajas energía y bajas divergencias. Es importante el estudio en estos rangos dado que muchas de las prácticas futuras realizadas en el instrumento SANS precisan pequeñas energías y la menor divergencia posible.

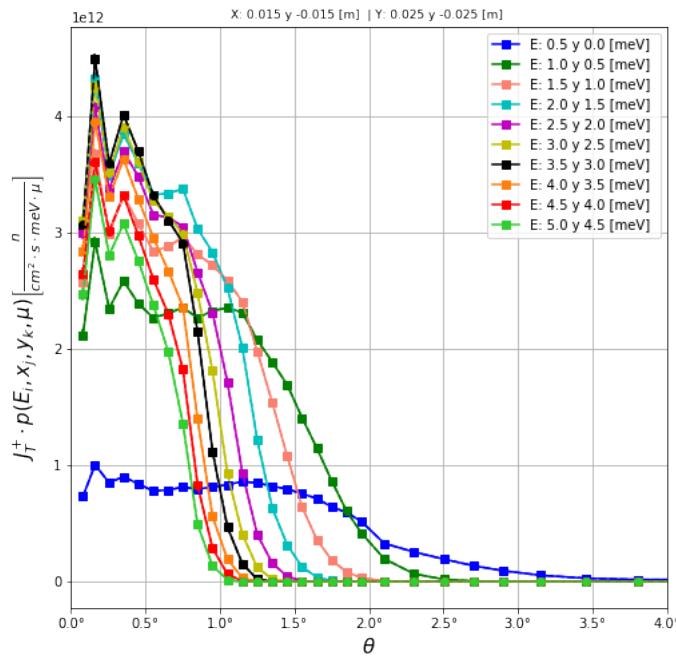
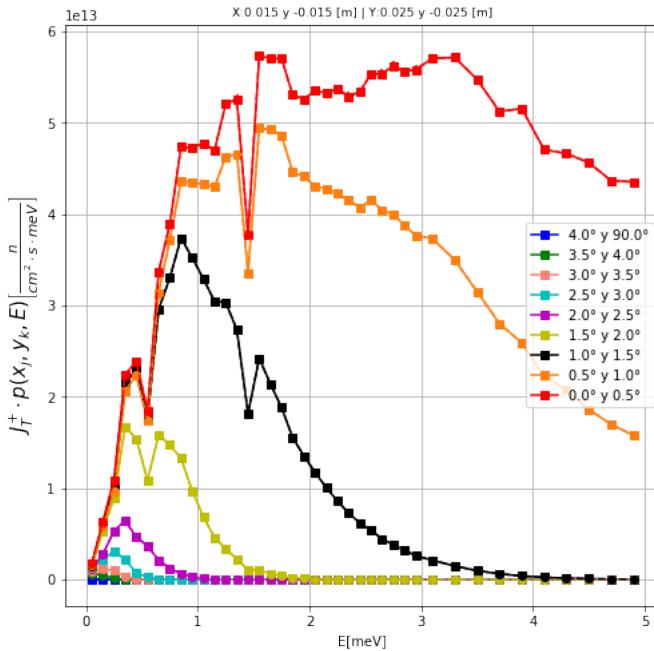


Figura 6.1.13: Divergencia de neutrones para distintos grupos de energía. Bajas energías.

Figura 6.1.14: Espectro de neutrones para distintos grupos de  $\mu$ . Baja divergencia.

## 6.2. Análisis en el instrumento SANS: diseño I

### 6.2.1. Análisis en la posición POS 3

A continuación se presentan la distribución neutrónica en  $\lambda$ , es decir dividida la corriente de cada intervalo de  $\lambda$  por el ancho del mismo. Estas distribuciones fueron calculadas en la posición POS 3, inmediatamente después del selector de velocidades, para distintas configuraciones del mismo que se muestran en la Tabla 6.2.1

Longitud de onda $\lambda$ [nm]	Energía [meV]	Velocidad [ $\frac{m}{s}$ ]	Frecuencia [Hz]	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\sigma(\lambda)}{\lambda}$ [%]
0.4	5.10	988.56	123.57	9.4 %
0.5	3.26	790.84	98.85	9 %
0.6	2.27	659.04	82.38	11 %
0.7	1.66	564.89	70.61	12 %

Tabla 6.2.1: Características de las configuraciones realizadas en el selector de velocidades para la obtención de los resultados de la Figura 6.2.1

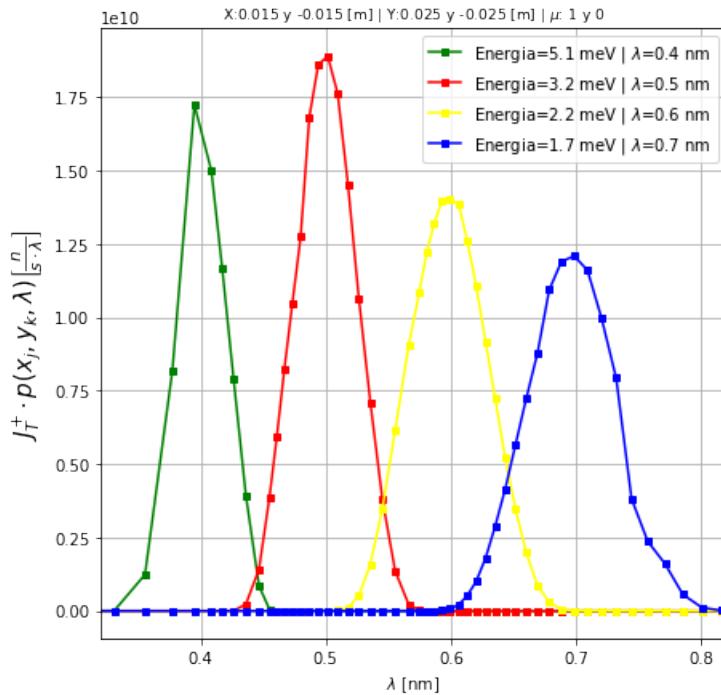


Figura 6.2.1: Distribuciones neutrónicas en  $\lambda$  obtenidas en la posición POS 3, es decir inmediatamente después del selector de velocidades, para distintas configuraciones del mismo.

### 6.2.2. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 3

La frecuencia que se muestra en la Tabla 6.2.1 es la frecuencia de giro del selector de velocidades, que origina el paso de neutrones a través de este componente de una cierta energía. Como se mencionó en la descripción de este componente en el capítulo 4, las dimensiones fueron tales que se cumple que  $9\% \geq \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \leq 12\%$ .

En base a esto, los resultados que se muestran en la Figura 6.2.1 fueron obtenidos a partir de la configuración del selector de velocidades de la Tabla 6.2.1. Se observa que para cada energía seleccionada se desarrolla una distribución normal en torno a dicha energía. Como era de esperar, el selector de velocidades permite el paso de neutrones cuyas energías están comprendidas en un entorno de la energía seleccionada (o longitud de onda) y el máximo de la corriente está en la energía seleccionada (o próxima a ella).

### 6.2.3. Análisis en la posición POS 4

Para el análisis que se comprende en esta sección inicialmente se presentarán las distribuciones neutrónicas en  $\mu$  en la posición POS 4 únicamente para dos configuraciones del sistema

colimador:

- Con una colimación de 16 metros.
- Sin colimación.

Se han elegido estas dos configuraciones para el sistema colimador con el fin de caracterizar al instrumento en sus condiciones extremas. Finalmente se ha configurado el selector de velocidades para las 4 energías mostradas en la Figura 6.2.1, a saber:

- 5.1 meV ( $\lambda = 0.4 \text{ nm}$ )
- 3.2 meV ( $\lambda = 0.5 \text{ nm}$ )
- 2.2 meV ( $\lambda = 0.6 \text{ nm}$ )
- 1.7 meV ( $\lambda = 0.7 \text{ nm}$ )

Los resultados se presentan a continuación en las Figuras 6.2.2 y 6.2.3.

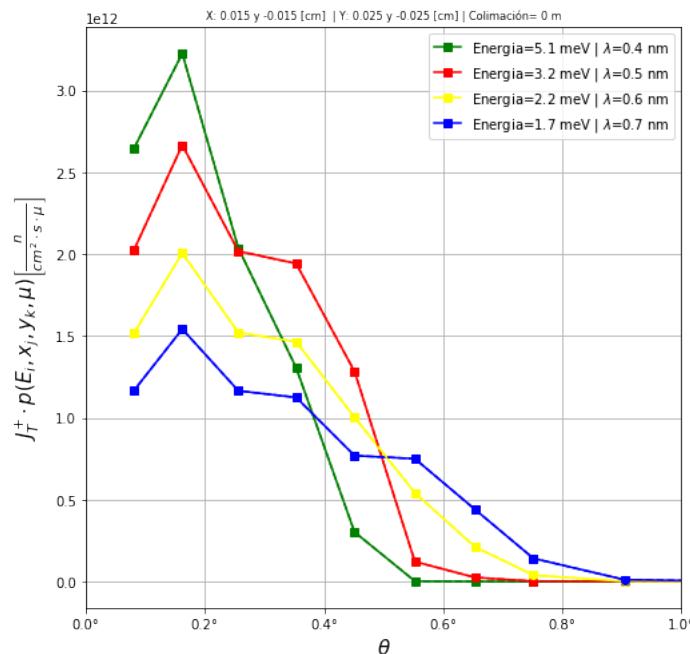


Figura 6.2.2: Distribución en  $\mu$  en la posición POS 4, con el selector de velocidades configurados para las energías mostradas y una colimación nula en el instrumento SANS.

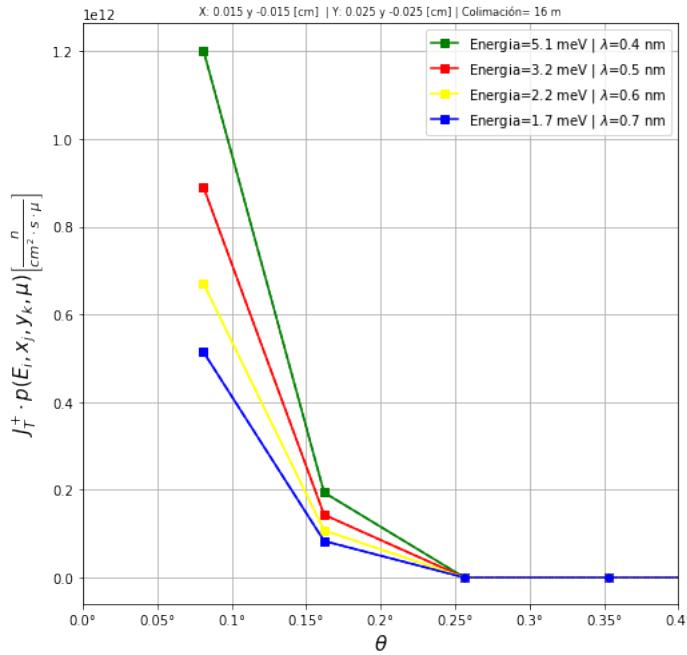


Figura 6.2.3: Distribución en  $\mu$  en la posición POS 4, con el selector de velocidades configurados para las energías mostradas y una colimación de 16 metros en el instrumento SANS.

En la Figura 6.2.4 se presentan resultados reportados para V4 en el reactor BER-II [2]. En ellos se analiza la corriente neutrónica total que incidiría a la muestra bajo estudio. Se calcula la corriente cuando se configura tanto al selector de velocidades para distintas energías y al sistema colimador para distintas longitudes de colimación. Recordemos que el reactor alemán es el **BER II**, cuya descripción fue dada en la introducción.

Finalmente se presenta la Figura 6.2.5 con los resultados obtenidos para el **RA-10** realizados con la intención del mismo análisis, obtener la corriente neutrónica para distintas configuraciones del selector de velocidades y del sistema colimador.

Dado que los resultados fueron obtenidos con las mismas condiciones ( $\Delta\lambda/\lambda$ ) que el estudio que se pretende realizar, es por eso que se decidió digitalizar los puntos de la Figura 6.2.4 para adicionarlos en la Figura 6.2.5. Es decir, se compararán los resultados de *Helmholtz-Zentrum Berlin* con el reactor **BER II** con los obtenidos en el presente trabajo con el **RA-10**.

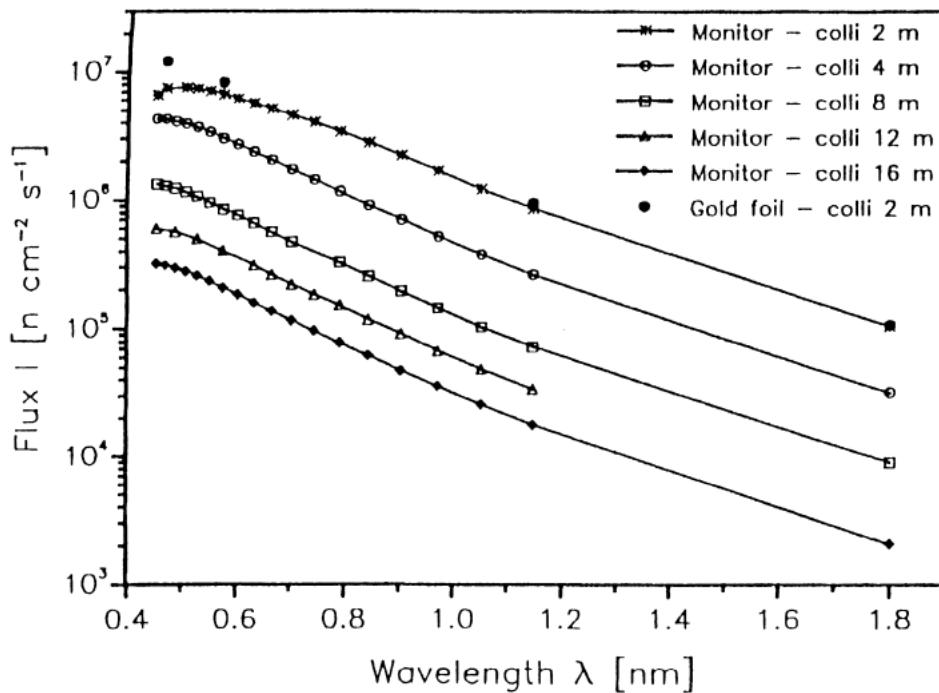


Figura 6.2.4: Corriente neutrónica medida en V4 en el reactor BER-II para distintas configuraciones de colimación y del selector de velocidades[2]

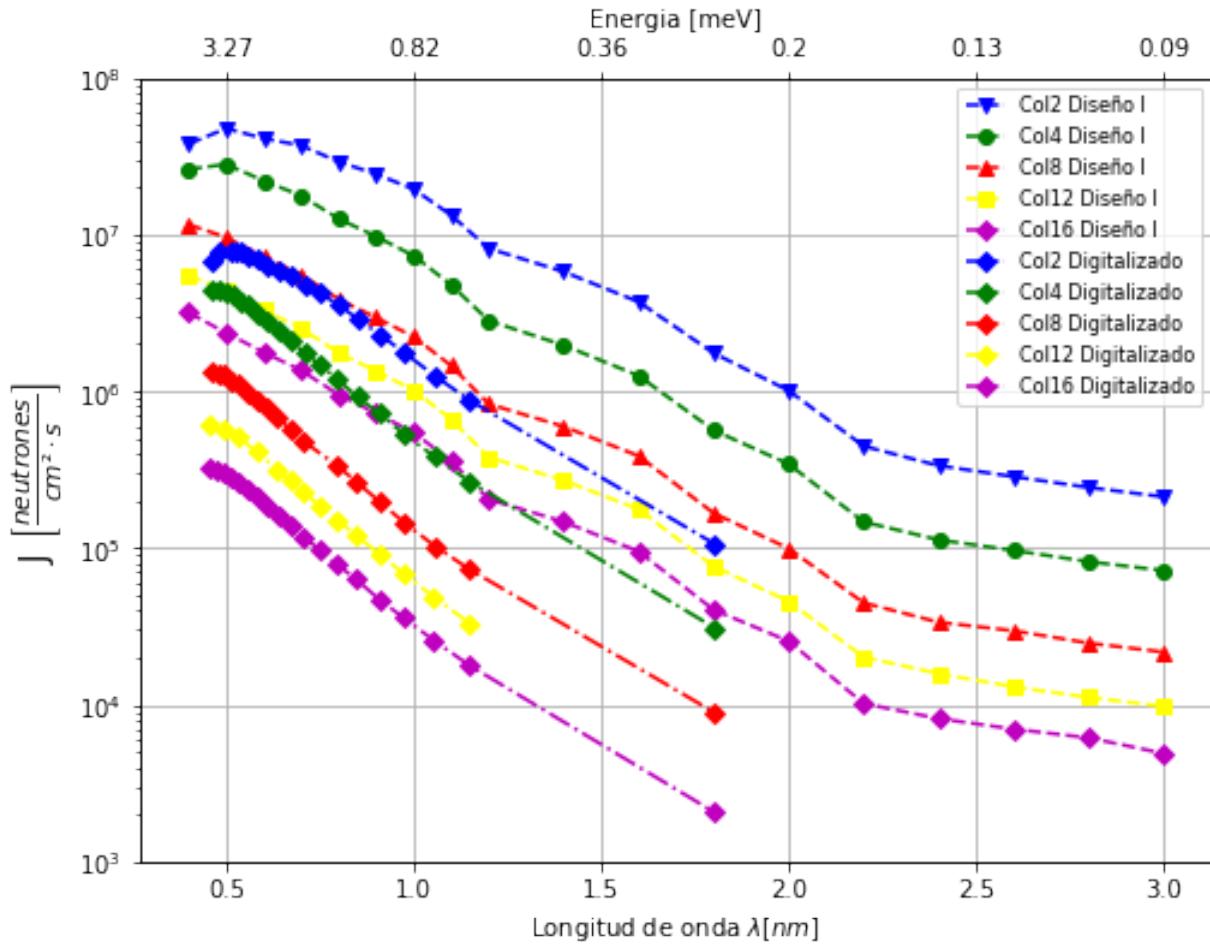


Figura 6.2.5: Corriente neutrónica total obtenida en la posición POS 4 para distintas longitudes de onda  $\lambda$  seleccionadas mediante el selector de velocidades y distintas configuraciones de colimación.

#### 6.2.4. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 4

##### Análisis de los resultados de la distribución en $\mu$ .

Se comienza el análisis comparando los resultados entre las Figuras 6.2.2 y 6.2.3, es decir, la distribución neutrónica en  $\mu$  en la posición POS 4 para una configuración sin colimación (todas guías) y con una completa colimación que permite el sistema (16 metros de colimación). Primero los resultados arrojan algo esperado, la colimación completa reduce la divergencia alrededor de 4 veces con respecto a la divergencia máxima presente en la configuración sin colimación. Por otro lado, la configuración sin colimación presenta diferentes divergencias máximas para cada energía también como era de esperar. Para energías superiores, la divergencia es menor. No

sucede lo mismo con la colimación completa. La divergencia máxima es la misma sin importar de que energía se está hablando. Podemos estimar que esta será la máxima divergencia presente con una configuración total de colimación sin importar la energía.

### Análisis de los resultados $J_T^+$ vs $\lambda$ obtenidos por el selector de velocidad

En la Figura 6.2.5 se observa en el eje de las ordenadas, la corriente neutrónica total. En el eje de los abscisas, las longitudes de ondas de los neutrones seleccionadas mediante el selector de velocidades. Cada curva presente en la figura, corresponde a una configuración de colimación distinta, siendo estas: 2m, 4m, 8m, 12m y 16m de colimación. Además están presentes, como ya se explicó, las curvas obtenidas por *Helmholtz-Zentrum Berlin*, y denotados en la leyenda con *digitalizado*. También, la misma configuración de colimación esta representada con el mismo color. Por ejemplo, la colimación COL2 (colimación de longitud de 2m) se encuentra en azul, tanto para la curva digitalizada como para la obtenida en el presente trabajo. Se observa que para cualquier configuración de colimación y para cualquier longitud de onda elegida mediante el selector de velocidades, la corriente neutrónica total de los resultados obtenidos en este trabajo (con el reactor RA-10) es superior a los resultados digitalizados obtenidos con el BER II. Para que las curvas de misma colimación se “toquen”, es necesario aumentar cada punto de las curvas digitalizadas 10 veces o disminuir 10 veces las curvas obtenidas en este trabajo (aproximadamente 10 veces). Esta diferencia podría explicarse por dos motivos considerados los más importantes y complementarios:

1. La potencia del reactor RA-10 es 3 veces superior a la potencia del BER II. Esto ya anticipaba la superior corriente al final del instrumento. Por lo tanto, los resultados no se contradicen con este argumento.
2. La calidad de la fuente fría de cada reactor. Como se mencionó en la introducción, el reactor RA-10 presenta una fuente fría de deuterio líquido a 23 K. El BER II muestra una fuente fría de hidrógeno hipercrítico manipulada a una temperatura que varía desde 25K a 35K, y por lo tanto, siendo de menor calidad que la fuente fría del RA-10.

## 6.3. Guía Curva Out of Pile: Diseño II

Continúa el análisis con el estudio del diseño II de la guía curva out of pile que se pretende implementar en el proyecto *Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN)*. Se recuerda que las especificaciones del diseño II se encuentran en la Tabla 4.3.1 del capítulo 4.

Se comienza el análisis con la presentación de la Tabla 6.3.1, en la cual expone la misma información que la Tabla 6.1.1 para el diseño I en la posición POS 2.

Posición	Diseño	Magnitud Calculada	Valor calculado
POS 2	II	$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$	3.78E+09
POS 2	II	$\Delta\theta(J_{max})$	0.11° - 0.19°
POS 2	II	$\Delta E(J_{max})$	0.80 - 0.85 meV

Tabla 6.3.1: Datos integrales obtenidos en la posición POS 2 para el diseño II. Se ha calculado la corriente total, el valor del intervalo de divergencia y el valor del intervalo de energía en el cual la intensidad es máxima.

Luego el análisis continúa con la presentación de las Figuras 6.3.1, 6.3.2, 6.3.3 y 6.3.4. En estas figuras se muestran las distribuciones neutrónicas correspondiente a la posición POS 2, es decir, al final de la guía curva únicamente de las distribuciones en  $E$  y  $\mu$ . Como los fenómenos más importantes desde el punto de vista óptico en este tipo de componentes ya fueron estudiados en el diseño I y se repiten también en el diseño II, resulta más valioso focalizar el análisis en estudiar las diferencias que existen en las distribuciones neutrónicas debido a cada diseño. Por consiguiente las figuras mencionadas presentan dos curvas cada una, una asociada al diseño I y la otra al diseño II. Finalmente, para poder visualizar la diferencia entre ambos diseños, se han normalizado las curvas como se describe a continuación.

La integral de las distribución normalizada es igual a 1, es decir:

$$\int \vartheta(\bar{\xi}) d\bar{\xi} = 1 \quad (6.1)$$

Donde  $\vartheta(\bar{\xi})$  representa alguna de las distribuciones vistas hasta ahora pero normalizada y  $\bar{\xi}$  es el vector de las variables de la cual depende dicha distribución. La integral es multiespacial que se realiza en el rango completo de todas las variables.

Obsérvese que para las distribuciones no normalizadas se cumple que:

$$\int \varsigma(\bar{\xi}) d\bar{\xi} = J_T^+ \left[ \frac{n}{s} \right] \quad (6.2)$$

Donde  $\bar{\xi}$  es el vector de las variables de la cual depende dicha distribución,  $\varsigma(\bar{\xi})$  es alguna de las distribuciones vistas hasta ahora y sin normalizar y  $J_T^+$  es la corriente neutrónica total. Nuevamente la integral es realizada sobre todo el rango de las variables.

Por lo tanto se cumple que:

$$\vartheta(\bar{\xi}) = \frac{\varsigma(\bar{\xi})}{J_T^+} = p(\bar{\xi}) \quad (6.3)$$

Donde  $p(\bar{\xi})$  es la distribución descripta en el capítulo 3. De manera que las figuras que presenten esta normalización, en el eje de las ordenadas se observará esta última distribución.

Aunque la normalización de las distribuciones ayuda a entender las diferencias entre las distribuciones neutrónicas debido a cada diseño de guía, a veces es útil también la siguiente relación:

$$\vartheta(\bar{\xi}) = \frac{\varsigma(\bar{\xi})}{J_{T_{D1}}^+} = k * p(\bar{\xi}) \quad (6.4)$$

Donde  $k$  es un escalar y  $J_{T_{D1}}^+$  es la corriente total calculada con el diseño I. Es la misma expresión obtenida anteriormente salvo que ahora siempre se divide por  $J_{T_{D1}}^+$ . Esta relación es útil dado que se referencian los resultados obtenidos a la intensidad calculada con el diseño I. Es inmediato que el valor de  $k$  será igual a 1 para cuando las distribuciones sean las correspondientes a este último. Cuando las distribuciones sean las correspondientes al diseño II,  $k$  será igual a  $\frac{J_{T_{D2}}^+}{J_{T_{D1}}^+}$ , donde  $J_{T_{D2}}^+$  es la corriente neutrónica total calculada con el diseño II.

Finalmente, si en las figuras siguientes se observa en el eje de las ordenadas  $k * p(\bar{\xi})$ , sepa que se utilizó la relación 6.4. Sin embargo se detallará en todos las figuras según sea necesario, y llamaremos normalización 1 a la correspondiente en la ecuación 6.3 y normalización 2 a la correspondiente en la ecuación 6.4.

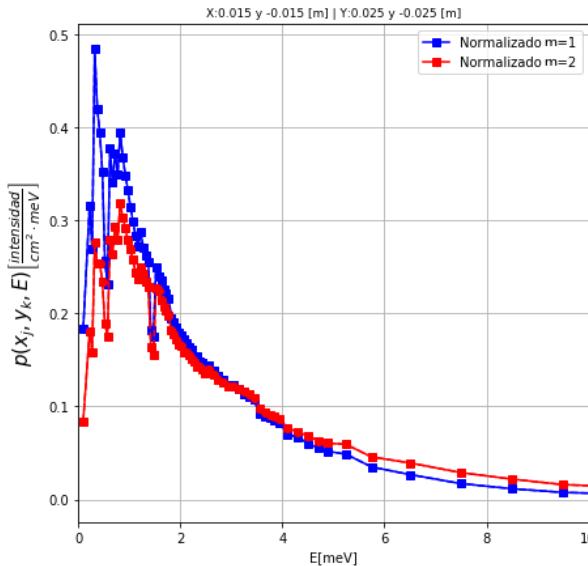


Figura 6.3.1: Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 1.

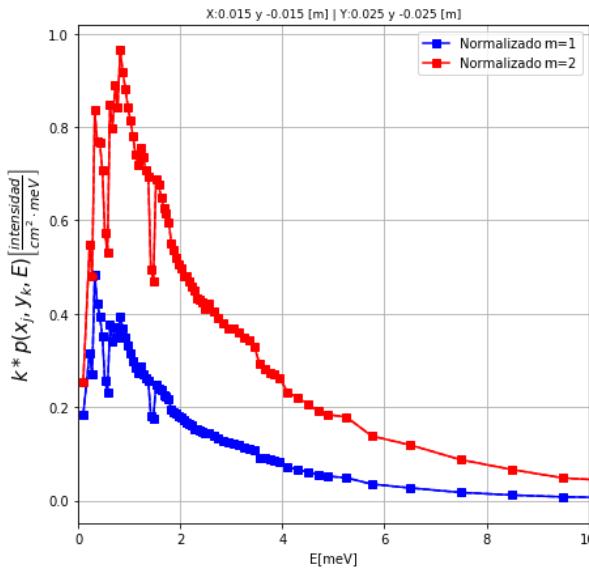


Figura 6.3.2: Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 2.

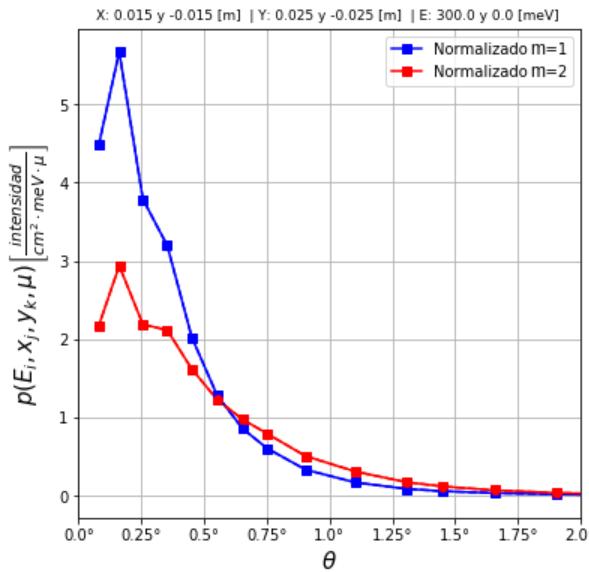


Figura 6.3.3: Distribuciones en  $\mu$  normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 1.

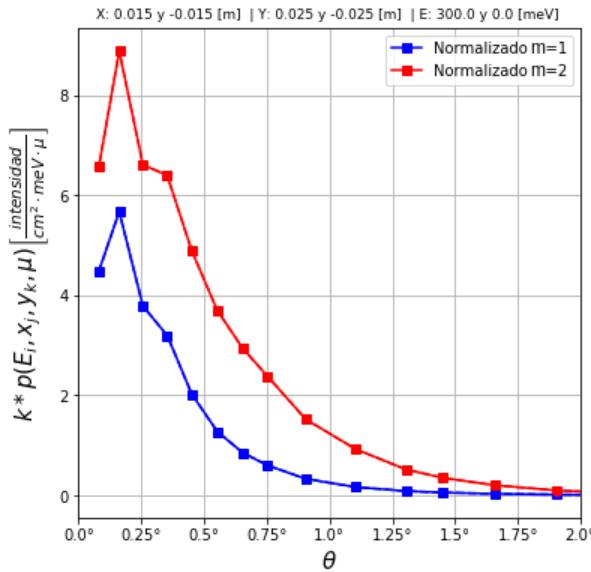


Figura 6.3.4: Distribuciones en  $\mu$  normalizadas calculadas con el diseño I y II. Se ha utilizado la normalización 2.

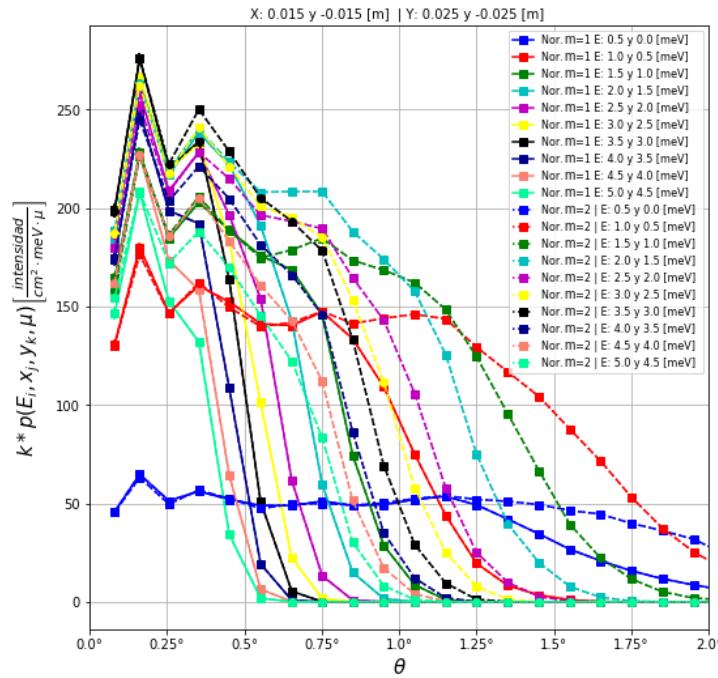


Figura 6.3.5: Distribuciones en  $\mu$  del diseño II y I normalizadas. Se aprecia la divergencia de neutrones para distintos grupos de energía.

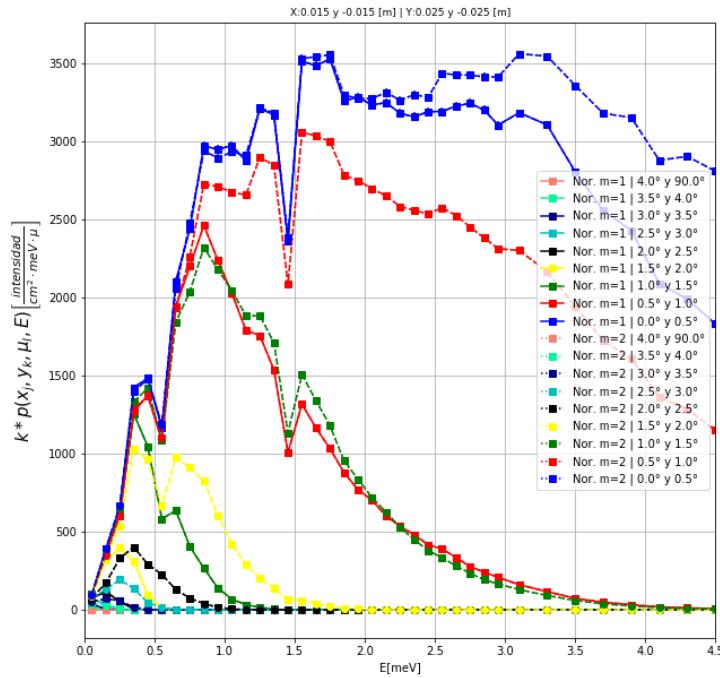


Figura 6.3.6: Distribuciones espectrales del diseño II y I normalizadas para distintos macro grupos de  $\mu$ .

### 6.3.1. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 2

La Figura 6.3.1 muestra las distribuciones espectrales calculadas con los diseños de guía bajo estudio. Se han normalizado utilizando la normalización 1. En primer lugar se observa que la forma del espectro es similar para ambos diseños. Para bajas energías (menores a  $\sim 3.3$  meV) la curva referida al diseño I se encuentra por arriba de la referida al diseño II. En principio se podría pensar, que para este rango energético el diseño I presenta una mayor intensidad que el diseño II pero esto no es correcto como veremos más adelante.

El conjunto de neutrones que puede reflejar una guía cuyo  $m$  es igual a 1 está contenido en el conjunto de neutrones que puede reflejar una guía cuyo  $m$  es igual a 2. En base a esto, se espera que la guía de  $m = 2$  del diseño II presente mayor o misma intensidad si se integrara las distribuciones en sus variables en un mismo espacio (multiespacio). Para energías superiores a  $\sim 3.3$  meV, ahora la curva referida al diseño II se encuentra por arriba de la referida al diseño I, y es en este punto más evidente el análisis de la cantidad superior de neutrones que permite la guía de  $m = 2$ . Por el argumento anterior, se cumple que  $J_{TD2}^+ \geq J_{TD1}^+$ . Como la normalización utilizada es la correspondiente a la ecuación 6.3, el divisor de la distribución del diseño II es mayor o igual que el divisor de la distribución del diseño I. Y aun así la curva del diseño II esta por arriba a la del diseño I. De lo que resulta que la intensidad en este rango energético del

diseño II es mayor que la del diseño I.

A pesar de lo dicho, en la Figura 6.3.1 no se visibiliza claramente la mayor intensidad reflejada por la guía de  $m = 2$  sobre la guía de  $m = 1$ . Aún, se desconoce si a rangos energéticos menores a  $\sim 3.3$  meV realmente la intensidad debida a  $m = 2$  es igual o mayor a la de  $m = 1$ . Es por ello que se ha normalizado también a través de la normalización 2.

La Figura 6.3.2 muestra las distribuciones espectrales nuevamente referidas a los diseños bajo estudio pero normalizadas a través de la normalización 2. Como la normalización se ha hecho con la corriente total del diseño I ( $J_{T_{D_1}}^+$ ) ahora la curva referida al diseño II se encuentra por arriba de la curva referida al diseño I. Se puede responder entonces a las preguntas no contestadas del análisis anterior. La guía de  $m = 2$  presenta una mayor intensidad reflejada que la guía de  $m = 1$  para todo el rango energético. Anteriormente, se había concluido que solamente para energías mayores a  $\sim 3.3$  meV la intensidad era mayor para  $m = 2$ .

Sencillamente este resultado puede explicarse considerando que neutrones con igual energía pero con mayor divergencia tienen mas probabilidades de reflejarse en el diseño II que en el I. Este punto puede visualizarse en las distribuciones en  $\mu$  de las Figuras 6.3.3 y 6.3.4, normalizadas a través de la normalización 1 y 2 respectivamente. Obsérvese además, que sucede el mismo comportamiento que sucedió con la energía, pero el punto importante es notar el incremento en la divergencia obtenido con la guía  $m = 2$ . Se omite volver a explicar el razonamiento en  $\mu$  dado que es similar a la energía.

Continuamos el análisis con las Figuras 6.3.6 y 6.3.5. La primera muestra las distribuciones en  $\mu$  para el diseño I y II normalizadas mediante la normalización 2 y para distintos macro grupos de energías. La segunda muestra el espectro para el diseño I y II normalizados mediante la normalización 2 y para distintos macro grupos en  $\mu$ . Para una mejor orientación en la interpretación de las figuras, se han graficado de un mismo color los mismos macro grupos.

Se concluyó que para todo el intervalo de energía o divergencia, el diseño II presenta mayor intensidad que el diseño I. Cuando se observan estas últimas figuras, la discretización en macro grupos indica que no sucede lo mismo. En la Figura 6.3.6 se observa que las curvas referidas a ambos diseños comienzan a solaparse para divergencias pequeñas, es decir, la intensidad es la misma en ese rango. Lo mismo sucede con la Figura 6.3.5, nuevamente las curvas comienzan a solaparse para bajas energías. Este resultado será importante para comprender los resultados en la posición POS 4.

### 6.3.2. Análisis en la posición POS 4

Continúa el análisis con el estudio en la posición POS 4. Se omitió presentar los resultados de la posición POS 3 dado que son similares a los del diseño I ajustados a la intensidad correspondiente. Se presenta la Figura 6.3.7, análoga a la Figura 6.2.5 para el diseño I pero ahora calculada para el diseño II. Sin embargo, con el motivo de hacer hincapié en las diferencias de las corrientes neutrónicas de cada diseño, se adjunta también en la Figura 6.3.7 las curvas calculadas referidas al diseño I. Finalmente, se adjunta las curvas realizadas por *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)* para el reactor BER II con la misma intención mencionada ya en la sección 6.2 .

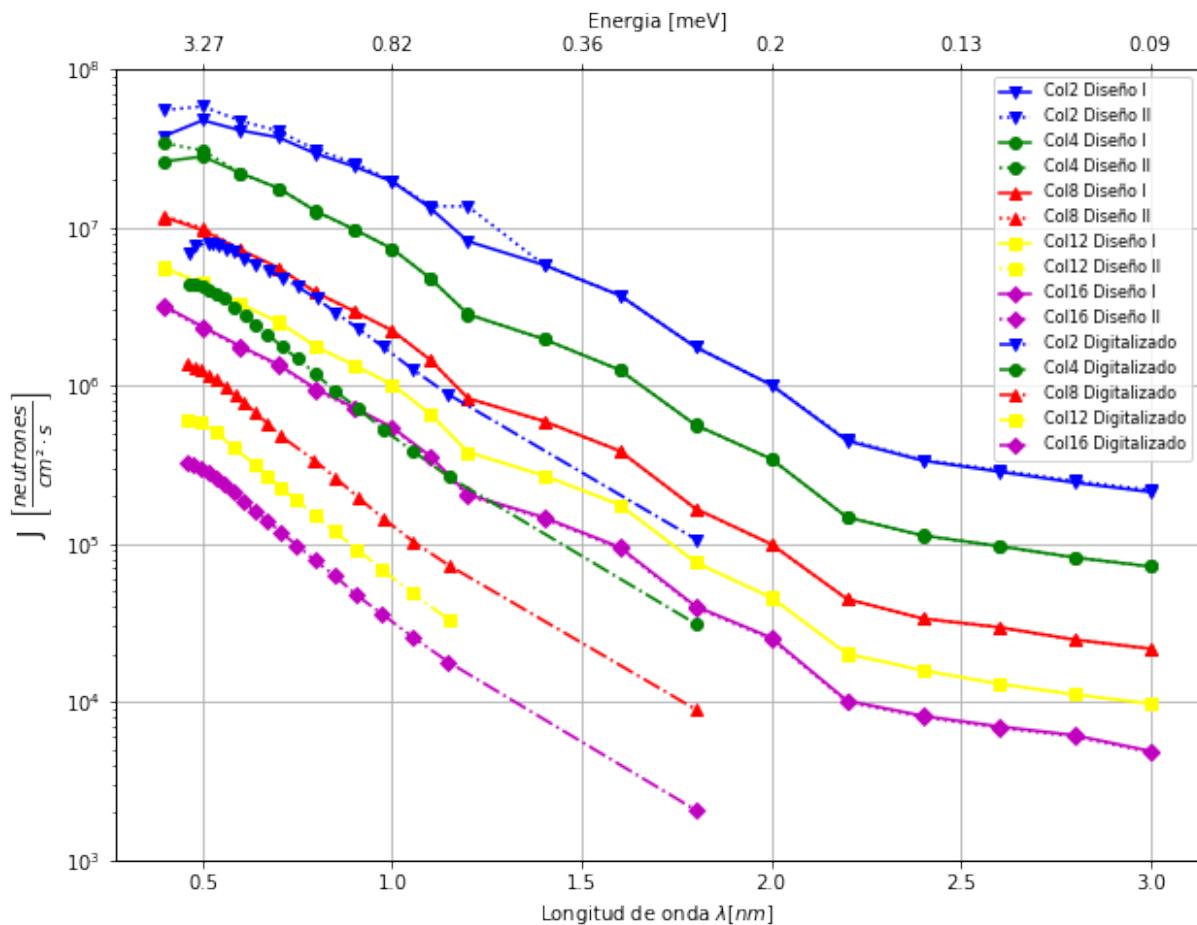


Figura 6.3.7: Corriente neutrónica total obtenida en la posición POS 4 para distintas longitudes de onda  $\lambda$  seleccionadas mediante el selector de velocidades y distintas configuraciones de colimación. Los resultados visualizados corresponden al diseño I, diseño II y digitalizados obtenidos por *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*.

### 6.3.3. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 4

Como primera observación las curvas referidas al diseño II se encuentran por arriba de las curvas digitalizadas, como era de esperar. Sin embargo, lo más interesante de este gráfico es la superposición casi completa entre las curvas referidas al diseño I y las referidas al diseño II. Se realiza un análisis enfocado al estudio de este comportamiento.

En primer lugar se podría haber pensado que las curvas referidas al diseño II se encontrarían por encima de las referidas al diseño I, dado el análisis de los resultados en la posición POS 2. Por lo tanto, este comportamiento sucede solo para bajas configuraciones de colimación y altas energías (o bajas longitudes de onda).

Cuando el selector de velocidades se configura para bajas energías (o altas longitudes de onda), a la salida del mismo, en la posición POS 3, la ganancia de neutrones del diseño II con respecto al diseño I radica en neutrones con mayor divergencia. Es decir, para la energía seleccionada el diseño II contendrá los neutrones del diseño I y un adicional de neutrones cuya característica importante es que presentan mayor divergencia. Como consecuencia, no pueden ser reflejados por el diseño I pero si por el diseño II, es por ello, que se considera a este conjunto de neutrones como una ganancia con respecto al diseño I. Este punto lo podemos ver en las Figuras 6.3.5 y 6.3.6 del análisis de los resultados en la posición POS 2. Si elegimos una baja energía del orden de  $\sim 1$  meV, en ambas figuras se puede visualizar esta ganancia. En la distribuciónpectral de la Figura 6.3.6, para  $\sim 1$  meV, se observa que las curvas están solapadas para bajas divergencias y luego la intensidad resulta mayor en el diseño II para divergencias mayores. En la Figura 6.3.6 este mismo comportamiento se observa sencillamente eligiendo divergencias altas y observando la mayor intensidad en la curva de la energía en cuestión del diseño II con respecto al diseño I. Sin embargo, esta ganancia no se traduce en un aumento en la corriente total en la posición POS 4, como se observa en la Figura 6.3.7. Las guías de neutrones del instrumento SANS presentan  $m = 1$ . Cuando la colimación es baja, por ejemplo de 2 m, la mayor proporción de guías existentes reflejan los neutrones asociados con  $m = 1$  y por lo tanto esta ganancia no es reflejada. En otras palabras, para la energía seleccionada y mayores divergencias la probabilidad de reflexión es baja. Cuando la colimación es alta sucede que solo neutrones rasantes podrán llegar a la posición POS 4, y esta ganancia queda descartada de dicha condición. El resultado para bajas energías es por lo tanto la superposición de las curvas del diseño I con el II para todas las configuraciones de colimación.

Cuando el selector de velocidades se configura para altas energías (o bajas longitudes de onda), a la salida del mismo, en la posición POS 3, se observa en la Figura 6.3.7 que para colimaciones altas las curvas de ambos diseños también se superponen. En la Figura 6.3.5, mencionada anteriormente, se observa que para altas energías ahora se cuenta con menos divergencia y además

las curvas referidas a ambos diseños se solapan en ángulos más rasantes. Esta menor divergencia no es lo suficiente como para sortear la configuración de colimación alta. Por lo que el exceso de divergencia no llega a la posición POS 4. Para el ángulo máximo que si permite sortear la configuración de alta colimación, las curvas de ambos diseños de la Figura 6.3.5 están superpuestas, es decir, la intensidad debido a cada diseño y cuya divergencia es menor al ángulo máximo nombrado es la misma. Este comportamiento se traduce también en la superposición de las curvas referidas a ambos diseños a altas energías y altas configuraciones de colimación de la Figura 6.3.7.

Para bajas colimaciones y nuevamente energías altas, se observa en la Figura 6.3.7 una pequeña ganancia del diseño II con respecto al diseño I. Esto se puede explicar sencillamente por el hecho que a esta energía existe una menor divergencia presente en las distribuciones, como se observó. Esto conlleva que los neutrones tengan menores colisiones en la guía del instrumento SANS (a diferencia del caso para bajas energías). Por lo tanto, los neutrones adicionales en la posición POS 3 del diseño II se transmiten con poca probabilidad pero lo suficiente como para generar esta ganancia observada en la posición POS 4.

## 6.4. Guía curva Out of Pile: Diseño III

Finalmente continúa el análisis con el ultimo diseño considerado en este trabajo, el diseño III de la guía curva out of pile. Se recuerda que las especificaciones del diseño III se encuentran en la Tabla 4.3.1 del capítulo 4.

Se comienza el análisis con la presentación de la Tabla 6.4.1, la cual presenta la misma información que la Tabla 6.1.1 y la Tabla 6.3.1 del diseño I y II respectivamente.

Posición	Diseño	Magnitud Calculada	Valor calculado
POS 2	III	$J_T^+ \left[ \frac{n}{cm^2.s} \right]$	1.43E+09
POS 2	III	$\Delta\theta(J_{max})$	0.11° - 0.19°
POS 2	III	$\Delta E(J_{max})$	0.2 - 0.4 meV

Tabla 6.4.1: Datos integrales obtenidos en la posición POS 2 para el diseño III. Se ha calculado la corriente total, el valor del intervalo de divergencia en el cual la intensidad es máxima y finalmente el valor del intervalo de energía en el cual la intensidad es máxima.

Luego se presentan las Figuras 6.4.1 y 6.4.2. Se han calculado las distribuciones en energía y  $\mu$  para el diseño III en la posición POS 2. Para compararlas con las obtenidas en el diseño I,

todas se han normalizado a través de la normalización 2. Por último se observa que el diseño I y el diseño III presentan el mismo  $m$  ( $m_c=1$ ). Por lo tanto, las diferencias en las distribuciones son exclusivamente originadas por los distintos radios de curvatura de la guía curva que presenta cada diseño.

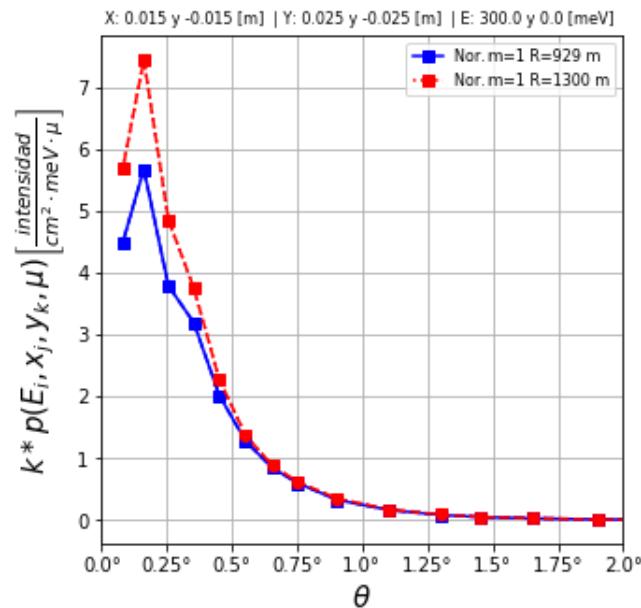


Figura 6.4.1: Distribuciones en  $\mu$  normalizadas calculadas con el diseño III y I. Se ha utilizado la normalización 2.

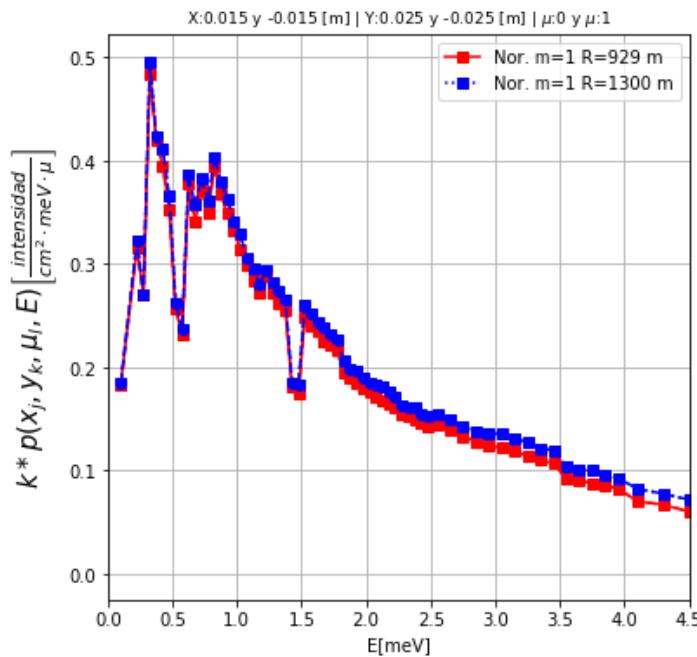


Figura 6.4.2: Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño III y I. Se ha utilizado la normalización 2.

Y finalmente se presentan las distribuciones en  $\mu$  y  $E$  en las Figuras 6.4.3 y 6.4.4, calculadas para el diseño III y I para distintos macro grupos. Nuevamente se recuerda que las mismas han sido normalizadas a través de la normalización 2.

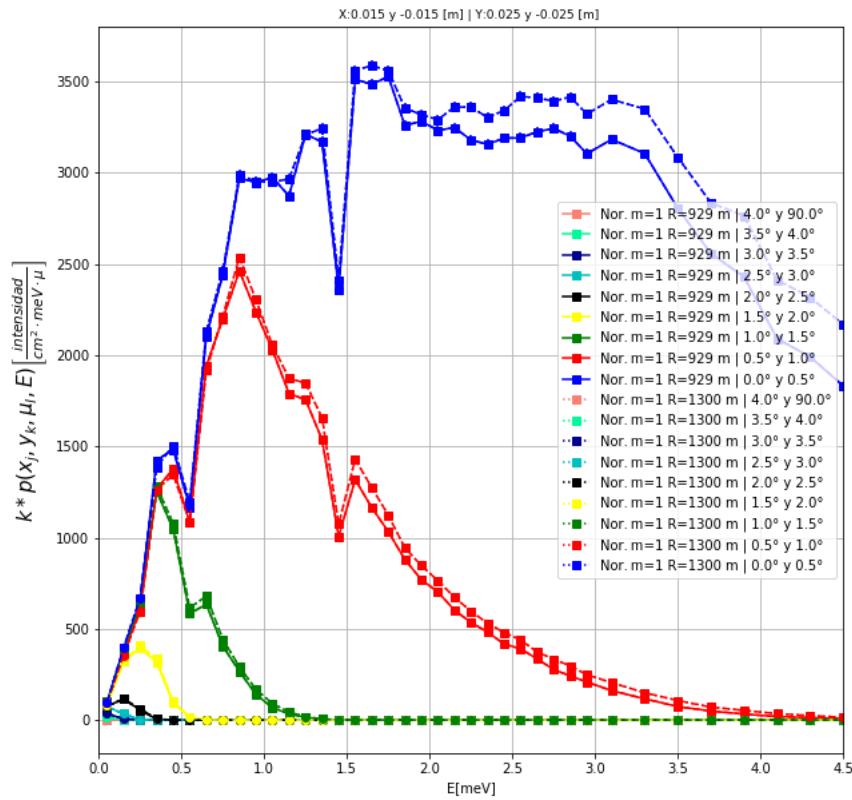


Figura 6.4.3: Distribuciones espectrales normalizadas calculadas con el diseño III y I para distintos grupos de  $\mu$ . Se ha utilizado la normalización 2.

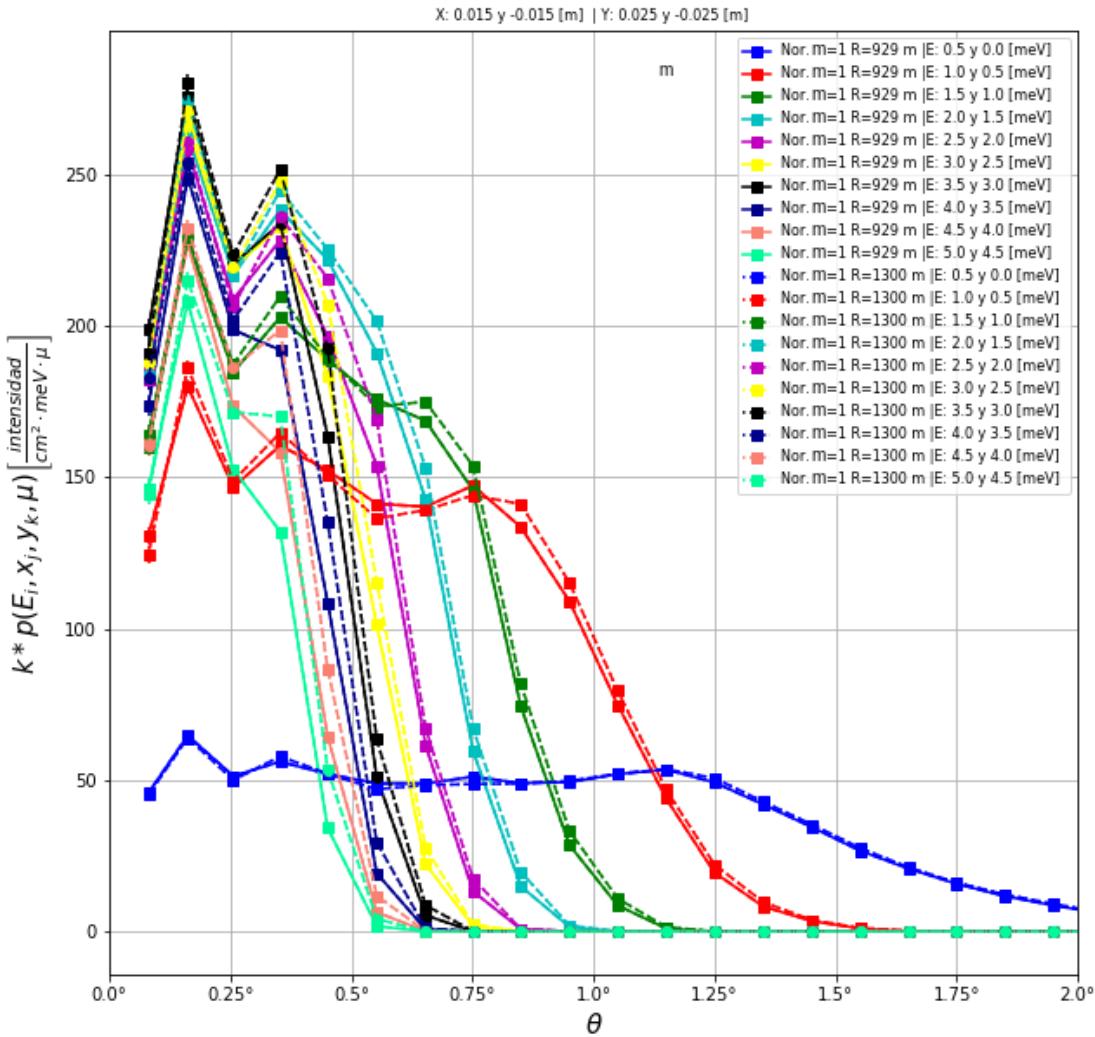


Figura 6.4.4: Distribuciones en  $\mu$  normalizadas calculadas con el diseño III y I para distintos grupos de E. Se ha utilizado la normalización 2.

#### 6.4.1. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 2

El resultado de un aumento del radio de curvatura en la guía curva es una ganancia en la corriente. En la Tabla 6.4.1 se ha calculado la corriente total ( $J_T^+ [\frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}]$ ) en la posición POS 2 siendo de  $1.43E + 09$ . Es decir, modificar el radio de curvatura de  $R_I = 929$  m a  $R_{III} = 1300$  m, aumentó un  $\sim 15\%$  la corriente total.

En la Figura 6.4.5 se pretende explicar la causa de este aumento. La guía de la derecha tiene un radio de curvatura mayor que la guía de la izquierda. Un neutrón incidente a la guía izquierda tendrá un mayor ángulo con respecto a la tangente del punto donde colisiona que si el mismo neutrón fuera incidente a la guía derecha. Este comportamiento se puede observar si se compara

la apertura de cada ángulo, sin recurrir a cálculos geométricos más complejos.

En la ecuación 1.1 de  $Q$  (cambio en la componente normal del impulso del neutrón al colisionar con el espejo) mencionada en la introducción, la energía es una variable que describe al neutrón, es decir, es intrínseca al neutrón. Sin embargo, el ángulo  $\theta$  no lo es. Y por lo tanto, un mismo neutrón puede ser reflejado en una guía y en otra no, como ya se ha explicado a lo largo del trabajo. En este caso, ambas guías tienen mismo  $m_C$ , pero distintos radios de curvatura dan lugar a distintos ángulos  $\theta$  para el mismo neutrón.

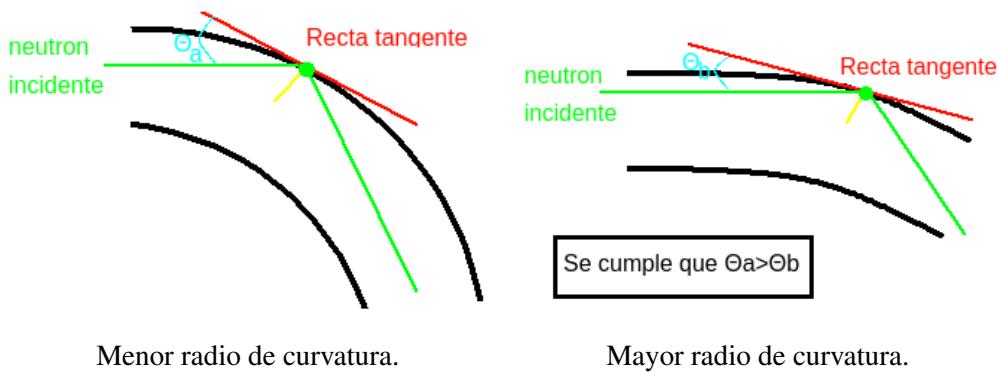


Figura 6.4.5: Diagrama que intenta explicar el aumento de la corriente del diseño III con respecto al diseño I para la posición POS 2. El ángulo  $\theta$  existente entre la tangente al punto donde colisiona el neutrón y el rayo incidente descrito por el mismo es menor para la guía con menor radio de curvatura.

Por otro lado, las distribuciones multigrupos de las Figuras 6.4.3 y 6.4.4 calculadas para el diseño I y III casi se solapan, siendo un poco más intenso el diseño III por el motivo que se explico anteriormente. Sin embargo, se sabe ahora que la formas funcionales de las distribuciones para el diseño III se mantienen similares a las distribuciones del diseño I debido a lo cual la utilización del diseño III se traduce una pequeña ganancia en la corriente total.

#### 6.4.2. Análisis en la posición POS 4

Continúa el análisis con el estudio en la posición POS 4. Para ello se presenta en la Figura 6.4.6 nuevamente el cálculo de la corriente total incidente a la muestra cuando se configura tanto al selector de velocidades para distintas energías y al sistema colimador para distintas longitudes de colimación, análoga a la Figura 6.2.5 y 6.3.7. Con el motivo de hacer hincapié en las diferencias de las corrientes neutrónicas de cada diseño, se adjunta también en la Figura las curvas calculadas referidas al diseño I pero no se adjuntarán las del diseño II, dado que se

complejiza la lectura del gráfico. Sí se adjuntarán los resultados reportados para V4 en el reactor BER-II.

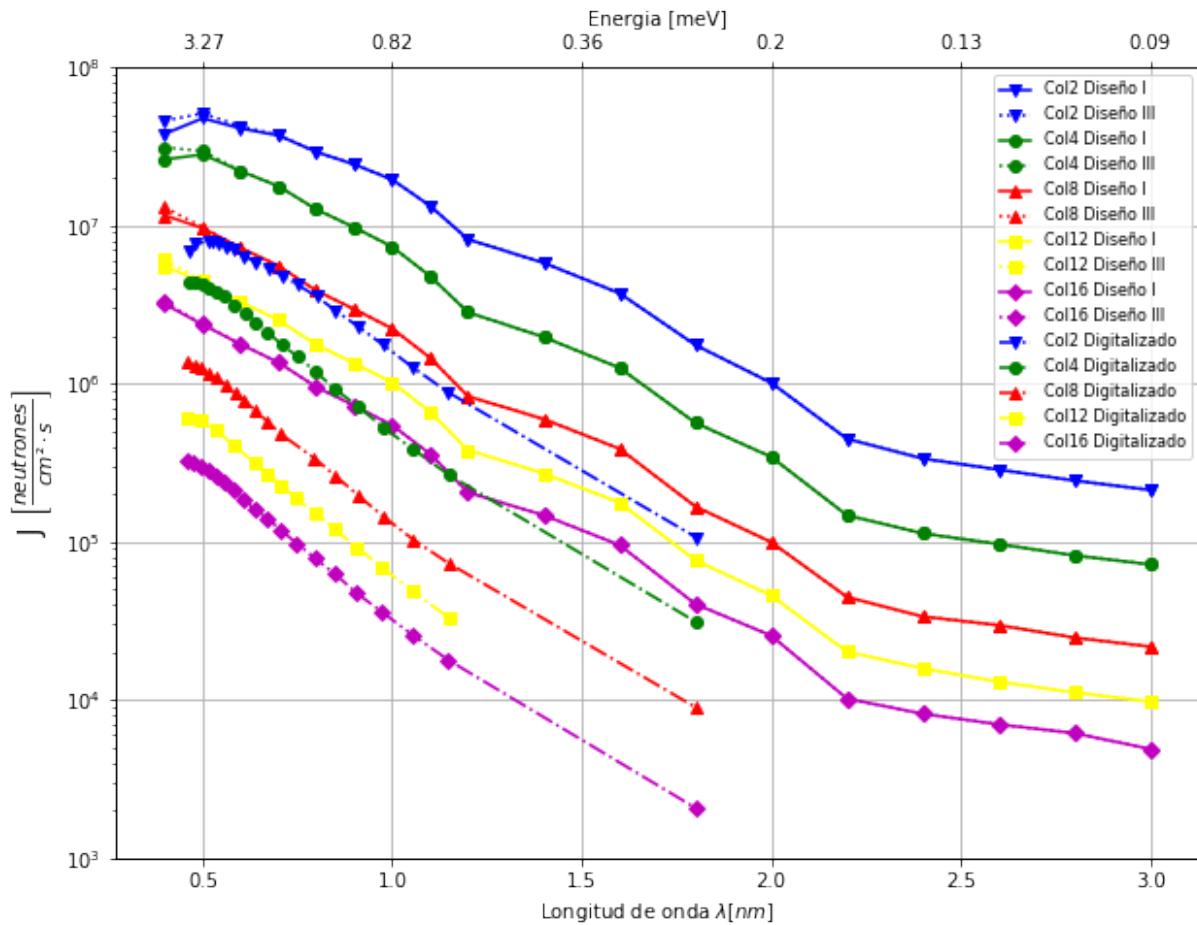


Figura 6.4.6: Corriente neutrónica total obtenida en la posición POS 4 para distintas longitudes de onda  $\lambda$  seleccionadas mediante el selector de velocidades y distintas configuraciones de colimación. Los resultados visualizados corresponden al diseño I, diseño III y digitalizados obtenidos por *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*.

### 6.4.3. Análisis de los resultados obtenidos en la posición POS 4

Como se anticipó en análisis de la posición POS 2 utilizando multigrupos de  $E$  y  $\mu$ , las distribuciones neutrónicas asociadas al diseño I y III resultaron ser similares. En particular se observó que las distribuciones debidas al diseño III eran un poco más intensas que las del diseño I. Este efecto predominó para energías más altas que bajas ( $\geq 2$  meV). Es por eso que en la Figura 6.4.6 la corriente total debida al diseño III es levemente mayor que la del diseño I solo cuando se configura al selector de velocidades para altas energías. Luego la corriente total permanece casi

igual para todas las demás energías sin importar la configuración de colimación. Por lo tanto, se observa que la corriente total no se modifica sustancialmente en la posición POS 4 al modificar el radio de curvatura de la guía curva.

## 6.5. Discusión de los resultados de los 3 diseños analizados

En esta sección se realizará una discusión acerca de los resultados obtenidos de los 3 diseños de guías curvas out of pile que podrían ser empleados en el *LAHN: Laboratorio Argentino de Haces de Neutrinos*.

Se pretende efectuar una optimización de la guía curva basada en la evaluación de cada diseño propuesto según los resultados obtenidos para encontrar entre ellos una compensación razonable entre el rendimiento neutrónico, el costo económico y aspectos geométricos. Este último punto hace referencia a limitaciones espaciales que pudiesen complicar el momento de la construcción de la guía, como podría ser el radio de curvatura y la separación existente entre distintos componentes ópticos. Por ende, el objetivo es comparar los distintos diseños frente a los criterios de optimización nombrados.

En la posición POS 2, es decir, al comienzo del instrumento SANS, el diseño II es el que mayor corriente total presenta (aproximadamente 3 veces más para el diseño I y 2.6 veces para el diseño III). Este resultado era esperado por el hecho de poseer la guía del diseño II un  $m$  superior. Sin embargo, esta mayor corriente total en la posición POS 2 no se traduce nuevamente en una mayor corriente total en la posición POS 4, en la salida de la colimación del instrumento SANS. Los resultados obtenidos del presente trabajo indican que el diseño II presenta para todas las longitudes de onda seleccionadas mediante la configuración del selector de velocidades y todas las configuraciones de colimación del instrumento SANS, la misma corriente total que el diseño I salvo una muy pequeña ganancia en bajas colimaciones y bajas longitudes de onda. Este resultado es importante ahora desde el punto de vista económico, dado que el desempeño neutrónico del diseño II en la posición POS 4 es el “mismo” que el diseño I y además ambas guías tienen las mismas propiedades geométricas, la optimización entre estas guías queda determinada por el criterio económico. Una guía de 120x70 mm que presenta  $m = 2$  es cotizada aproximadamente en 13000 USD/metro. Para la misma sección pero con  $m = 1$ , el valor de la guía es aproximadamente 7500 USD/metro, es decir la mitad.

Se podría pensar en principio que los diseños propuestos no solo alimenten al instrumento SANS, sino también a algún otro que esté en consideración. Bajo este punto, el presente trabajo ha realizado aún una caracterización de las distribuciones neutrónicas hasta la posición POS 2 que contribuiría con el análisis que se estuviese desarrollando. En este contexto, puede

ser probable que la ganancia del diseño II frente al diseño I en la posición POS 2 sea preferible y por lo tanto la elección del diseño II otorgaría cierta versatilidad para otros instrumentos (dado que el diseño II tiene el mismo desempeño neutrónico que el diseño I para el instrumento SANS.) Sin embargo, en la evaluación de los diseños mencionados para el instrumento SANS, la elección del diseño I frente al II es inmediata.

Continúa la discusión con el diseño III. El mismo fue propuesto con la intención de obtener puntos de contactos con los resultados obtenidos por *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)*, dado que la guía que utilizan para alimentar al instrumento SANS, es en efecto de este trabajo, la misma que el diseño III. No obstante, los resultados no difieren demasiado de los obtenidos con el diseño I. En la posición POS 2, las distribuciones analizadas en el diseño III presentan la misma “forma” que las analizadas en el diseño I, aunque si existe una leve ganancia en la corriente total. En la posición POS 4, el desempeño neutrónico vuelve a ser el mismo para ambos diseños.

Por otro lado, como el radio de curvatura del diseño III es mayor que del diseño I, la guía del diseño III tiene una dirección menos “curva” y esto origina que para la misma distancia al instrumento, se necesite menos longitud de guía. En este trabajo todos los diseños fueron modelados con la misma longitud de guía, es decir, el diseño III tendría la salida de la guía curva a mayor distancia absoluta de la salida de la guía in pile (o de la pared del reactor) que el diseño I. Se modeló de esta manera por dos motivos. Primero porque se desconocen las ubicaciones exactas de la posición final de la salida de la guía curva ya que como se mencionó en el capítulo 4, el detalle de calidad de guías, geometría de conductos y layout final de los haces quedará determinado por el proyecto LAHN. Segundo, porque no se pretenden considerar efectos de longitudes en el análisis de los distintos diseños. Se modelan los 3 diseños con la misma longitud de guía para evitar caer en consideraciones de longitudes en los resultados obtenidos. De esta manera, se sabe con firmeza la causa de las diferencias en las distribuciones neutrónicas asociadas a cada diseño. Por lo tanto, se podría pensar que el aspecto económico en ventaja del diseño III radica en el ahorro debido a la menor longitud de guía si se fija la distancia del instrumento. Esta diferencia de longitud de guía es relativamente pequeña, siendo de aproximadamente  $\sim 8$  cm de guías para una distancia de 20 metros del instrumento a la salida de la guía in pile (posición POS 1).

Por otra parte, la separación entre la guía GF2a y GF2b si se utiliza el diseño III resulta de  $\sim 30$  cm a la salida de las guías si ambas se consideran simétricas con respecto a la dirección tangente de donde comienzan (se considera que las guías GF2a y GF2b tienen sus radios de curvatura opuestos). Para el diseño I, la separación resultante es de  $\sim 45$  cm. Ambas distancias de separación son pequeñas si se considera la manipulación y mantenimiento futuro de los instrumentos. Una facilidad en estas tareas requerirían distancias de separación mayor a 1 m. Aunque esto

también implicaría un radio de curvatura menor a los mencionados en este trabajo. En base a estas consideraciones, se ha visto que el cambio del radio de curvatura no tiene gran impacto en las distribuciones neutrónicas y por lo cual, probablemente la tendencia sería disminuirlo aún más.

Como el ahorro económico podría estimarse en pocos centímetros de longitud de guía y el desempeño neutrónico para ambos casos es similar salvo una leve ganancia en la corriente total para el diseño III en la posición POS 2, el criterio de interés parece estar más concentrado en los aspectos geométricos. En base a estas consideraciones, el diseño I sería mas ajustable a las necesidades que se han descripto, por lo que en este trabajo se lo considera óptimo.

Finalmente, se discute la performance del diseño I para el instrumento SANS Multipropósito que se desea instalar en el proyecto LAHN. Se determinó que la corriente neutrónica total incidente en la muestra es al menos 9 veces mayor que la corriente neutrónica total reportada con el reactor BER II para todas las longitudes de onda, todas las configuraciones de colimación y para la misma incertezza en la longitud de onda. Este resultado asegura la performance neutrónica del diseño I para el instrumento SANS.

En vista de la amplia diferencia entre los valores de corriente incidente a la muestra reportados por *Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB)* en el BER II y los obtenidos en el presente trabajo para el reactor RA-10, se plantea el argumento de una disminución en la incertezza de la longitud de onda a expensas de una disminución de la intensidad, lo cual no sería un inconveniente dada esta amplia ganancia de corriente. Por lo tanto, se conseguirían neutrones “más monoenergéticos” en la realización de distintas prácticas en el instrumento.

# Capítulo 7

## Trabajo complementario: simulación de experimento en el instrumento SANS.

Este capítulo está dedicado a un análisis complementario a los objetivos de este trabajo. El análisis de los resultados que se abordará será con mayor enfoque cualitativo, dado que no es el objetivo del presente trabajo el análisis de la dispersión de neutrones de bajo ángulo y por lo tanto como se mencionó, se limitará a observar la dispersión de neutrones en la muestra.

Inicialmente se llevará a cabo la *PARTE A* del análisis en la cual se simulará una corriente incidente en una muestra y observará la dispersión de neutrones en la posición POS 5, el detector del instrumento SANS.

Luego se desarrollará la *PARTE B*. Para ello se evaluará el instrumento SANS simulado en dos configuraciones distintas de colimación: **máxima colimación** (16 metros de colimación) y **sin colimación** (solo guías de neutrones). A su vez para cada configuración de colimación, se utilizarán dos muestras con partículas esféricas monodispersas de distinto radio. Una con radio igual a 60 Å y otra con radio igual a 200 Å.

### 7.1. Resultados esperados

Podemos pensar que la dispersión de neutrones en materia blanda, con una escala mesoscópica de aproximadamente 1–100 nm, es equivalente a la dispersión por un orificio. Mediante la ley de Bragg podemos relacionar el cambio de momento del neutrón con el ángulo de dispersión como:

$$q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta \approx \frac{2\pi}{\lambda} 2 \sin \theta$$

El cambio de momento del neutrón se encuentra relacionado con el tamaño de las partículas de la muestra. En la Figura 7.1.1 se observa la intensidad  $I$  registrada en el detector en función de la distancia “ $x$ ” medida del centro del detector y proporcional al cambio de momento del neutrón.

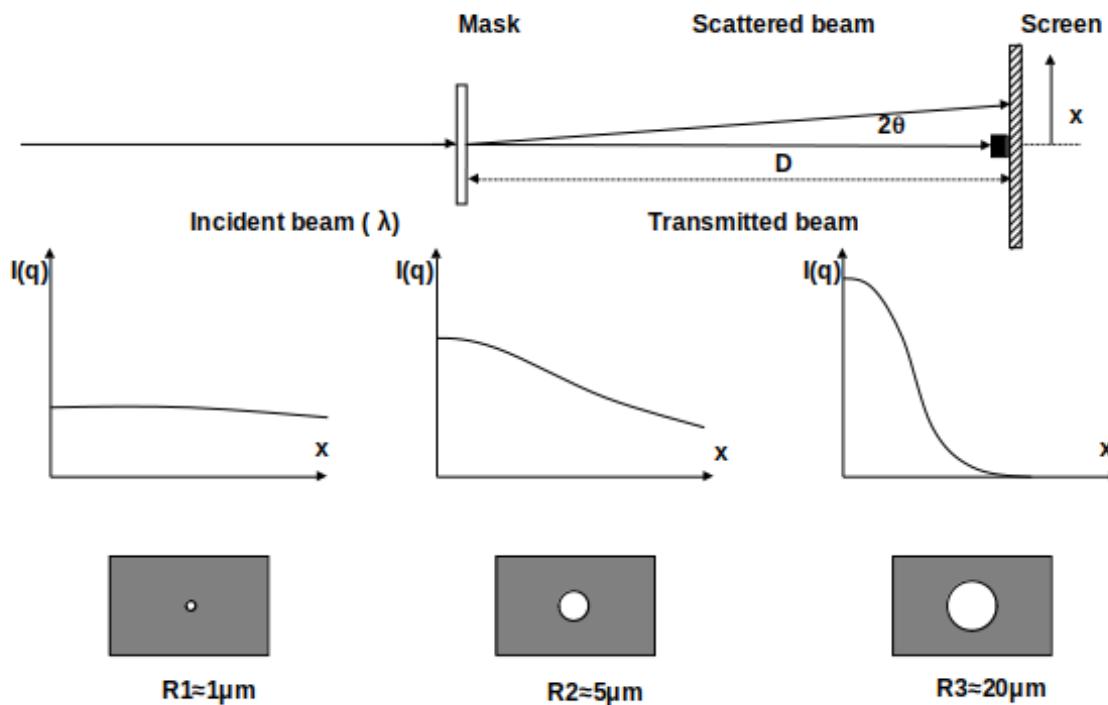


Figura 7.1.1: Intensidad  $I$  vs  $x$  para distintas muestras monodispersas de radios distintos.

Por lo tanto esperamos que para muestras con partículas de pequeño radio, la divergencia resultante de la dispersión sea mayor que para esferas de mayor radio.

## 7.2. PARTE A

La configuración experimental de la *PARTE A* adoptada para el análisis se describe a continuación:

- **Selector de velocidades:**  $\lambda = 0.6 \text{ nm}$ .
- **Sistema colimador:** 16 m. de colimación
- **Muestra SANS:** componente simple que simula la dispersión de una solución delgada en forma de caja de partículas esféricas monodispersas ( $R_{esferas}=100 \text{ \AA}$ ).

- **Detector:** similar a los utilizados. Registra la distribución espacial y angular ( $\mu$ )

Se presenta la configuración experimental descripta de la *PARTE A* junto con las distancias relativas de la muestra en la Figura 7.2.1.

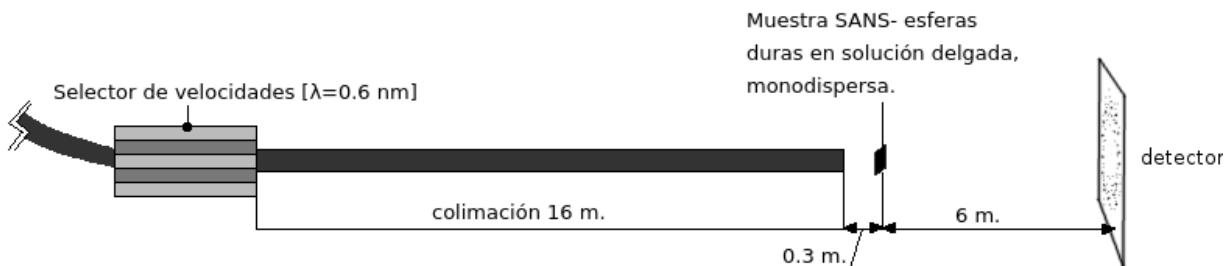


Figura 7.2.1: Configuración experimental. Parte A.

### 7.2.1. Presentación de los resultados

Los resultados se enseñan a continuación en las Figuras 7.2.2 y 7.2.3. En la primera figura se enseña la distribución espacial registrada en el detector luego de la muestra y a 6 metros de la misma. En la segunda figura se presenta la divergencia de los neutrones antes y luego de la muestra. Es decir, en la posición POS 4 y en la posición POS 5. Finalmente, para poder observar la diferencia entre ambas posiciones, se han normalizado las distribuciones mediante la normalización 1 (ecuación 6.3).

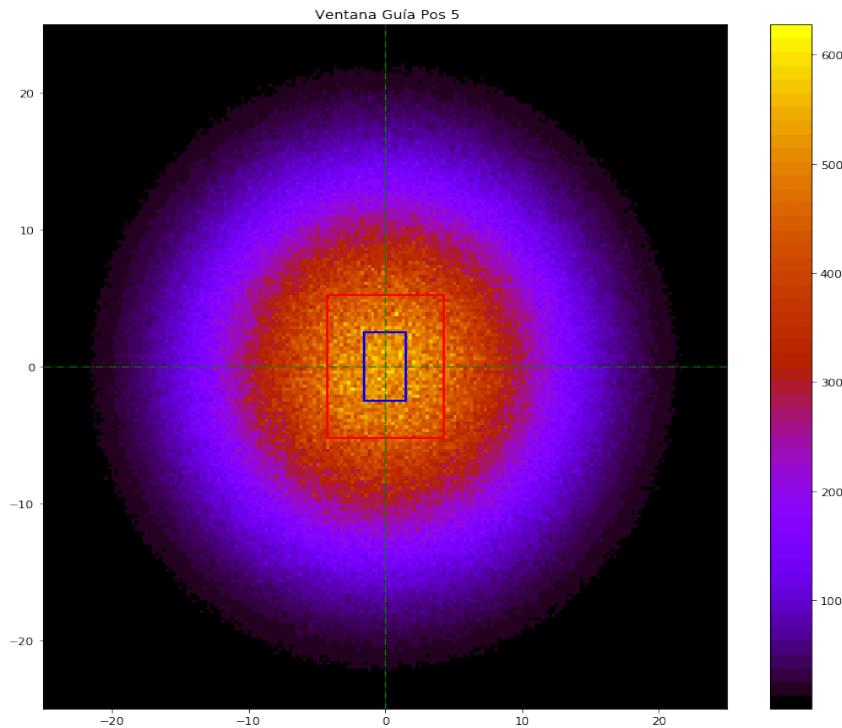


Figura 7.2.2: Distribución espacial en el detector.

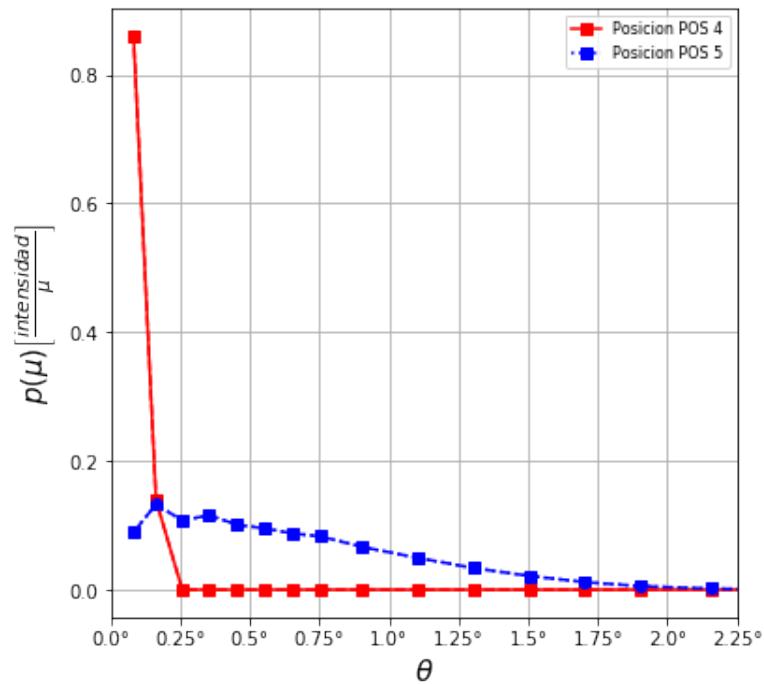


Figura 7.2.3: Divergencia resultante luego de la muestra SANS.

### **7.2.2. Discusión de los resultados**

En la Figura 7.2.2 se presentó la distribución espacial registrada por los neutrones a 6 metros de la muestra. Se han dibujado dos rectángulos. El rectángulo más pequeño de color verde tiene las dimensiones de la sección del colimador. Se lo ha dibujado para poder comparar con mayor claridad las dimensiones relativas entre la dispersión de los neutrones y la sección del colimador de donde provienen. El rectángulo más grande, en color rojo, es la proyección de la sección del colimador sobre el detector utilizando la mayor divergencia registrada a la salida del colimador. Es decir, si no estuviera la muestra, los neutrones impactarían en un área delimitada por el rectángulo rojo.

Por lo tanto, la primera observación es la dispersión causada por la muestra. En general se pueden intuir propiedades de la muestra con el análisis de la divergencia y las cuentas obtenidas. La magnitud que se ha registrado son unidades relativas (U.R), dado que no se realizará ningún cálculo, como se mencionó, se limita en análisis a la observación de la dispersión.

Por otro lado, en la Figura 7.2.3 se observa en la posición POS 4 que la divergencia máxima es de  $0.25^\circ$  mientras que en la posición POS 5, la divergencia es un poco mayor que  $2^\circ$ .

## **7.3. PARTE B**

La configuración experimental de la *PARTE B* adoptada para el análisis se describe a continuación:

- **Selector de velocidades:**  $\lambda = 0.6 \text{ nm}$ .
- **Sistema colimador:**
  - Máxima colimación: 16 m. de colimación.
  - Sin Colimación: Todo guías.
- **Muestra SANS:** componente simple que simula la dispersión de una solución delgada en forma de caja de partículas esféricas monodispersas de radio:
  - $R_{esferas} = 60 \text{ \AA}$ .
  - $R_{esferas} = 200 \text{ \AA}$ .
- **Detector:** similar a los utilizados. Registra la distribución espacial y angular ( $\mu$ )

Se presenta la configuración experimental descripta de la *PARTE B* junto con las distancias relativas de la muestra en la Figura 7.3.1.

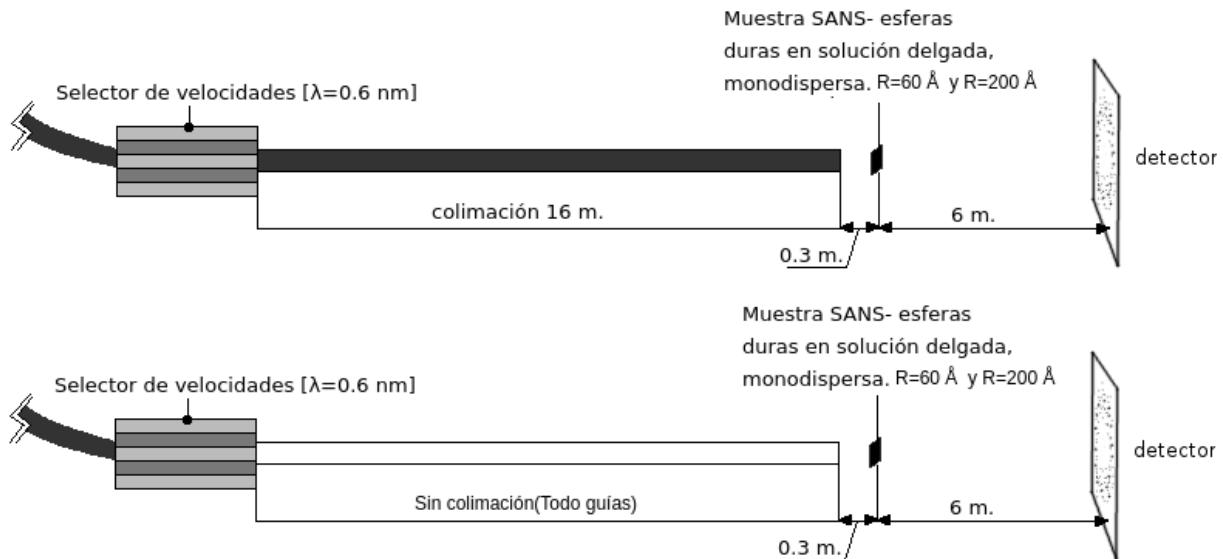


Figura 7.3.1: Configuración experimental. Parte B.

### 7.3.1. Presentación de los resultados

	Radio de la partículas	Intensidad [U.R]
Maxima Colimación (16 m)	$R=60 \text{ \AA}$	2.8
	$R=200 \text{ \AA}$	459.8
Sin colimación (Todo guías)	$R=60 \text{ \AA}$	104.1
	$R=200 \text{ \AA}$	17255.2

Tabla 7.3.1: Intensidades de las distintas configuraciones experimentales registradas en el detector.

En la Figura 7.3.2 se presenta las distribuciones en  $\mu$  resultantes de la dispersión de neutrones en las muestras con las configuraciones de colimación mencionadas. Las curvas han sido normalizadas para compararlas entre ellas. En la Tabla 7.3.1 se presenta la intensidad en unidades relativas [U.A] en el detector resultante de la dispersión debido a cada muestra y configuración de colimación.

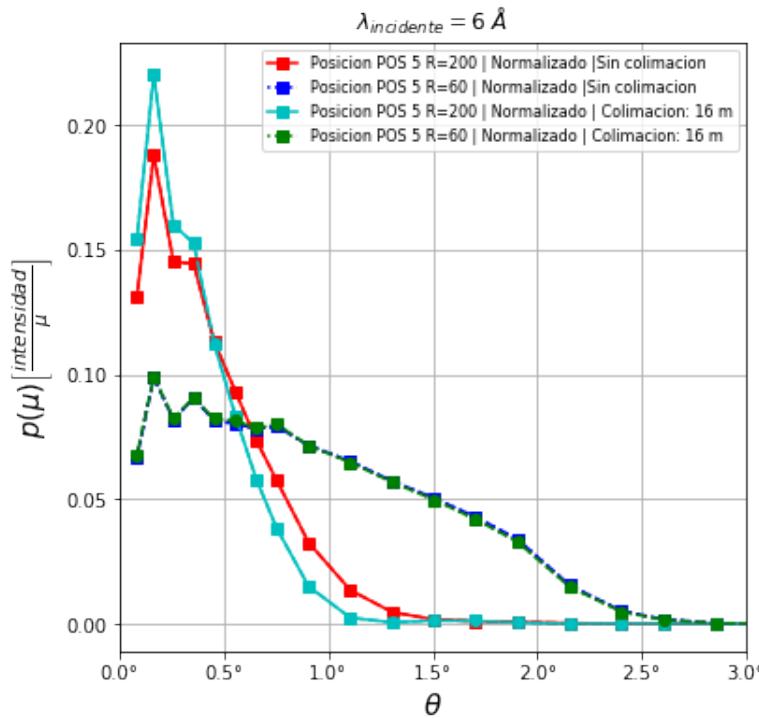


Figura 7.3.2: Distribuciones en  $\mu$  normalizadas resultantes de la dispersión de neutrones en las dos muestras monodispersas de radios distintos con las configuraciones de colimación descriptas.

### 7.3.2. Análisis de los resultados

En primer lugar observamos que los resultados son acordes a los esperados. Las distribuciones resultantes de la dispersión en la muestra con partículas de radio  $R=200 \text{ \AA}$  presentan menor divergencia que los obtenidos para la muestra con partículas de radio  $R=60 \text{ \AA}$ , sin importar la configuración de colimación. En particular para la muestra con  $R=200 \text{ \AA}$  sucede que si se utiliza la máxima colimación la distribución resultante tiene más resolución (menor divergencia) que la configuración no colimada. Es decir la mayor colimación genera una mayor resolución. Sin embargo hay que considerar que esta mayor resolución es a expensas de una menor intensidad como lo indica la tabla.

Por otro lado para la muestra con  $R=200 \text{ \AA}$ , los resultados no difieren entre las dos configuraciones de colimación. Este comportamiento se explica porque el eventual ancho adicional de la divergencia entre las distribuciones asociada a cada configuración de colimación no es significativa comparada con el ancho de la distribución. Por lo tanto ésta diferencia en la divergencia queda oculta en el ancho de la distribución resultante de la dispersión de neutrones. Dado que la resolución para ambas configuraciones resulta la misma, es inmediato que debido a la mayor

intensidad y por lo tanto menor tiempo de irradiación de la muestra se prefiere la configuración no colimada.

Finalmente se destaca el hecho que la simulación del instrumento SANS Multipropósito junto con su guía y con las herramientas de cálculo confeccionadas permiten diseñar mejor los experimentos, con una mínima idea del rango de tamaños que serán estudiados.

# **Capítulo 8**

## **Conclusiones**

El presente trabajo integrador se centró en la implementación con buenos resultados de una cadena de cálculo asociada al haz de neutrones GF2 y ulterior haz GF2b del Reactor RA-10 para transportar neutrones a un instrumento SANS Multipropósitos. Esto involucró el conocimiento acerca del diseño integral del reactor, y en particular del detalle de fuentes fría, geometría de conductos y guías, entre otros. Además, implicó el desarrollo de diversas herramientas de uso general y su implementación efectiva al caso de estudio.

Inicialmente se obtuvo información estadística de la distribución neutrónica de la corriente incidente al haz GF2 proveniente de la fuente fría del reactor mediante el empleo de fuentes de tracks. Las mismas resultaron suficientes para calcular corrientes integrales en puntos cercanos a la superficie donde se registraron, pero sin la estadística necesaria para la caracterización detallada de las distribuciones neutrónicas en distintas posiciones del haz GF2 y ulterior haz GF2b. En consecuencia se hizo uso de fuentes de distribuciones que posibilitaron dicha caracterización para la implementación de instrumentos.

A su vez, las distribuciones neutrónicas fueron obtenidas y analizadas mediante un conjunto de detectores diseñados para caracterizar distintos aspectos del haz de neutrones. Estos detectores fueron colocados en distintos puntos de importancia en la extensión del haz bajo estudio. La caracterización del transporte de los neutrones a través del análisis de las distribuciones neutrónicas en distintas posiciones del haz permitió el entendimiento del impacto de los componentes ópticos sobre las distribuciones, como pueden ser: guías rectas, guías curvas, selector de velocidades, colimadores. A su vez, variaciones sobre el mismo componente también permitieron el entendimiento del efecto de los distintos parámetros que definen un componente sobre la intensidad del haz y las distribuciones obtenidas. Estos parámetros fueron el  $m$  y el radio de curvatura en el caso de las guías y las dimensiones geométricas del selector de velocidades (necesario para la monocromatización del haz requerida por el instrumento SANS Multipróposito).

Entre los resultados que son de particular interés para el proyecto LAHN se destacan los referidos a la evaluación de la performance de 3 diseños de guías curvas del haz neutrónico frío GF2b para el instrumento SANS Multipropósito. Esta evaluación fue orientada a la valoración de 3 criterios que se consideran relevantes en el desempeño de las guías curvas sujeta a las necesidades del proyecto, ellos son:

- **El desempeño neutrónico**, más específicamente la intensidad de la corriente incidente en la muestra en el instrumento SANS Multipropósito.
- **El costo de la guía**, que queda determinada sobre todo por el m de la guía.
- **Aspectos geométricos**, determinado fundamentalmente por la distancia de separación resultante entre las guías curvas GF2a y GF2b, al final de las mismas.

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

A los fines del instrumento SANS, el diseño I, cuyo radio de curvatura es igual a  $R=929$  m y posee  $m=1$  en todas sus caras, tiene el mismo desempeño neutrónico que en diseño II, cuyo radio de curvatura es el mismo que el diseño I y posee  $m=2$  en todas sus caras. El diseño II es más costoso dado el mayor m con respecto al diseño I.

A los fines del instrumento SANS, el diseño I tiene el mismo desempeño neutrónico que el diseño III , cuyo m es el mismo que el diseño I pero su radio de curvatura es  $R=1300$  m. Sin embargo, el diseño III genera una menor distancia de separación con la guía GF2a. Los costos de ambos diseños son similares, dado que el mayor radio de curvatura no genera una reducción apreciable en la longitud de la guía del diseño III.

De los resultados anteriores se concluyó que el diseño I es el que resulta más adecuado entre los 3 presentados para cumplir las necesidades de la guía curva en el proyecto LAHN.

Finalmente se concluye con una comparación de los resultados reportados para el instrumento SANS Multipropósito en la guía V4 en el reactor BER-II con los obtenidos en el presente trabajo con el RA-10. Se determinó que la corriente neutrónica total incidente en la muestra es al menos 9 veces mayor que la corriente neutrónica total reportada con el reactor BER II para todas las longitudes de onda y todas las configuraciones de colimación y para la misma incertezza en la longitud de onda sin importar cualquiera de los 3 diseños de guías curvas que se utilicen. Las causas consideradas de esta amplia diferencia fueron la mayor potencia del reactor RA-10 frente al BER-II (3 veces más) y la calidad de la fuente fría de cada reactor, siendo la del RA-10 de deuterio líquido a 23 K y la del BER-II de hidrógeno hipercrítico manipulada a una temperatura que varía desde 25K a 35K, de menor calidad.

# Bibliografía y Referencias

- [1] SwissNeutronics. <https://www.swissneutronics.ch>. XIII, 7, 10
- [2] Th Keller, Th Krist, A Danzig, U Keiderling, F Mezei, and A Wiedenmann. The polarized neutron small-angle scattering instrument at bensc berlin. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 451(2):474–479, 2000. XVI, 66, 67
- [3] Ariel Márquez. Análisis de los haces de neutrones térmicos y fríos. *GERENCIA DE ÁREA DE ENERGÍA NUCLEAR, GERENCIA INGENIERÍA NUCLEAR, PROYECTO RA-10*, 2016. 3, 10
- [4] Comisión Nacional de Energía Atómica. Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones. <http://www.lahn.cnea.gov.ar/>. 5
- [5] <https://mirrotron.com/en>. Mirrotron. 8
- [6] Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Monte\\_Carlo\\_N-Particle\\_Transport\\_Code](https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_N-Particle_Transport_Code). 11
- [7] McStas. McStas - A neutron ray-trace simulation package. <http://www.mcstas.org/>. 11
- [8] Roberto Fairhurst. *Cálculo neutrónico detallado de haces y guías de neutrones del reactor RA-10*. Proyecto integrador de la carrera ingeniería nuclear, 2017. 21, 43
- [9] John R Lamarsh and Anthony John Baratta. *Introduction to nuclear engineering*, volume 3. Prentice hall Upper Saddle River, NJ, 2001.
- [10] Karl-Heinrich Beckurts and Karl Wirtz. *Neutron physics*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [11] Kim Lefmann and Kristian Nielsen. Mcstas, a general software package for neutron ray-tracing simulations. *Neutron news*, 10(3):20–23, 1999. 100

# **Apéndices**

# Apéndice A

## Error estadístico en McStas

En una simulación típica, el resultado de McStas [11] consistirá en una cuenta de historias de neutrones (“rayo”) con diferentes pesos. La suma de esos pesos es un estimado del número medio de neutrones incidentes al detector por segundo en un experimento “real”. El resultado del conteo resulta:

$$I = \sum_i p_i = N\bar{p} \quad (\text{A.1})$$

donde  $N$  es el número de rayos incidentes al detector y  $\bar{p}$  el peso promedio.

Para dar un estimado del error estadístico, se considera primero la aproximación de que el peso de todos los neutrones contados es el mismo, o sea que  $p_i \approx \bar{p}$ , y que se observa un número elevado de neutrones,  $N \geq 10$ . Luego, se asemeja que  $N$  sigue una distribución normal con una incertezza  $\sigma(N) = \sqrt{N}$ . Entonces, la incertezza estadística de la intensidad observada se torna:

$$\sigma = \sqrt{N}\bar{p} = \frac{I}{\sqrt{N}} \quad (\text{A.2})$$

como resulta en los experimentos de neutrones en la realidad (donde  $\bar{p} \equiv 1$ ). Para una mejor aproximación se vuelve a la ecuación A.1. Permitiendo variaciones en  $N$  y  $\bar{p}$ , se calcula la varianza de la resultante intensidad, asumiendo que las dos variables son estadísticamente independientes:

$$\sigma^2(I) = \sigma^2(N)\bar{p}^2 + N^2\sigma^2(\bar{p}) \quad (\text{A.3})$$

Asumiendo que  $N$  sigue una distribución normal, se llega a que  $\sigma^2(N)\bar{p}^2 = N\bar{p}^2$ . Luego, asumiendo que los pesos individuales,  $p_i$ , siguen una distribución gaussiana (lo cual no siempre es

cierto) se tiene que  $N^2\sigma^2(\bar{p}) = \sigma^2(\sum_i p_i) = N\sigma^2(p_i)$  y se llega a que:

$$\sigma^2(I) = N(\bar{p}^2 + \sigma^2(p_i)) \quad (\text{A.4})$$

La varianza estadística de los  $p_i$  es estimada por  $\sigma^2(p_i) \approx (\sum_i p_i^2 - N\bar{p}^2) / (N - 1)$ . La varianza resultante se lee:

$$\sigma^2(I) = \frac{N}{N-1} N \left( \sum_i p_i^2 - \bar{p}^2 \right) \quad (\text{A.5})$$

Para casi cualquier valor de  $N$  positivo, esto último es muy bien aproximado por la simple expresión

$$\sigma^2(I) = \sum_i p_i^2 \quad (\text{A.6})$$

Como un chequeo de consistencia, se nota que para  $p_i$  todos iguales, esto se reduce a la ecuación A.2. Para computar las intensidades y las incertezas, los detectores en McStas arrojan  $I = \sum_i p_i$  y  $\sum_i p_i^2$