

12.322



UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN



Comisión Nacional  
de Energía Atómica

# **Estimación del flujo adjunto a dos grupos de energía en el RA-1**

**Guadalupe Mestre Ahumada**

**Proyecto Final Integrador para la carrera de  
Ingeniería Nuclear con Orientación en Aplicaciones**

**Director:**

**Mg. Ing. Santiago Bazzana**

**Co-Directora:**

**Lic. Alejandra Benhaim**

**Ezeiza, Buenos Aires, Argentina.**

**Octubre 2023**

# Agradecimientos

A mis directores, Alejandra Benhaim y Santiago Bazzana, por su dedicación constante y su vocación. Son excelentes profesionales y, por sobre todo, buenas personas.

A Federico Frith por la dedicación en el diseño y construcción del dispositivo, y a Jorge Castillo por su colaboración.

A Pablo Bellino por su consejo y guía durante todo el trabajo.

A todo el personal del RA-1 por la buena disposición y la asistencia a lo largo de las experiencias llevadas a cabo.

A Silvia Thorp y a Flavia Felicioni por facilitarnos materiales importantes para este trabajo.

Al ECRI por la confección de la muestra de ULE utilizada.

A mis papás, Joaquín y Aída, por su amor y apoyo constantes que me impulsaron a llegar hasta acá.

A mis hermanos Vero, Caro, Juli y Javi, por su amor, consejos, ayuda y apoyo atemporal. A mis cuñados y sobrinos por siempre estar.

A Die, mi compañero en este camino, por apoyarme y acompañarme incondicionalmente.

A Mariu, Karen, Dani y Celes, por su amistad de tantos años y siempre estar presentes a pesar de las distancias.

A Gigi, Lu y Ju, por su amistad y apoyo en estos tres años de ingeniería nuclear y por acompañarme durante momentos difíciles.

A la Comisión Nacional de Energía Atómica por brindarme la posibilidad de estudiar esta carrera a través de la beca de estudio.

A mis compañeros de curso porque fueron parte de este proceso, y al Instituto Dan Beninson por haberme formado.

# Resumen

El presente trabajo fue desarrollado en el reactor de investigación argentino RA-1, en donde se obtuvieron perfiles de flujo adjunto a dos grupos de energía para una posición interna del núcleo del reactor.

Se diseñó y se utilizó un dispositivo posicionador para recorrer la posición axial estudiada y realizar distintas mediciones. Se logró obtener un perfil de flujo térmico directo sin perturbar utilizando un detector tipo SPND previamente caracterizado en la zona de interés. Adicionalmente se estimó el cambio en reactividad provocado por una muestra de cadmio y por otra de uranio en función de la posición. También se lograron determinar valores de secciones eficaces macroscópicas de dichas muestras mediante simulación numérica utilizando MCNP5.

Los perfiles de flujo adjunto obtenidos resultaron ser consistentes con valores esperados teóricamente y presentaron incertezas de alrededor del 14 % en el rango térmico y del 18 % aproximadamente para el rango rápido.

# Contenido

<b>Contenido</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y objetivos . . . . .	1
1.2. Descripción del RA-1 . . . . .	2
1.3. Teoría de perturbaciones . . . . .	4
1.4. Medición del flujo neutrónico . . . . .	9
1.5. Medición de la reactividad . . . . .	14
1.6. Simulación de parámetros del reactor . . . . .	15
1.7. Estimación del flujo adjunto . . . . .	16
<b>2. Metodología Experimental</b>	<b>19</b>
2.1. Calibración del detector SPND . . . . .	23
2.2. Medición del flujo directo sin perturbar y de las perturbaciones introducidas por las diferentes muestras . . . . .	26
<b>3. Resultados y discusiones</b>	<b>29</b>
3.1. Calibración de la respuesta del SPND en función del flujo . . . . .	29
3.1.1. Corriente del SPND . . . . .	29
3.1.2. Estimación del flujo con el método de los dos materiales . . . . .	30
3.1.3. Resultados de los flujos térmico y epitérmico . . . . .	33
3.1.4. Sensibilidad . . . . .	35
3.2. Flujo directo sin perturbar . . . . .	36
3.3. Medición de reactividad en transitorios . . . . .	38
3.4. Secciones eficaces macroscópicas . . . . .	41
3.5. Flujo adjunto . . . . .	42
<b>4. Conclusiones</b>	<b>45</b>
<b>A. Flujo adjunto: desarrollo de ecuaciones</b>	<b>49</b>

*Contenido*

---

A.1. Teoría de perturbaciones a dos grupos de energía . . . . .	49
A.2. Perturbaciones . . . . .	50
<b>B. Ritmos de activación: tablas de datos</b>	<b>53</b>

# Listado de abreviaturas

BC3: Barra de control *N*°3

BNCT: *Boron Neutron Capture Therapy*

CIC: Cámara de ionización compensada

CM5: Canal de marcha 5

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica

DERyC: Departamento Estudios de Reactores y Centrales

EECC: Elementos combustibles

ECRI: Elementos Combustibles para Reactores de Investigación

HPGe: *High-purity germanium*

IDB: Instituto Dan Beninson

SPND: *Self-Powered Neutron Detector*

ULE: Uranio levemente enriquecido



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y objetivos

El reactor de investigación argentino RA-1 fue el primer reactor de Latinoamérica, ensamblado íntegramente por profesionales de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y puesto a crítico en el año 1958. Al día de hoy, con algunas modificaciones en su diseño original, sigue formando profesionales y siendo utilizado para realizar distintos experimentos tales como irradiación de animales pequeños para BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*), irradiación de tejidos in vitro, ensayos variados, entre otros. También suelen llevarse a cabo experiencias de rutina como calibraciones en potencia o mediciones de flujo en distintas posiciones, buscando así una descripción más completa del reactor.

Entre las ramas que se dedican a la física de reactores, el estudio de la cinética de un reactor es de gran interés para la predicción de comportamientos ante ciertos eventos. Conocer la reactividad del sistema permite analizar la evolución del reactor y operarlo de forma segura, y una herramienta útil para determinar este cambio en reactividad es el flujo adjunto. Éste, también denominado función importancia, es una función de peso que permite cuantificar el cambio en reactividad inducido por una perturbación en determinada posición del reactor, entendiéndose como perturbación a una modificación de alguna característica del reactor que cambie su estado de criticidad.

Las regiones del reactor destinadas a realizar ensayos pueden ser consideradas como zonas en donde se realizan pequeñas perturbaciones en el sistema cuando se inserta algún material en ellas. Por tal motivo son de interés a la hora de estudiar el efecto en reactividad que los mismos ocasionan. Para el presente trabajo se eligió como lugar de estudio una de las posiciones de irradiación internas del

núcleo del reactor. El objetivo principal fue el de estimar allí el perfil axial del flujo adjunto utilizando teoría de perturbaciones a dos grupos de energía. Parte de esta estimación se realizó de forma empírica mediante mediciones del flujo directo sin perturbar y de los cambios en reactividad por inserción de distintas muestras en la región.

Para poder construir un perfil de flujo lo más preciso posible se deben realizar mediciones en varias posiciones a lo largo de la zona de estudio, por lo que un requerimiento para la parte experimental fue el poder posicionar las muestras y/o detectores en determinados puntos de forma precisa. En cuanto a los datos a recolectar, se decidió utilizar un detector SPND (*Self-Powered Neutron Detector*) ya que brinda una respuesta relativamente rápida en función del tiempo y, además, por sus características de diseño podemos considerar que no cambia las condiciones del sistema de estudio de forma significativa.

Por todo lo expuesto se considera que los objetivos específicos de este trabajo fueron:

- caracterizar la respuesta del detector SPND a lo largo de la posición de trabajo.
- diseñar un dispositivo que permita el movimiento preciso de los detectores y/o muestras a utilizar.

En los siguientes apartados se presentarán el sistema de estudio y el marco teórico correspondiente.

## 1.2. Descripción del RA-1

El RA-1 es un reactor térmico tipo tanque abierto con un núcleo de geometría anular que alberga elementos combustibles (EECC) con forma de varilla, refrigerado y moderado por agua liviana desmineralizada. El arreglo de los combustibles es en coronas concéntricas y ubicados en una grilla de aluminio. Tanto en el centro del arreglo anular de EECC como por fuera del mismo se tiene grafito como material reflector. En total son tres reflectores de grafito de pureza nuclear: por fuera del núcleo está el *reflector externo*, en el centro de la corona se encuentra el *reflector central* y, por último, rodeando la corona de combustibles se encuentra el *reflector radial interior*.

Los EECC son de  $\text{UO}_2$  con uranio enriquecido al 19.7% en  $^{235}\text{U}$  y carbono como aislante, con revestimiento de aluminio. En la Figura 1.1 se presenta un corte con sus dimensiones y materiales correspondientes.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

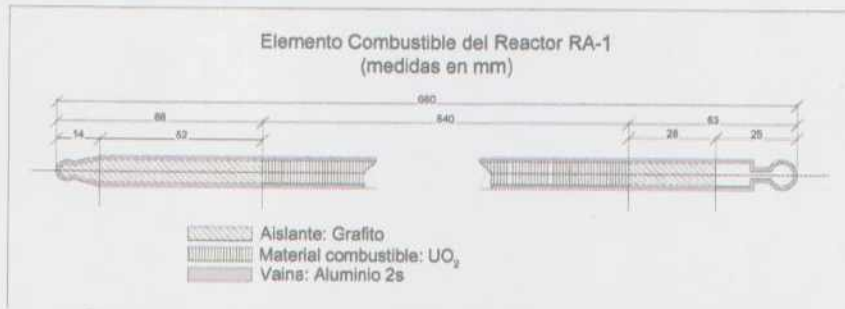


Figura 1.1: Dimensiones y materiales componentes del EECC.

Como blindaje exterior se tiene un anillo de plomo y bloques de hormigón con distintas composiciones (común, de hierro, de barita y pesado). Además, la columna de agua que se alza por sobre el núcleo también sirve como blindaje. La refrigeración del núcleo se logra con un circuito primario de agua liviana desmineralizada que circula a través del núcleo, extrayendo el calor de los EECC e intercambiándolo con una torre de enfriamiento, que finalmente lo disipa hacia la atmósfera. Como parte del control y apagado del reactor se tiene un banco de barras de control conformado por 4 barras de cadmio envainadas en acero inoxidable que rodean al núcleo. La potencia máxima que alcanza es de 40 kW. [1]

El reactor cuenta con cinco posiciones de irradiación: dos en el reflector central, una en el reflector externo y dos dispuestas en la grilla del núcleo que son utilizadas para colocación de dispositivos experimentales (*loop* y crióstato), siendo todas de acceso vertical. Además, posee 3 columnas de irradiación: una térmica, una epitérmica y una rápida, ubicadas de forma radial y con acceso horizontal.

Se trabajará en la posición de la *loop*, notada como N2 y señalada en color amarillo en el esquema de la Figura 1.2.

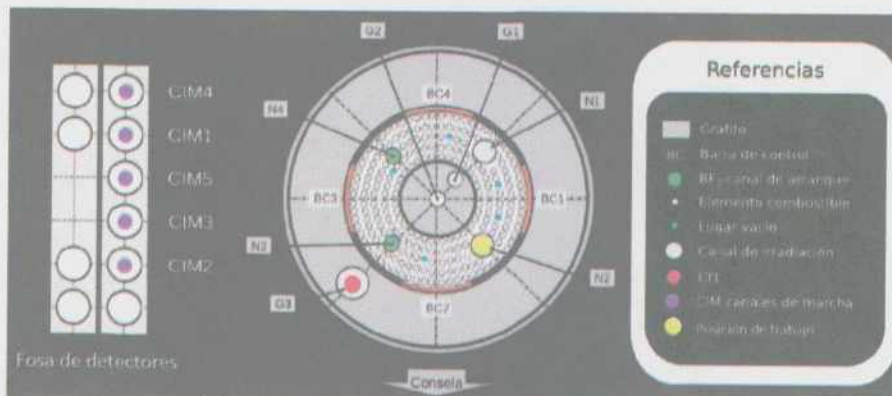


Figura 1.2: Corte transversal del RA-1. [2]

En esta posición se encuentra ubicado un tubo de aluminio estanco que llega en profundidad hasta mitad de longitud activa de los EECC.

### 1.3. Teoría de perturbaciones

Partiendo de la ecuación de difusión y trabajando en condiciones estáticas, ubicando el término de fisiones en el operador  $\hat{F}$  y el resto de las interacciones que tiene el neutrón (absorciones, fugas, migraciones) en el operador  $\hat{M}$ , se puede reescribir la misma en términos de autovalores y autovectores según la notación matricial:

$$\hat{M}_0 \phi_0(\bar{r}, E) = \lambda_0 \hat{F}_0 \phi_0(\bar{r}, E) \quad (1.1)$$

donde:  $\hat{M}_0$  es el operador de absorciones, fugas y migraciones,  $\hat{F}_0$  es el operador de fisiones,  $\phi_0(\bar{r}, E)$  representa el flujo directo dependiente de la posición  $\bar{r}$  y de la energía  $E$ , y  $\lambda_0$  es la inversa del factor de multiplicación del sistema. El subíndice cero indica que estos parámetros están asociados al sistema sin perturbar. Cuando ocurre una perturbación se alcanza un nuevo estado:

$$\hat{M} \phi(\bar{r}, E) = \lambda \hat{F} \phi(\bar{r}, E) \quad (1.2)$$

Ambos estados se relacionan por un cambio ( $\Delta$ ) ocurrido, y, en principio, se plantea un caso genérico de cambio en todas las componentes del sistema:

$$\begin{aligned} \hat{M} &= \hat{M}_0 + \Delta \hat{M} \\ \hat{F} &= \hat{F}_0 + \Delta \hat{F} \\ \phi(\bar{r}, E) &= \phi_0(\bar{r}, E) + \Delta \phi(\bar{r}, E) \\ \lambda &= \lambda_0 + \Delta \lambda \end{aligned} \quad (1.3)$$

En ciertas ocasiones es interesante poder estimar el cambio en reactividad ( $\Delta\rho$ ) producido en el sistema original sin tener que resolver el sistema perturbado. Teniendo en cuenta que se puede establecer la relación  $\Delta\rho = -\Delta\lambda$ , se intentará obtener una expresión para este parámetro. Para ello se reemplazarán las igualdades de las Ecuaciones 1.3 en la Ecuación 1.2 y se despreciarán los términos que involucran cambios de orden dos o mayores, obteniendo:

$$\hat{M}_0 \Delta \phi + \Delta \hat{M} \phi_0 = \lambda_0 \hat{F}_0 \Delta \phi + \lambda_0 \Delta \hat{F} \phi_0 + \Delta \lambda^{(1)} \hat{F}_0 \phi_0 \quad (1.4)$$

donde el superíndice (1) indica que se trabaja a primer orden. Reacomodando algunos términos se llega a la Ecuación 1.5:

$$\Delta \hat{M} \phi_0 \doteq [\lambda_0 \hat{F}_0 - \hat{M}_0] \Delta \phi + \lambda_0 \Delta \hat{F} \phi_0 + \Delta \lambda^{(1)} \hat{F}_0 \phi_0 \quad (1.5)$$

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

Dado que de esta expresión no se puede encontrar el valor de  $\Delta\lambda^{(1)}$  ya que implicaría conocer el  $\Delta\phi$  y por lo tanto implicaría haber resuelto el sistema perturbado, se puede ver que si se define un producto escalar en el espacio mediante una función de peso arbitraria ( $\phi^w$ ), la expresión que se obtendría sería [3]:

$$\begin{aligned} \int_V \int_E \phi^w \Delta \hat{M} \phi_0 dE dV &= \int_V \int_E \phi^w [\lambda_0 \hat{F}_0 - \hat{M}_0] \Delta \phi dE dV \\ &+ \int_V \int_E \phi^w \lambda_0 \Delta \hat{F} \phi_0 dE dV + \int_V \int_E \phi^w \Delta \lambda^{(1)} \hat{F}_0 \phi_0 dE dV \end{aligned} \quad (1.6)$$

De esta expresión resulta de interés anular el término de  $\Delta\phi$ . Para lograr esto, basta recordar el problema adjunto asociado al sistema sin perturbar:

$$\lambda_0 \hat{F}_0^\dagger \phi_0^* = \hat{M}_0^\dagger \phi_0^* \quad (1.7)$$

Teniendo en cuenta las propiedades del operador adjunto [3], resulta sencillo notar que basta considerar como función de peso al flujo adjunto para anular el término de la Ecuación 1.6 asociado al cambio entre los flujos. De esta manera se obtiene:

$$\int_V \int_E \phi_0^* \Delta \hat{M} \phi_0 dE dV = \int_V \int_E \phi_0^* \lambda_0 \Delta \hat{F} \phi_0 dE dV + \int_V \int_E \Delta \lambda^{(1)} \phi_0^* \hat{F}_0 \phi_0 dE dV \quad (1.8)$$

y despejando el término del cambio en reactividad a primer orden se tiene:

$$\Delta \rho^{(1)} = \frac{\int_V \int_E \phi_0^* [\lambda_0 \Delta \hat{F} - \Delta \hat{M}] \phi_0 dE dV}{\int_V \int_E \phi_0^* \hat{F}_0 \phi_0 dE dV} \quad (1.9)$$

el cual estará dado por variaciones en el operador de fisiones y/o en el operador de no fisiones.

### Flujo adjunto

El flujo adjunto o función importancia ( $\phi^*$ ) es una función que indica cuán importante es el cambio en reactividad provocado por cierta perturbación. A continuación se presenta un ejemplo para poder interpretar este parámetro de una mejor manera [4]:

Se tiene un núcleo homogéneo de un reactor térmico tipo slab con reflector a ambos lados a dos grupos de energía como sistema de análisis, el cual se muestra en la Figura 1.3.

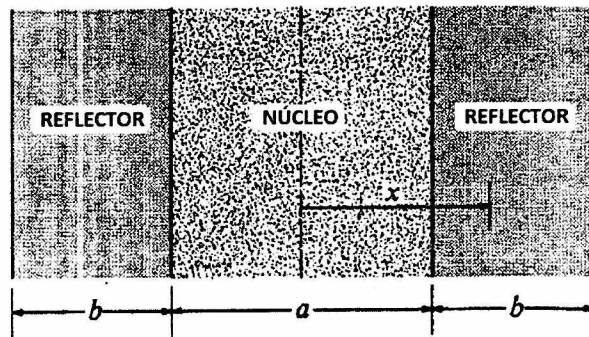


Figura 1.3: Reactor a estudiar. [4]

En este caso, el flujo directo rápido (grupo 1) y el flujo directo térmico (grupo 2) tienen una distribución espacial como la mostrada en la Figura 1.4.

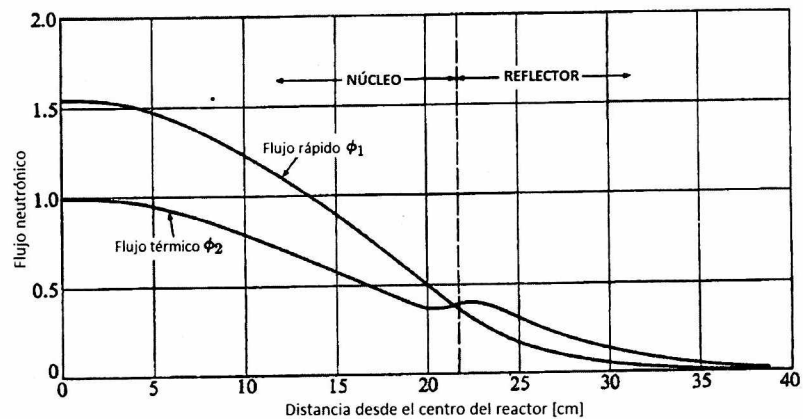


Figura 1.4: Flujo directo a dos grupos en núcleo y en reflector. [4]

Es decir, en zona de núcleo en dónde por cada neutrón térmico que fisiona se producen en promedio  $\nu$  neutrones rápidos, el flujo rápido será mayor. Una vez fuera del núcleo y en zona de reflector se tiene un medio compuesto por un material con alta sección eficaz macroscópica de *scattering* de manera tal de disminuir la energía de los neutrones rápidos hasta termalizarlos y minimizar así el término de fugas. Esta es la razón por la que se puede observar un pico en el flujo térmico en esta parte del reactor, mientras que el flujo rápido sigue decreciendo y lo hace incluso más rápidamente.

Ahora bien, teniendo en cuenta que la sección eficaz macroscópica de absorción por fisión del grupo térmico será mayor que la del grupo rápido en el núcleo, esto indica que los neutrones térmicos son absorbidos a un ritmo mayor que los neutrones rápidos y por lo tanto contribuyen más directamente a la cadena de

reacción. En otras palabras, los neutrones que se agregan al grupo 2 son más importantes en el cambio en reactividad que los neutrones que se agregan al grupo 1. Por esta razón, al estudiar los flujos adjuntos (Figura 1.5), estos se comportan inversamente a lo observado inicialmente para el flujo directo.

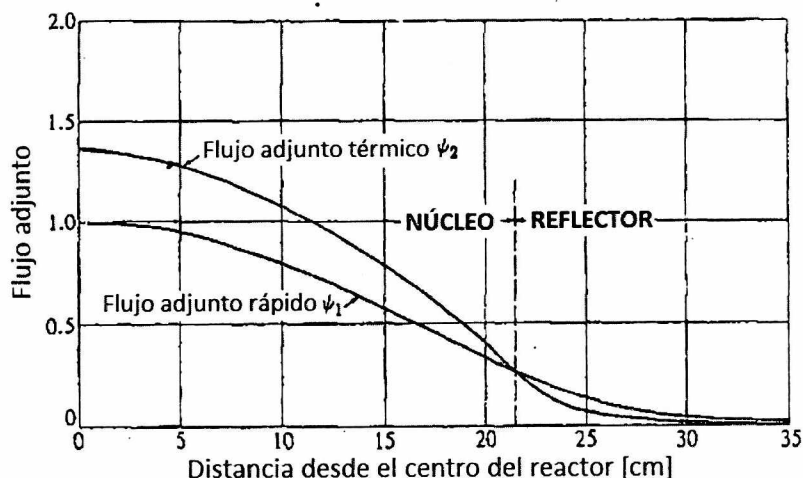


Figura 1.5: Flujo adjunto a dos grupos de energía en el núcleo de un reactor tipo slab. [4]

### Estimación del flujo adjunto a dos grupos de energía

A continuación se desarrollarán las ecuaciones de flujo adjunto para una perturbación por muestra fisible y para una perturbación por muestra absorbente, y se trabajará discretizando la energía a dos grupos según:

- Grupo 1: neutrones rápidos. Rango energético:  $E_{corte}$  a 20 MeV.
- Grupo 2: neutrones térmicos. Rango energético: 0 a  $E_{corte}$ .

siendo la  $E_{corte}$  un valor arbitrario elegido según análisis y que estará alrededor del fin de la zona térmica (más adelante se justificará la elección hecha).

La perturbación de material fisible afectará al grupo térmico en el término de las fisiones y también en el de las absorciones, ya que no pueden ser desestimadas debido a la fuerte interacción de los neutrones con el material fisible (ver **Anexo A**). En cuanto al material absorbente se trabajará con cadmio, el cual es un fuerte absorbente de neutrones en el rango térmico, por lo que esta perturbación afectará al término de absorciones del grupo térmico. Se considerará que la muestra tiene dimensiones lo suficientemente pequeñas como para considerar al flujo constante sobre ésta.

Al trabajar con la Ecuación 1.9 para cada caso (la deducción completa se muestra en el **Anexo A**) se obtienen las siguientes expresiones:

$$\Delta\rho_{fis} = \frac{\int_V \left( \phi_{01}^* \lambda_0 \Delta(v_2 \Sigma_{f2}^{fis}) - \phi_{02}^* \Delta \Sigma_{a2}^{fis} \right) \phi_{02} dV}{\int_V (\phi_{01}^* v_1 \Sigma_{f1} \phi_{01} + \phi_{01}^* v_2 \Sigma_{f2} \phi_{02}) dV} \quad (1.10)$$

donde  $\Delta\rho_{fis}$  es el cambio en reactividad provocado por la inserción de la muestra físil,  $\Sigma_{f2}^{fis}$  es la sección eficaz macroscópica de fisiones y  $\Sigma_{a2}^{fis}$  es la sección eficaz macroscópica de absorción, ambas de la muestra físil y condensadas al grupo 2 de energía.

$$\Delta\rho_{abs} = - \frac{\int_V \phi_{02}(\bar{r}_0) \Delta \Sigma_{a2}^{abs} \phi_{02}^*(\bar{r}_0) dV}{\int_V (\phi_{01}^* v_1 \Sigma_{f1} \phi_{01} + \phi_{01}^* v_2 \Sigma_{f2} \phi_{02}) dV} \quad (1.11)$$

en este caso  $\Delta\rho_{abs}$  es el cambio en reactividad inducido por la muestra absorbente y  $\Sigma_{a2}^{abs}$  es la sección eficaz macroscópica de la muestra absorbente condensada al grupo térmico.

Como primera observación, el denominador es un término constante que se denotará como  $C$  y se normalizarán todos los resultados en función de esta constante, ya que como se desea obtener una función de peso dicha constante no afectará la definición de flujo adjunto. Como segunda observación, se puede decir que el cambio en las propiedades del sistema se da en el numerador, es decir, el cambio en reactividad es directamente proporcional a la perturbación y al valor de los flujos adjunto y directo. Despejando los términos de flujo adjunto para cada grupo de energía se obtiene:

$$\phi_{02}^*(\bar{r}_0) = - \frac{\Delta\rho_a(\bar{r}_0)C}{\phi_{02}(\bar{r}_0) \Delta \Sigma_{a2}^{abs}(\bar{r}_0) Vol_{abs}} \quad (1.12)$$

$$\phi_{01}^*(\bar{r}_0) = \frac{1}{\Delta(v_2 \Sigma_{f2}^{fis})(\bar{r}_0) Vol_{fis}} \left[ \frac{\Delta\rho_f(\bar{r}_0)C}{\phi_{02}(\bar{r}_0)} + \phi_{02}^*(\bar{r}_0) \Delta \Sigma_{a2}^{fis}(\bar{r}_0) Vol_{fis} \right] \quad (1.13)$$

donde se indicó con  $Vol_{abs}$  y  $Vol_{fis}$  a los volúmenes de las muestras de material absorbente y físil respectivamente.

Por lo tanto, para poder encontrar la función importancia para cada grupo se necesita hallar: el flujo térmico directo sin perturbar  $\phi_{02}(\bar{r}_0)$ , las secciones eficaces macroscópicas térmicas de absorción correspondientes  $\Delta \Sigma_{a2}^{abs}$  y  $\Delta \Sigma_{a2}^{fis}$ , el término  $\Delta(v_2 \Sigma_{f2}^{fis})$ , los volúmenes de las muestras y el cambio en reactividad del sistema por cada perturbación  $\Delta\rho_f$  y  $\Delta\rho_a$ . Por último, si el estado sin perturbar se define como el estado crítico (como en este caso),  $\lambda_0$  vale 1.

## 1.4. Medición del flujo neutrónico

### Detectores SPND

Los detectores auto-energizados SPND no necesitan de una fuente de energía externa para funcionar, sino que generan su propia corriente. En la Figura 1.6 se presentan dos cortes del mismo.

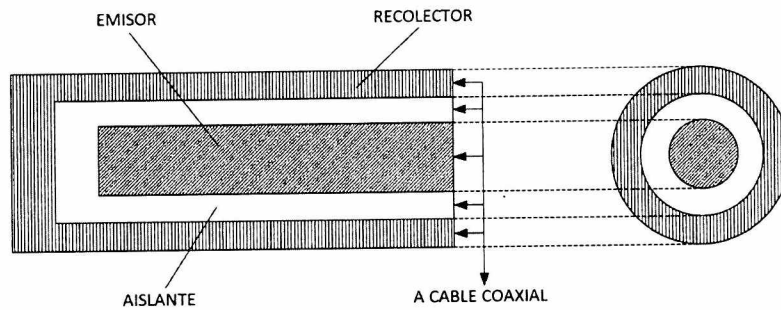


Figura 1.6: Vistas longitudinal y transversal del detector. [5]

El detector posee en su parte central un material emisor que interacciona con los neutrones del medio mediante la reacción nuclear  $(n, \beta^-)$ . Estas partículas  $\beta$  abandonan el material emisor y viajan a través de una capa aislante hasta depositarse en un material conductor. La diferencia de potencial generada entre el material emisor y el conductor da origen a una corriente eléctrica que viaja a lo largo de un cable coaxial y es recogida por un electrómetro. Con el electrómetro conectado a una computadora y con un software específico se obtiene una señal de corriente en función del tiempo.

Entonces, en principio, al exponer el detector a un flujo neutrónico por un período de tiempo  $t$  y sin tener en cuenta el quemado del mismo se tiene que:

$$I(t) = Cq\sigma N\phi(1 - e^{-\lambda t}) \quad [6] \quad (1.14)$$

donde  $I(t)$  es la corriente del detector,  $C$  es una constante adimensional que guarda información de la geometría y eficiencia del detector,  $q$  es la carga del electrón,  $\sigma$  es la sección eficaz de activación del material emisor,  $N$  es el número de átomos del emisor,  $\phi$  es el flujo neutrónico y  $\lambda$  es la constante de decaimiento del material emisor. Pasado determinado tiempo  $t$ , largo en comparación con el período de semi-desintegración del emisor (se suelen tomar cinco vidas medias del emisor), la señal se satura y se obtiene una corriente en estado estacionario dada por:

$$I_{sat} = Cq\sigma N\phi \quad [6] \quad (1.15)$$

Esta corriente de saturación resulta proporcional al flujo neutrónico, y puede utilizarse para monitorear el mismo. Pero, además de la reacción principal dada por la captura de neutrones hay otros fenómenos que se dan en el detector, en la Figura 1.7 se muestran todos los fenómenos que entran en juego durante la medición con SPND.

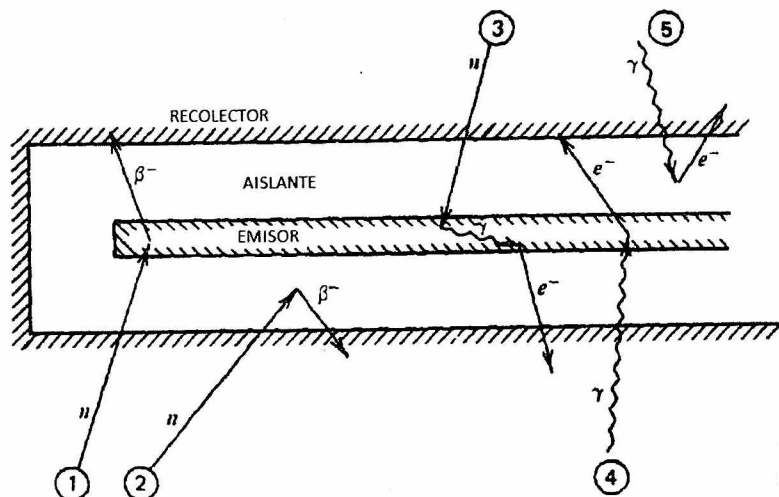


Figura 1.7: Reacciones principales y secundarias que toman lugar en el detector SPND. [6]

Los eventos marcados como 1 y 2 corresponden a capturas neutrónicas seguidas de decaimientos  $\beta$ , mientras que, por ejemplo, el evento 3 indica una interacción del emisor con un rayo gamma instantáneo emitido a partir de la captura neutrónica, la cual da origen a un electrón rápido secundario. Finalmente, los eventos 4 y 5 muestran la producción de electrones rápidos como consecuencia de interacciones de rayos gamma externos con el detector [6]. Esto indica que los rayos gamma tienen cierto porcentaje de interacción con estos detectores y forman parte de una porción de la señal de corriente total obtenida. Por lo tanto, además de la reacción esperada se presentan efectos de depresión de flujo por apantallamiento del emisor, producción de electrones Compton y fotoelectrones como resultado de la interacción de rayos gamma y también se da lugar a un porcentaje de auto-absorción por parte de las partículas  $\beta$ .

Teniendo todo esto en cuenta, considerando un material emisor con respuesta en el rango térmico y en el epitérmico y cierta contribución por parte del campo gamma presente, se puede escribir a la corriente emitida por el SPND según la Ecuación 1.16:

$$I(t) = S_{th}\phi_{th}(t) + S_{epi}\phi_{epi}(t) + I_{\gamma}(t) \quad [7] \quad (1.16)$$

Estas constantes de proporcionalidad  $S_i$  son propias de la respuesta que tenga el emisor a los distintos rangos de energía y de la posición en la que se llevan a cabo las mediciones, por lo que deberá hallarse su valor en la facilidad elegida para realizar este trabajo. Como se vio, en el cálculo de las mismas entra en juego la sección eficaz microscópica del emisor para el ritmo de reacción de interés, y esta depende de la temperatura. En un reactor de investigación esta variable es controlable y se puede trabajar a potencias muy bajas en donde no haya cambios considerables de temperatura que afecten la relación de la Ecuación 1.16, por lo que se descartan posibles desviaciones de esta relación lineal. En cuanto a la contribución gamma, hay diversos trabajos llevados a cabo en reactores multipropósito (en el reactor HANARO de Corea del Sur [8], en el RA-3 [5] y en el RA-1 [7]) que arrojan valores de contribución despreciables en general y en los que se describen distintas metodologías a aplicar para poder determinar este término. Una de ellas propone utilizar un detector con respuesta gamma similar a la del SPND utilizado, pero con la diferencia de tener una respuesta despreciable para neutrones, como podría ser uno con Zircaloy-4 como material emisor [5]. Por cuestiones de tiempo estas estimaciones no pudieron realizarse y, en base a las referencias marcadas anteriormente, la contribución gamma se considera despreciable. Se trabajó entonces con la expresión de la Ecuación 1.17.

$$I_{spnd}(t) = I_{th}(t) + I_{epi}(t) = S_{th}\phi_{th}(t) + S_{epi}\phi_{epi}(t) \quad (1.17)$$

Para la obtención de las constantes de proporcionalidad se propone realizar mediciones de flujo por activación neutrónica en posiciones con distintas relaciones espectrales utilizando el método de los dos materiales.

### Activación: método de los dos materiales

La base de este método está en irradiar hojuelas o alambres cuya composición sea una mezcla de materiales con características determinadas: uno de ellos en el que predominen las absorciones de neutrones térmicos (ejemplo: cobre) y otro que presente una fuerte respuesta en el rango epitérmico (ejemplo: oro). Se plantea entonces un sistema de ecuaciones en donde el ritmo de activación de cada material es directamente proporcional a la suma de la contribución del flujo térmico y del flujo epitérmico; y esta diferencia en el comportamiento de los materiales asegura que el determinante de este sistema de ecuaciones a resolver sea lo más distinto a cero posible. Los ritmos de activación quedan definidos según el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} R_{Au} \\ R_{Cu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{th-Au}F_{1-th} & \hat{\sigma}_{epi-Au}F_{1-epi} \\ \hat{\sigma}_{th-Cu}F_{1-th} & \hat{\sigma}_{epi-Cu}F_{1-epi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{th} \\ \phi_{epi} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

donde  $R_i$  es el ritmo de activación correspondiente al radioisótopo  $i$ ,  $\hat{\sigma}$  es la sección eficaz microscópica efectiva integrada en el rango de energía correspondiente

para la reacción  $(n, \gamma)$  del radioisótopo de interés,  $F_1$  es el factor de depresión de flujo para los distintos rangos de energía (se explica en detalle más adelante en el texto),  $\phi_{th}$  es el flujo térmico y  $\phi_{epi}$  el flujo epitérmico. Estos dos últimos términos corresponden a los flujos no perturbados por la presencia de los alambres.

Los flujos directos sin perturbar se definen según:

$$\phi_{th} = \int_0^{E_{th}} \phi(E) dE \quad (1.19)$$

$$\phi_{epi} = \int_{E_{th}}^{E_{epi}} \phi(E) dE \quad (1.20)$$

denotando como  $E_{th}$  la energía de corte térmico, y como  $E_{epi}$  la energía de corte epitérmico.

Las secciones eficaces microscópicas eficaces en el rango térmico y epitérmico se obtuvieron mediante simulación por MCNP5 (*Monte Carlo N-Particle v5*) [9]. Esta decisión se tomó en base a que siendo que en un espectro de energía real de un reactor suelen haber desviaciones del comportamiento ideal  $\frac{1}{v}$  de las secciones eficaces a bajas energías y también del comportamiento  $\frac{1}{E}$  en energías intermedias, su estimación por simulación presenta la ventaja de que los valores condensados se obtuvieron sobre el perfil de flujo real. De esta manera, se evita el uso de valores tabulados (que suelen abarcar rangos de energía amplios y hacer aproximaciones no válidas) y realizar correcciones engorrosas que requieren de datos muy precisos como por ejemplo la temperatura neutrónica.

La sección eficaz efectiva se define según:

$$\hat{\sigma} = \frac{\int \sigma(E) \tilde{\phi}(E) dE}{\int_{\Delta E} \tilde{\phi}(E) dE} \quad (1.21)$$

donde  $\Delta E$  representa el rango de energías térmica y epitérmica considerados. Tanto los ritmos como los flujos discretizados a dos grupos de energía se obtuvieron simulando los alambres en las posiciones en las que se llevó a cabo la irradiación, utilizando un modelo del reactor RA-1 [10]. De este modo, la sección eficaz calculada considera la presencia del alambre y, por lo tanto, la perturbación del flujo que éste genera ( $\tilde{\phi}(E)$ ).

En cuanto al factor de perturbación de flujo  $F_1$  [11], este corrige el autoapantallamiento del detector y la depresión del flujo ocasionada a los alrededores del

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

detector (alambre/hojuela). Se define como el producto entre el factor de apantallamiento de neutrones  $G$  y el coeficiente de depresión de flujo  $H$ .  $G$  es la proporción del flujo medio en el detector por el flujo en la superficie del mismo y representa la probabilidad de que los neutrones que entran a la muestra no sean capturados por la misma; mientras que  $H$  es la relación del flujo en la superficie sobre el flujo sin perturbar (previo a la inserción del material). Se define al factor  $F_1$  como la relación entre el flujo medio perturbado y el flujo sin perturbar. Se tiene entonces:

$$F_1 = GH = \frac{\bar{\phi} \phi_s}{\phi_s \phi_0} = \frac{\int_{\Delta E} \tilde{\phi}(E) dE}{\int_{\Delta E} \phi(E) dE} \quad (1.22)$$

donde  $\phi$  representa el flujo sin perturbar, es decir, cuando no se ubica el alambre ( $\phi_{th}$  y  $\phi_{epi}$  en la Ecuación 1.18). Nótese entonces que la expresión  $\hat{\sigma} F_1 \phi$  recupera la expresión del ritmo medido cuando se ubican los alambres, pero permite obtener los valores de flujo no perturbado por los mismos.

En cuanto al ritmo de reacción específico, este representa la fracción de átomos que decaen por segundo una vez que se alcanza la actividad de saturación. A partir de la irradiación del alambre, la actividad de saturación para cada uno de los isótopos de interés se obtiene a partir de la medición de los gammas emitidos por los radioisótopos generados en el alambre como:

$$R = \frac{M_{molar}}{mc\eta N_A} \frac{C(t_{med}) \delta_c}{\varepsilon(E_\gamma) \Gamma(E_\gamma) SS(E_\gamma)} \frac{\lambda}{(1 - e^{-\lambda t_{irr}}) e^{-\lambda t_{dec}} (1 - e^{-\lambda t_{med}})} \quad [12] \quad (1.23)$$

donde  $M_{molar}$  es la masa molar del elemento,  $m$  es la masa del detector,  $c$  es la concentración del elemento en el alambre,  $N_A$  es el número de Avogadro,  $\eta$  es la abundancia isotópica natural del isótopo de interés,  $C(t_{med})$  son las cuentas totales en el tiempo real de medición  $t_{med}$ ,  $\delta_c$  es la corrección por tiempo muerto,  $SS(E_\gamma)$  es el autoapantallamiento de rayos gamma,  $\varepsilon(E_\gamma)$  es la eficiencia del detector para la energía del rayo gamma,  $\Gamma(E_\gamma)$  es el rendimiento del rayo gamma,  $t_{irr}$  es el tiempo de irradiación,  $t_{dec}$  es el tiempo de decaimiento entre fin de la irradiación e inicio de la medición,  $t_{med}$  es el tiempo real de medición y  $\lambda$  es la constante de decaimiento del radioisótopo.

La corrección por autoapantallamiento de rayos gamma ( $SS(E_\gamma)$ ) surge de considerar que hay cierta atenuación en los rayos emitidos desde el detector: algunos interactúan dentro del material y son absorbidos antes de abandonar el mismo o llegan a la superficie con una energía mucho menor de la inicial con lo cual no son contabilizado en el pico de energía plena, por lo que el total de cuentas que

percibe el detector gamma es menor a la cantidad real de partículas emitidas por la fuente que se está midiendo.

En cuanto a la eficiencia del detector para la energía de los distintos rayos gamma, esta se obtiene al calibrar el detector en energía y en eficiencia con fuentes patrón. La corrección por tiempo muerto se obtiene como la relación entre el tiempo real de medición y el tiempo vivo, buscando corregir el efecto de pérdida de cuentas ocasionadas durante el tiempo en que el detector no puede resolver dos pulsos diferentes porque la separación temporal de dichos eventos es muy pequeña. Las cuentas registradas  $C(t_{med})$  y todos los tiempos involucrados se obtienen experimentalmente. En cuanto a los parámetros que corresponden a constantes de los materiales, los mismos se obtuvieron de bibliografía. [13]

## 1.5. Medición de la reactividad

La estimación de la reactividad se realiza mediante la resolución de las ecuaciones de la cinética puntual inversa a seis grupos de energía y sin fuente externa, resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{eff}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) \\ \frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{eff-i}}{\Lambda} n(t) - \lambda_i c_i(t) \quad i = 1, \dots, 6 \end{cases} \quad (1.24)$$

donde  $\rho$  es la reactividad buscada,  $\beta_{eff}$  es la fracción de neutrones retardados efectiva,  $\Lambda$  es el tiempo entre reproducciones,  $\lambda_i$  es la constante de decaimiento del grupo  $i$  de neutrones retardados,  $c_i$  es la concentración del grupo  $i$  y  $\beta_{eff-i}$  es la fracción de neutrones retardados del grupo  $i$ .

El sistema se resuelve mediante métodos numéricos implementados en el programa *Multireactímetro Digital* [14], que, a su vez, es un programa de adquisición de datos provenientes de detectores neutrónicos cuya señal es proporcional a la densidad neutrónica. El programa determina la reactividad en dólares, por lo tanto deben ingresarse el valor de  $\beta_{eff}$  del reactor determinado por cálculo y el tiempo entre reproducciones reducido ( $\Lambda^*$ ) que se obtiene por ruido neutrónico.

Los datos con los que se trabaja provienen de la señal de las cámaras de ionización compensadas (CIC), que es la corriente proporcional al flujo neutrónico, la cual pasa por un conversor corriente-tensión luego estos datos de voltaje a la tarjeta de adquisición, la cual los envía a la computadora del reactímetro y, finalmente, el programa procesa los datos para estimar  $\Delta\rho$ .

## 1.6. Simulación de parámetros del reactor

La implementación de códigos neutrónicos es una herramienta de amplia utilidad ya que permite representar sistemas complejos con un alto nivel de detalle y predecir parámetros cinéticos o corroborar datos experimentales. Para el cálculo de secciones eficaces y factores de corrección utilizados en este trabajo se empleó el código estocástico MCNP5.

A diferencia de un código determinístico, en donde el cálculo se basa en la resolución de la ecuación de transporte, en este tipo de códigos los distintos parámetros son obtenidos mediante la simulación de la vida de un gran número de partículas y su interacción con las distintas partículas del medio. El método de Monte Carlo utilizado busca describir situaciones sin el conocimiento exacto de por ejemplo la función densidad de probabilidad de la variable aleatoria a analizar. Se trata de describir el comportamiento de la partícula utilizando sorteos probabilísticos de interacción y secciones eficaces microscópicas. Para el cálculo de las distintas variables se utilizan los denominados *tallies* (acumuladores), los cuales guardan información de las partículas hasta alcanzar una estadística que sea representativa del problema.

Como ejemplo se tiene el cálculo del flujo neutrónico por longitud de tracks, en donde se define un volumen y se cuenta la longitud recorrida por cada paso  $j$  de la partícula por ese volumen. De esta manera, al sumar todas las interacciones de una misma partícula  $i$  se define el acumulador según:

$$\phi_i = \frac{\sum_j l_j}{V} \quad (1.25)$$

Luego, para obtener el flujo por unidad de partícula se suma la contribución de todas las partículas simuladas  $i$ :

$$\bar{\Phi} = \frac{\sum_i \phi_i}{N} \quad (1.26)$$

Y, finalmente, multiplicado por el factor de potencia, se obtiene el flujo neutrónico:

$$\phi = \bar{\Phi} F_{pot} = \bar{\Phi} \frac{Pot \nu}{E_f} \quad (1.27)$$

siendo Pot la potencia a la que trabaja el reactor,  $\nu$  la cantidad de neutrones liberados por fisión y  $E_f$  la energía liberada por fisión.

El método busca un valor de N grande para que tenga validez el Teorema Central del Límite, el cual dice que al trabajar con un número suficientemente grande

de determinada variable aleatoria con cualquier distribución de probabilidad, el comportamiento promedio de las mismas tenderá a una distribución gaussiana. De esta manera el programa informa el valor medio del resultado junto con su desviación estándar, y, además, hay una serie de chequeos estadísticos que se realizan para analizar qué tan fiables son los resultados. La varianza se define como:

$$\sigma(\bar{x})^2 = \frac{\sigma(x)^2}{N} \quad (1.28)$$

por lo tanto, para bajar el error estadístico se debe aumentar la cantidad de partículas simuladas.

La estructura del input para MCNP se basa en tres bloques:

- definición de celdas con su material y las superficies que la integran: se delimita un lugar geométrico en el espacio que estará ocupado por cierto material, y tendrá una forma determinada según las superficies que luego se definan.
- definición de superficies: en esta parte se asignan tipos de superficie y límites numéricos.
- definición de fuente y tallies: acá se indica qué partícula se desea simular, cómo será la fuente de la misma y qué se desea calcular y en dónde.

## 1.7. Estimación del flujo adjunto

Las expresiones de las Ecuación 1.13 y Ecuación 1.12 constituyen el punto de partida para el presente trabajo. A continuación se presentan en orden las distintas actividades llevadas a cabo:

### 1. Calibración del detector SPND:

- se utilizó el método de los dos materiales con alambres de Cu-Au(1.5 % en masa de oro).
- se calibró un detector de germanio hiperpuro (HPGe) en eficiencia y energía utilizando fuentes calibradas de  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$  y  $^{133}\text{Ba}$ ; y se midieron los ritmos de activación de los alambres.
- se calcularon por simulación con MCNP5 las secciones eficaces microscópicas efectivas, los factores de autoapantallamiento gamma y de depresión de flujo.

### 2. Medición del flujo directo sin perturbar:

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

- se calibró el dispositivo posicionador y se midió la corriente en posiciones determinadas a lo largo de la zona de trabajo.
  - con las sensibilidades halladas en el punto 1. se estimó el flujo neutrónico a dos grupos en función de la posición.
3. Estimación del cambio en reactividad:
- se utilizó el dispositivo posicionador calibrado para medir la corriente proporcional al flujo neutrónico a lo largo de los mismos puntos medidos para el flujo directo y se trabajó con el software *Multireactímetro Digital* para estimar el cambio en reactividad.
4. Simulación de secciones eficaces:
- se simularon las muestras utilizadas de manera precisa (con sus datos de masa y dimensiones correspondientes) en MCNP5 y se obtuvieron valores de secciones eficaces macroscópicas en función de la posición.
5. Estimación del flujo adjunto:
- con todos los datos obtenidos en los puntos previos se halló primero el flujo adjunto térmico en función de la posición y, a partir de este dato se encontró luego el flujo adjunto rápido en función de la posición.

Para las simulaciones en MCNP5, el modelo del reactor RA-1 utilizado fue diseñado por la Mg. Ing. Claudia Barberis y el Mg. Ing. Santiago Bazzana, del Departamento Estudios de Reactores y Centrales (DERyC).

## Capítulo 2

# Metodología Experimental

Para todas las experiencias se utilizó un dispositivo posicionador diseñado y construido por el DERyC. Los motivos que impulsaron su construcción fueron dos: por un lado, se busca medir determinados puntos a lo largo de la zona de estudio, por lo que es necesario un alto nivel de precisión en el movimiento, y esto se logra utilizando un motor paso a paso y, además, debido a la radiación en el recinto del reactor cuando este está operando no es recomendable permanecer allí un tiempo prolongado, por lo que se requiere poder operar de manera remota desde la sala de control.

Se trata de una pieza compuesta por dos partes: por un lado un tubo junto con una varilla roscada (ambos de acero inoxidable) la cual se acopla a un engranaje conectado a un motor paso a paso; y por otro lado un tubo de aluminio hueco (para el pasaje de muestras) y con un tapón en la base como cierre. Ambas partes se conectan a una misma pieza de grilón nylon. Tanto el motor como el sistema de engranajes reposan entre dos placas de acrílico a través de las cuales sube y baja el dispositivo. A cada lado de las caras exteriores de estas placas hay un tope que se acciona cuando el dispositivo completa el recorrido y envía la señal de frenarlo. En la parte superior del tubo de aluminio hay un gatillo que permite soltar la muestra de manera remota. Las placas se apoyan sobre la boca del tubo guía cuando es colocado en la posición de estudio para hacer las experiencias.

A lo largo de todas las experiencias se utilizaron en total 2 varillas de aluminio distintas, ya que para medir la reactividad introducida por la muestra de material físil fue necesario utilizar un tubo con un diámetro interno levemente mayor que el original. El segundo tubo resultó 6 mm más corto que el primer utilizado, por lo que la muestra de material físil se ubicó levemente desplazada respecto de la muestra de cadmio. Como no se modificó la varilla roscada, encargada del movi-

miento, no se vio afectada la calibración del equipo, la cual resultó ser de  $2.7 \frac{\mu m}{paso}$ .

El motor utilizado es marca *Nema* modelo *17*, un motor de cuatro pasos que posee más de un bobinado que permiten una rotación discreta, logrando un movimiento de alta precisión. A su vez, es conectado a un controlador *Microstep Driver* marca *Leadshine* modelo *DM322E* y a una fuente de alimentación de 24 V, marca *Power Switch* y tanto el motor como los topes se conectan a una placa marca *Arduino* modelo *MEGA 2560*. Este es un hardware/software que permite manipular a distancia el dispositivo intercambiando datos de entrada y de salida. Por lo tanto, junto con el dispositivo se programó un script que permite subir/bajar el dispositivo por pasos, contar los pasos realizados y avisar la llegada a tope/fondo del recorrido, detener el motor a partir de recibida la señal de llegada a tope/fondo y accionar el gatillo.

En la Figura 2.1 se presenta un esquema simplificado con los componentes principales del dispositivo, sus dimensiones y sus distintos materiales. La varilla roscada es la encargada del movimiento, por lo que la longitud marcada en el esquema es la que se corresponde con la longitud total recorrida por el dispositivo.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

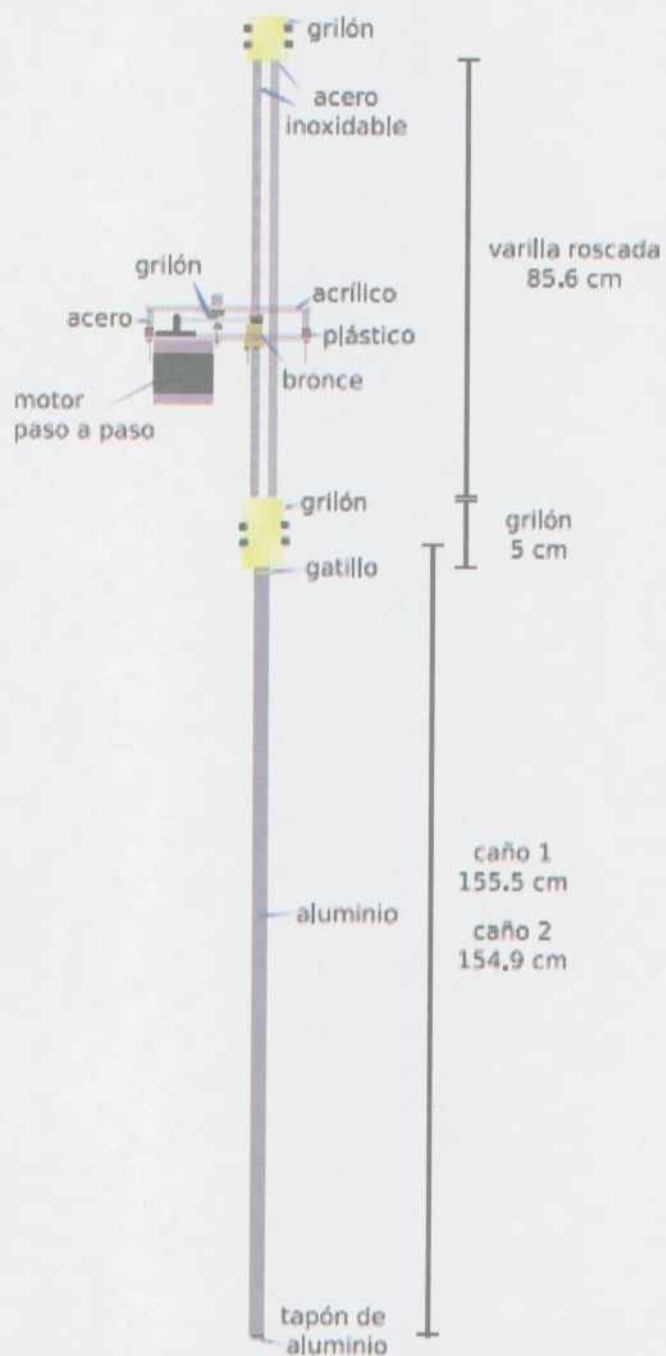


Figura 2.1: Esquema simplificado del dispositivo posicionador.

La potencia definida para llevar a cabo todos los experimentos fue de 500 W. Como se desea medir el cambio en reactividad por parte de la inserción de muestras, se busca que este tenga su contribución total por parte de las mismas, algo que no estaría asegurado al trabajar a altas potencias ya que podrían aparecer efectos de retroalimentación. Sin embargo, operar a baja potencia implica un compromiso con la relación señal-ruido que afecta a los errores de las señales en los detectores. En cuanto a la operación en el reactor esto implica trabajar con una señal ruidosa con todas las complicaciones que eso conlleva para el operador. Por ejemplo, para la estimación de reactividad se tuvieron que procesar los datos con el fin de obtener una señal corregida que presente menor fluctuaciones.

En la Figura 2.2 se esquematizan las condiciones en las que se llevarán a cabo las distintas experiencias. Se puede ver, por un lado, la ubicación del tubo guía junto con el dispositivo en la posición de interés, y, por el otro, las dos CIC utilizadas para la estimación del cambio en reactividad (la de marcha 5 en fosa de detectores: CIM5 y la del DERyC en la posición del reflector externo: CI1). Luego, para las distintas mediciones de interés, estarán también presentes los alambres, el detector SPND o las muestras.

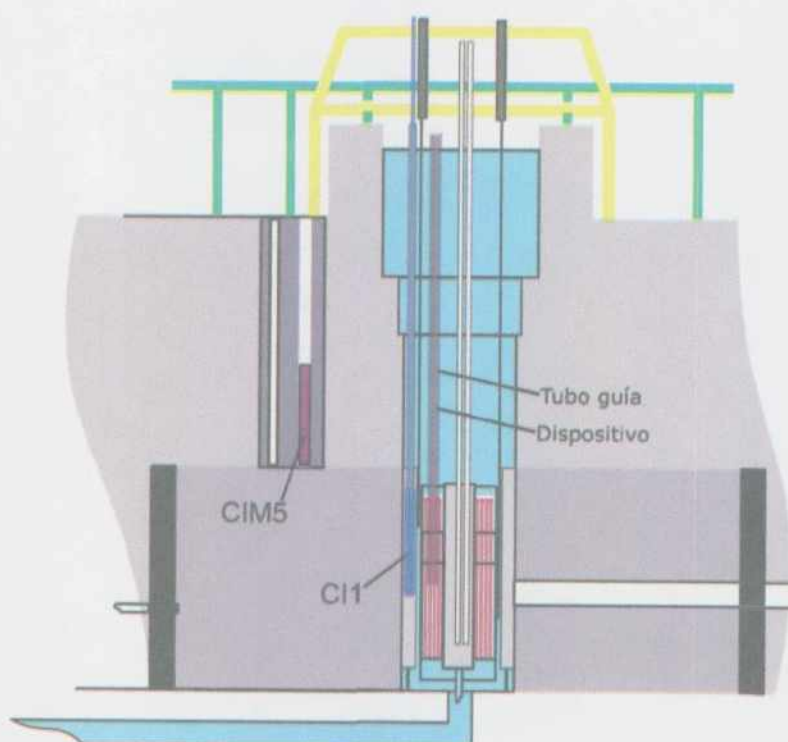


Figura 2.2: Corte longitudinal del RA-1.

## 2.1. Calibración del detector SPND

El detector utilizado en este trabajo es el SPND PB-0, fabricado por la Subgerencia de Instrumentación y Control (SIyC) del Centro Atómico Ezeiza (CAE). Cuenta con  $^{103}\text{Rh}$  como material emisor, PEEK como aislante y acero inoxidable como material recolector. Este emisor decae por  $\beta^-$  por dos vías con semiperíodos de desintegración de 43 s (92.4%) y de 4.4 min (7.8%) [7] y posee respuesta tanto a neutrones térmicos como epitérmicos. Además, como fue originalmente desarrollado para la medición de flujo directo en puntos específicos del cuerpo de pacientes con cáncer de piel sometidos a terapia BNCT, posee una longitud activa pequeña de 10 mm.

Para la calibración de este detector es necesario elegir las energías de corte que definirán los rangos térmico y epitérmico. El emisor posee un comportamiento  $1/v$  hasta una energía de alrededor de los 0.4 eV (ver Figura 2.3), y en trabajos previos se calibró este detector con esta energía de corte [7]. Por otra parte, para obtener el flujo adjunto con la metodología propuesta se desprecian las absorciones epitérmicas del cadmio (menor al 1.5% - Figura 3.6) y, trabajando con valores de simulación de flujo se encontró que el ritmo de absorción en el rango de 0.4 eV a 0.5 eV no variaba significativamente para este material, por lo tanto se resolvió elegir como corte de energía térmica el valor de 0.4 eV para tener un punto de comparación con las calibraciones anteriores [7].

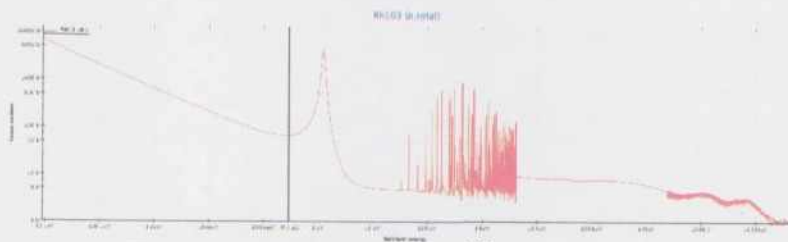


Figura 2.3: Sección eficaz del  $^{103}\text{Rh}$  para (n,total).

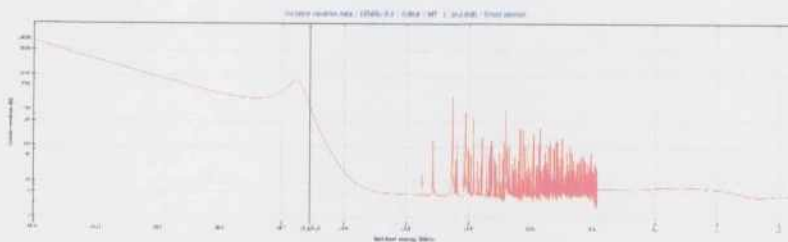


Figura 2.4: Sección eficaz del cadmio natural para (n,total).

Si bien el enfoque que se busca es a dos grupos de energía, para la parte de activación sólo será importante la zona epitérmica del espectro ya que ni el rodio ni los alambres de cobre y oro a utilizar experimentan reacciones de umbral como para poder cuantificar de alguna manera el aporte rápido. Analizando el comportamiento en el rango epitérmico, el rodio tiene buena respuesta hasta los 10 keV mientras que el oro y el cobre presentan activaciones significativas hasta los 100 keV.

Además, las muestras que se utilizarán como perturbaciones tampoco tienen respuesta predominante para energías mayores a 100 keV, con incidencia menor al 3% para energías mayores en todas las reacciones de interés. Por lo expuesto, se decidió utilizar la energía de 100 keV como límite del grupo rápido, por lo tanto se trabajará considerando para el grupo rápido el rango [0.4 eV - 100 keV] y para el grupo térmico el de [0 - 0.4 eV].

La calibración se realizó con alambres de cobre-oro (1.5% de peso en oro) y se resolvió medir 4 puntos a lo largo de una longitud de 48 cm desde fondo del tubo, tomando el punto más bajo como la referencia  $z = 0$  cm (que en la Figura 2.5 se denomina *posición D*). Estos alambres se ubicaron equidistantes entre sí a 16 cm, del lado externo de la varilla de aluminio y fijados con cinta de papel. El SPND también se fijó utilizando cinta de papel. Se realizaron en total cuatro irradiaciones y, en cada una, la posición del SPND era distinta (una irradiación por cada posición de alambre). En todas las experiencias se colocaron todos los alambres en los puntos de mapeo de manera tal de mejorar la estadística de los flujos medidos y como mecanismo de control de repetitividad de las condiciones de irradiación. Además, el método de activación es integral y no permite discernir los valores en función del tiempo, en cambio el SPND sí brinda esta información, con lo cual se puede conocer el historial de potencia en el punto medido y da la posibilidad de elegir con cuidado los datos a procesar porque permite identificar zonas con anomalías (saltos instantáneos de señal, subidas/bajadas de potencia). Los alambres se distribuyeron de manera tal que dos quedaron dentro de la longitud activa de los EECC, uno cercano al borde de los mismos y otro por fuera del núcleo. Las posiciones utilizadas quedaron equiespaciadas 16 cm entre sí cubriendo la longitud total de 48 cm. La elección de los puntos se realizó de manera tal de poder recolectar la señal en zonas con relaciones espectrales entre los flujos epitérmico y térmico muy variadas entre sí, y poder minimizar los errores de los factores de calibración.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Figura 2.5 se presenta un esquema de la disposición de los detectores para la primera irradiación. Además, se identifican con las letras A, B, C y D las distintas posiciones en donde se ubican los alambres.

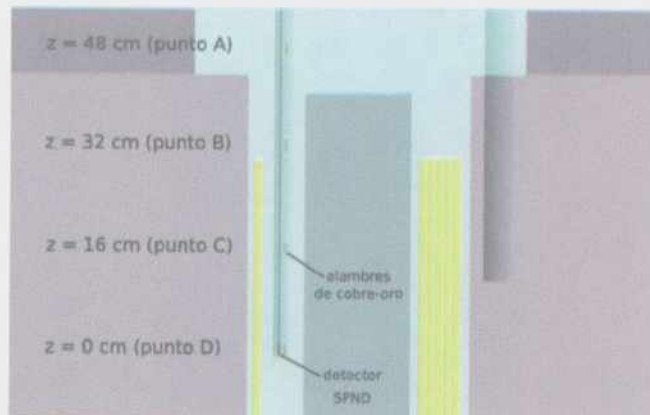


Figura 2.5: Esquemización de la primera experiencia para calibración del SPND, ubicado en la altura más baja.

En la Figura 2.6 se presenta el arreglo real de detectores para esta experiencia.



Figura 2.6: Arreglo de alambres junto con detector SPND para la primera irradiación.

Se observa que el detector SPND se encuentra alineado con los alambres de modo tal de considerar en la medición la perturbación del flujo por parte del alambre. Las condiciones de trabajo del reactor se respetaron en todas las experiencias llevadas a cabo en esta etapa: una potencia de 500 W y bombas encendidas, con el reactor en estado crítico con la barra de control N°3 (BC3) en posición 52%, irradiando a potencia constante durante alrededor de una hora. Para esta parte se utilizó el dispositivo posicionador fijo, el detector SPND PB-0 junto con un cable extensor de bajo ruido marca *Belden* modelo 9239 (longitud del cable de 14 m) para poder conectarlo al electrómetro marca *Keithley* modelo 6514 ubicado en la sala de control, el cual posee un rango de medición desde  $\pm 100$   $\mu$ A hasta  $\pm 21$  mA. También se utilizaron las señales de la CIC marca *Solydes-CNEA* modelo 41 del canal de marcha 5 (CM5) y la CIC marca *Centronic* modelo RC8/CPBE H150

Nº 9404-85 del canal de marcha 4 (CM4), ubicadas en fosa de detectores. En cuanto a los alambres, se utilizaron diez alambres de cobre-oro (con 1.5 % de peso en oro) de longitud promedio medida de  $(1.018 \pm 0.001)$  cm, comparable con la del SPND. Algunos de estos fueron irradiados hasta dos veces, asegurando previamente de que la actividad remanente de la irradiación anterior sea despreciable. Los ritmos de activación de los mismos se midieron con un detector de HPGe marca *Canberra* modelo *GC3020* con un voltaje de 3000 HV y ganancia gruesa x40, y se procesaron con un software de espectrometría gamma *GENIE 2000* [15] propio de la marca *Canberra*.

### **2.2. Medición del flujo directo sin perturbar y de las perturbaciones introducidas por las diferentes muestras**

Una vez obtenidos los valores de sensibilidad del detector para los flujos de interés se midió el flujo a lo largo de los 48 cm haciendo un barrido fino en las posiciones. En esta oportunidad los puntos no fueron equidistantes, ya que a lo largo de los primeros 27 cm se encuentra la zona de longitud activa de los EECC, con lo cual es la parte de mayor interés para realizar la medición. Al igual que en la diagramación de las experiencias de irradiación, el SPND se ubicó en la parte exterior del caño del dispositivo en la posición más baja y luego se fue desplazando con el movimiento del dispositivo. Se respetaron también las mismas condiciones del reactor que en las demás experiencias: potencia constante de 500 W, con bombas y en estado crítico con BC3 en posición 52 %. El criterio para la recolección de datos en los distintos escalones fue de un tiempo de medición superior al tiempo de saturación del SPND ya que, como se recuerda, es la señal saturada la que se puede relacionar con el valor de flujo que se desea determinar. En esta etapa se utilizaron las estimaciones del cambio en reactividad para controlar la potencia del reactor y lograr una señal estable a lo largo de toda la experiencia.

En cuanto a los equipos utilizados se mantuvieron el detector SPND PB-0, el cable extensor, el electrómetro, el software del electrómetro, el dispositivo y la CIC de CM5. Además, se utilizaron la placa marca *Arduino* modelo *MEGA 2560*, la tarjeta de adquisición marca *National Instruments* modelo *USB 6353* y el software *Multireactímetro Digital* para el procesamiento de la señal proveniente de la CIC.

Al finalizar la medición del flujo sin perturbar, se procedió a ubicar el dispositivo nuevamente en la posición más baja del tubo y soltar la muestra para medir el cambio en reactividad correspondiente. Las muestras utilizadas fueron:

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

---

- material absorbente: cadmio natural puro con masa de  $(927.0 \pm 0.1)$  mg y forma de paralelepípedo.
- material físil: muestra cilíndrica de uranio levemente enriquecido (ULE) al 19.7% en una masa total de  $(4.61 \pm 0.01)$  g, ubicada en un contenedor de polietileno provista por la planta de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (ECRI).

Se realizaron mediciones del cambio de reactividad ocurridos por inserción de muestra absorbente, de muestra físil y, para cuantificar el aporte del dispositivo y del dispositivo junto con el contenedor de polietileno.

Para esta parte se procesaron los datos de la CIC de CM5. Como se indicó en la Figura 1.2, esta CIC se encuentra en la fosa de detectores. Es decir, alejada y fuera de la zona tanto de núcleo como reflectores, por lo que la señal que llega allí es muy ruidosa en comparación a ubicar una CIC en alguna de las posiciones del núcleo o reflectores. Además, el tiempo de muestreo es de 0.01 s, lo cual también afecta al ruido de la misma. Como resultado, los valores de reactividad obtenidos de forma instantánea poseen mucho ruido. Para mejorar esta señal se realizaron los siguientes pasos:

- se vuelve a calcular el voltaje tomando los datos originales y promediándolos cada 100 datos. De esta manera, el tiempo de muestreo aumenta a 1 s.
- con este nuevo valor de voltaje se resuelven las ecuaciones de la cinética inversa nuevamente.
- se obtiene como resultado la reactividad estimada a partir de la señal filtrada.

A continuación se brindan más detalles de las distintas experiencias.

### **Experiencia con cadmio**

Se llevó el reactor a potencia de 500 W con bombas. Con el dispositivo posicionador ubicado en la posición más alta del tubo guía se midieron 9 posiciones. Se recolectaron los datos correspondientes al flujo directo sin perturbar con el SPND, con un tiempo de medición promedio de 20 minutos por punto. Una vez ubicado el dispositivo en su posición más baja, se estabilizó el reactor nuevamente a 500 W y se dejó caer la muestra de cadmio. A partir de allí, dejando al reactor evolucionar sin modificar la posición de barras, se realizaron mediciones utilizando la CIC del CM5, pasando por los mismos 9 puntos antes medidos y recolectando datos por alrededor de 1 minuto por posición.

### **Experiencia con uranio**

Nuevamente se llevó al reactor a una potencia de 500 W. Por problemas con las bombas se decidió apagarlas y esta experiencia se hizo sin las mismas. Se midió el flujo directo sin perturbar con el SPND en 6 puntos, todos ubicados dentro de zona de la longitud activa del EECC (alrededor de 27 cm). Una vez finalizada esta etapa, se volvió a ubicar el dispositivo en la posición más baja del tubo, se estabilizó el reactor en la corriente de referencia y se dejó caer la muestra de ULE. Dejando al reactor evolucionar sin modificar la posición de barras se midió la señal de la CIC del CM5 en los mismos 6 puntos eligiendo nuevamente un tiempo de medición de alrededor de 1 minuto por posición.

### **Experiencia con dispositivo posicionador**

Finalmente se llevaron a cabo una serie de mediciones de cambio en reactividad con el dispositivo posicionador sin muestras para conocer de qué manera se perturba el sistema por la presencia del mismo. Es importante cuantificar esta contribución de manera tal que al estudiar los cambios obtenidos por las muestras se reste la proporción correspondiente al caño de aluminio y se obtengan valores de reactividad representativos de las muestras estudiadas. Se trabajó nuevamente a una potencia de 500 W y se realizó un barrido fino, pasando por los mismos puntos en los que se realizaron las mediciones con las muestras en las otras experiencias. Estos datos se midieron con la CIC del grupo de DERyC ubicada en la posición del reflector externo que posee menos ruido, ya que se espera que el efecto en reactividad sea menor al obtenido con las muestras. La inserción del contenedor de polietileno no arrojó resultados relevantes en el cambio en reactividad en comparación con el registrado por el dispositivo sólo, con lo cual esas mediciones no se tuvieron en cuenta.

## Capítulo 3

### Resultados y discusiones

#### 3.1. Calibración de la respuesta del SPND en función del flujo

##### 3.1.1. Corriente del SPND

Al graficar la corriente en función del tiempo para cada experiencia se seleccionó la porción de datos más conveniente teniendo en cuenta la saturación del detector. Como ejemplo de esto, en la Figura 3.1 se presenta el gráfico obtenido en la cuarta irradiación, señalando en rojo la porción de datos utilizada para obtener el valor de corriente media del detector.

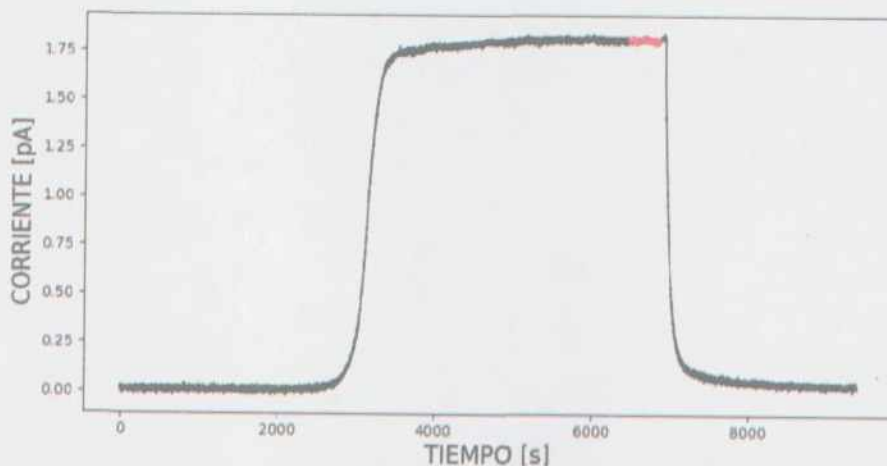


Figura 3.1: Señal del detector SPND en la cuarta irradiación.

El software muestrea cada 1 s y, teniendo en cuenta que el detector tarda en saturar alrededor de 12 minutos, se eligió una fracción de datos en una zona donde se asegura la saturación del mismo. Los errores se informan como la desviación estándar de los datos con los que se realizó el promedio de la señal. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 3.1.

N° irradiación	Altura [cm]	$i_{SPND}$ [pA]
1	$z = 0$	$24.092 \pm 0.008$
2	$z = 16$	$16.72 \pm 0.08$
3	$z = 32$	$9.57 \pm 0.03$
4	$z = 48$	$1.815 \pm 0.010$

Tabla 3.1: Corriente media del detector.

Se observa que el rango de respuesta en corriente obtenido a lo largo de los 48 cm analizados es de 23 pA.

### 3.1.2. Estimación del flujo con el método de los dos materiales

Retomando la Ecuación 1.23 presentada en la sección de **Introducción**, al llevarse a cabo las mediciones de los distintos alambres y utilizando el software GENIE 2000 se recolectaron los datos de: área neta de cuentas bajo la curva junto con su error relativo porcentual, tiempo vivo de medición, tiempo real de medición y porcentaje de tiempo muerto. El criterio utilizado para determinar el tiempo de medición de los alambres fue que se alcanzara un error relativo porcentual por debajo del 1 % en el cálculo del área neta. La medición de los alambres se llevó a cabo respetando las mismas condiciones en las que se calibró el instrumento. Para la obtención del tiempo de irradiación efectivo se procesaron las señales de corriente provista por las CIC, integrándose la corriente en función del tiempo en la zona de trabajo. Se decidió asignarle un error de 1 s a todos los tiempos involucrados en las cuentas. Las masas tienen asignado un error de  $1 \cdot 10^{-5}$  g según la precisión de la balanza con la que se pesaron. Para la concentración en masa se tuvo en cuenta un error del 0.0005, lo que equivale a un error relativo del 3 % en el caso del oro y del 0.05 % para el cobre. La importancia de asignarle un error a esta variable reside en que pueden presentarse discrepancias entre la composición real del alambre y la informada y esto impacta de forma diferente para cada material y por ende en la propagación de incertezas para cada ritmo [16]. Teniendo en cuenta que las fuentes utilizadas para llevar a cabo la calibración en eficiencia presentaban errores relativos porcentuales en sus actividades de entre 1.5 % y 2.5 % y que el error del ajuste de la curva de calibración resultó menor que las incertezas de las

actividades, se utilizó como criterio un error relativo porcentual del 2.5 % para informar las eficiencias halladas. En cuanto al resto de los parámetros involucrados en el cálculo, los mismos se obtuvieron de tablas y se despreciaron sus incertezas ya que resultan mucho menores que las ya informadas.

### Factor de autoapantallamiento de rayos gamma

Estos valores se calcularon por simulación con MCNP5, para lo cual se definió al alambre como un cilindro de 0.1 cm de diámetro y una longitud de 1.02 cm, respetando las dimensiones típicas de los alambres reales y su material ( $^{197}\text{Au}$ ,  $^{63}\text{Cu}$  y  $^{65}\text{Cu}$  en sus respectivas proporciones másicas). A continuación se definieron dos fuentes gamma por separado: una de 511 keV correspondiente al radioisótopo  $^{64}\text{Cu}$  y otra de 411.81 keV representando el  $^{198}\text{Au}$ . En cuanto a los *tallies*, se utilizó un acumulador de corriente a través de la superficie del alambre para cada una de las fuentes gamma, y se simularon dos situaciones: una en donde se definió el volumen del alambre con su material correspondiente y otra con el mismo volumen pero con vacío. Se contabilizaron sólo los rayos gamma que llegaron a la superficie con la misma energía con la que fueron generados ( $\pm 1$  keV) ya que estos son los que aportan cuentas al pico de energía plena para el cálculo de los ritmos de reacción. De esta manera, los rayos que pierden suficiente energía por sufrir interacciones durante su recorrido o que han sido absorbidos no son tenidos en cuenta. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.2.

Factor	Valor [adimensional]
$SS_{Au}$	(0.95422 $\pm$ 0.00019)
$SS_{Cu}$	(0.95890 $\pm$ 0.00019)

Tabla 3.2: Factores de autoapantallamiento gamma.

Esto significa que por absorción de los rayos en el material del alambre u otras interacciones que disminuyan la energía de los mismos el ritmo de activación medido con el detector será alrededor de un 5 % menor a su valor real. De esta manera, la corrección supone dividir el valor de las cuentas totales por este parámetro de manera tal de recuperar las cuentas netas que en verdad debería haber si no fuese por la interacción de los rayos con el material.

### Factor de depresión de flujo

Los factores de la Ecuación 1.22 también se obtuvieron con MCNP5, simulando los alambres con las dimensiones y materiales descritos anteriormente. Para este cálculo, rodeando el alambre se simuló una fuente superficial esférica que bombardea al alambre con neutrones con la distribución espectral propia de la

posición de irradiación del RA-1 utilizada para las experiencias. Se utilizó un contador de longitud de *tracks* para hallar el flujo escalar promedio en el volumen del alambre. Nuevamente se simularon dos escenarios: uno con el volumen del alambre y su material y otro con el volumen del alambre con vacío. En este caso se utilizaron dos cortes de energía para calcular los valores condensados en los rangos definidos como térmico y como epitérmico: 0.4 eV y 100 keV. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.3.

Factor	Valor [adimensional]
$F_{1-th}$	$(0.9830 \pm 0.0017)$
$F_{1-epi}$	$(0.997 \pm 0.002)$

Tabla 3.3: Factores de depresión de flujo.

Esto indica que en el rango térmico el flujo neutrónico promedio en el alambre disminuye en un 2% aproximadamente, mientras que para el rango epitérmico el flujo disminuye en un 0.3%. Es decir, el flujo percibido por el alambre se encuentra levemente deprimido, y esta depresión es algo más acentuada en el rango térmico.

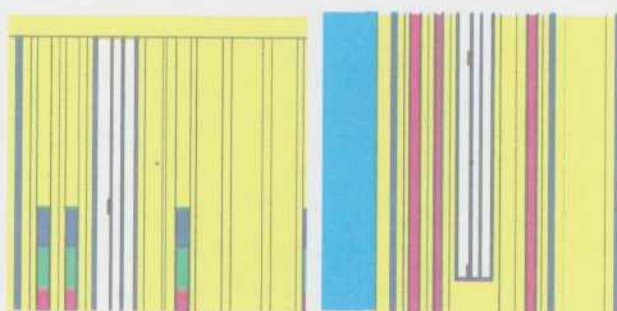
### Secciones eficaces microscópicas efectivas

Para estos cálculos nuevamente se realizaron simulaciones con MCNP5. En esta caso se posicionaron los alambres en los lugares en donde se llevaron a cabo las irradiaciones y se definieron las dimensiones y masas correspondientes. Para poder hallar estos valores condensados se utilizaron dos acumuladores: uno que obtiene el ritmo para la reacción de interés mediante la integración de la sección eficaz microscópica (tomada de la biblioteca de tablas del programa) por el flujo perturbado en esa posición en el rango de energía deseado; y un acumulador para hallar el flujo perturbado integrado en ese mismo rango. En la Tabla 3.4 se muestran los valores obtenidos.

Isótopo	$\hat{\sigma}_{th}$ [b]	$\hat{\sigma}_{epi}$ [b]
$^{197}Au$	$(81.9 \pm 1.9)$	$(84 \pm 2)$
$^{63}Cu$	$(3.68 \pm 0.09)$	$(0.291 \pm 0.004)$

Tabla 3.4: Secciones eficaces microscópicas.

En las Figura 3.2a y Figura 3.2b se muestran dos cortes de las simulaciones realizadas.



(a) Alambre en punto B. (b) Alambres en puntos C y D.

Figura 3.2: Alambres en los cuatro puntos de mapeo. Los colores indican los distintos materiales. Rojo: mezcla de cobre-oro, amarillo: agua liviana, azul: aluminio, blanco: vacío, verde: grafito, rosa: longitud activa del EECC.

### 3.1.3. Resultados de los flujos térmico y epitérmico

En la Tabla 3.5 y en las Figura 3.3 y Figura 3.4 se presentan los flujos térmicos y epitérmicos obtenidos con el método de los dos materiales. Los datos tabulados y los valores medidos de todas las variables necesarias para la obtención de los ritmos de reacción se presentan en el Anexo B.

Altura [cm]	Nº irradiación	$\phi_{th} \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$	$\phi_{epi} \left[ \frac{n}{cm^2 \cdot s} \right]$
0	1	<b><math>(1.07 \pm 0.04) 10^{10}</math></b>	<b><math>(9.1 \pm 1.0) 10^9</math></b>
	2	$(1.03 \pm 0.04) 10^{10}$	$(8.9 \pm 1.0) 10^9$
	3	$(1.02 \pm 0.04) 10^{10}$	$(8.9 \pm 1.0) 10^9$
	4	$(1.05 \pm 0.04) 10^{10}$	$(9.1 \pm 1.0) 10^9$
16	1	$(7.8 \pm 0.3) 10^9$	$(7.2 \pm 0.8) 10^9$
	2	<b><math>(6.9 \pm 0.3) 10^9</math></b>	<b><math>(6.6 \pm 0.7) 10^9</math></b>
	3	no medido	no medido
	4	$(7.3 \pm 0.3) 10^9$	$(6.8 \pm 0.7) 10^9$
32	1	$(5.4 \pm 0.2) 10^9$	$(1.9 \pm 0.4) 10^9$
	2	$(4.96 \pm 0.19) 10^9$	$(1.6 \pm 0.4) 10^9$
	3	<b><math>(5.2 \pm 0.2) 10^9</math></b>	<b><math>(1.5 \pm 0.4) 10^9</math></b>
	4	$(5.0 \pm 0.2) 10^9$	$(1.8 \pm 0.4) 10^9$
48	1	$(1.07 \pm 0.04) 10^9$	$(1.4 \pm 0.7) 10^8$
	2	$(8.6 \pm 0.3) 10^8$	$(1.1 \pm 0.6) 10^8$
	3	no medido	no medido
	4	<b><math>(9.7 \pm 0.4) 10^8</math></b>	<b><math>(1.5 \pm 0.6) 10^8</math></b>

Tabla 3.5: Valores de flujos obtenidos por el método de activación. En negrita se señala el número de la experiencia de irradiación para cada altura en la cual el SPND se encontraba en esa misma posición.

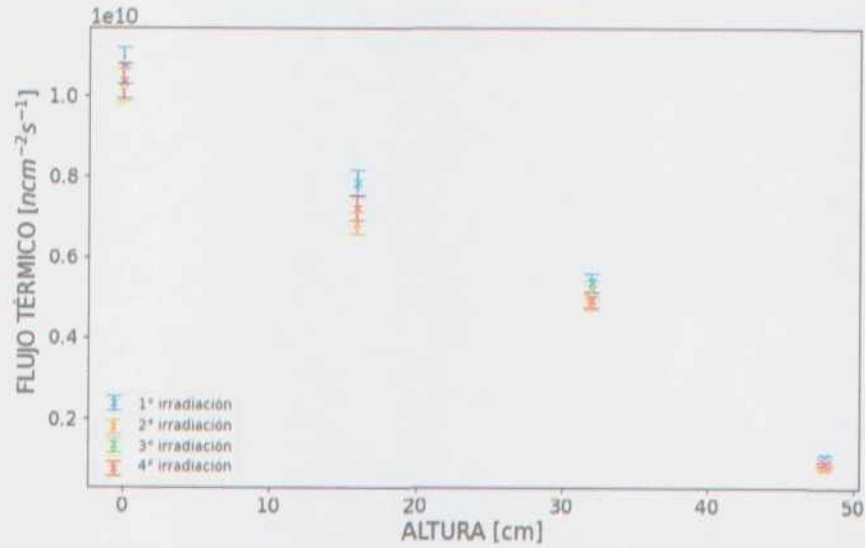


Figura 3.3: Flujos térmicos obtenidos para las cuatro irradiaciones.

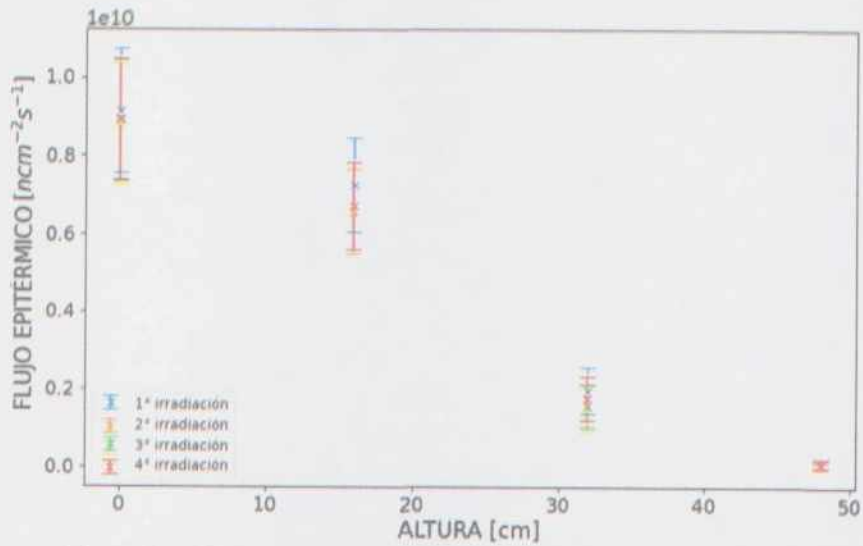


Figura 3.4: Flujos epitérmicos obtenidos para las cuatro irradiaciones.

Como primera observación, las Figura 3.3 y Figura 3.4 muestran en general un buen acuerdo entre los valores, y los órdenes de magnitud se encuentran dentro de lo esperado según mediciones hechas previamente en el núcleo. [17]. Como segunda observación, analizando los errores puede verse que para el flujo térmico el

error relativo se mantiene en un valor relativamente constante en las distintas posiciones, y es de alrededor del 4 %, mientras que para el caso epitérmico se obtienen errores que van desde el 11 % en la posición más baja hasta el 55 % en el punto más alejado del núcleo. Esta diferencia en las incertezas de los flujos se ve fuertemente influenciada por la incerteza en la concentración de oro en las muestras, que impacta en mayor medida en el ritmo de activación del oro, y que termina impactando sensiblemente en el flujo epitérmico. A pesar de estas incertezas, los ritmos calculados para la obtención de las secciones eficaces y los medidos presentaron buena concordancia, con diferencias menores al 10 % (Tabla B.6 del **Anexo B**). Finalmente se observa que dentro de la longitud activa de los EECC se presenta una relación entre flujos epitérmicos y térmicos de entre 85 % (para el punto C) y 95 % (para el punto D).

En el primer punto ubicado por fuera del núcleo (punto B en altura  $z = 32$  cm) se puede ver un decaimiento importante en la relación de flujos (alrededor del 32 %). Esto puede explicarse teniendo en cuenta que ese punto está en zona de reflector (zona de agua liviana) por lo que se tiene únicamente el efecto de la moderación de neutrones, con lo cual es esperable que el flujo térmico, si bien decrecerá por alejarse del núcleo, lo haga de manera más lenta en contraposición con el flujo epitérmico. Para la posición más alejada (punto A en altura  $z = 48$  cm) la relación resulta de un 13 %.

### 3.1.4. Sensibilidad

Para el ajuste de la sensibilidad en función de los flujos (Ecuación 1.16), se planteó el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} i_{spnd-1^\circ} \\ i_{spnd-2^\circ} \\ i_{spnd-3^\circ} \\ i_{spnd-4^\circ} \end{bmatrix} = S_{th} \begin{bmatrix} \phi_{th-1^\circ} \\ \phi_{th-2^\circ} \\ \phi_{th-3^\circ} \\ \phi_{th-4^\circ} \end{bmatrix} + S_{epi} \begin{bmatrix} \phi_{epi-1^\circ} \\ \phi_{epi-2^\circ} \\ \phi_{epi-3^\circ} \\ \phi_{epi-4^\circ} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

La Ecuación 3.1 se resolvió por cuadrados mínimos, obteniéndose los parámetros de la Tabla 3.6.

Parámetro	Valor	$\frac{Acm^2s}{n}$
$S_{th}$	$(1.5 \pm 0.2) 10^{-21}$	
$S_{epi}$	$(9 \pm 2) 10^{-22}$	

Tabla 3.6: Sensibilidades halladas para el SPND PB-0 en la posición interna del núcleo del RA-1 denominada N2.

La sensibilidad para neutrones térmicos utilizando rodio como material emisor es del orden de  $10^{-21} \frac{Acm^2s}{n}$ , lo cual se condice con otros trabajos [7], mientras que para neutrones epitérmicos resultó ser un 60 % menor en comparación. Por otra parte, el error en el primer caso es del 13 % mientras que para epitérmicos es del 22 %. Esto puede relacionarse con la disminución en la respuesta del rodio a altas energías del neutrón ya que, si bien hasta los 10 keV presenta una respuesta significativa, esta respuesta decrece por encima de este valor, por lo que al tomar un rango energético de hasta 100 keV y trabajar con ritmos de activación de materiales que poseen una respuesta diferente, el ajuste puede resultar no significativo.

### 3.2. Flujo directo sin perturbar

Siendo que las relaciones entre flujos halladas mediante ritmos de activación mostraron una relación casi constante entre los flujos en zona de longitud activa de los EECC (variación entre el 85 % y 95 %), se trabajará con esa relación para poder encontrar los valores de flujo  $\phi_{th}$  y  $\phi_{epi}$  a partir de un único dato de corriente del detector SPND  $i_{SPND}$ . Se propone entonces la siguiente relación:

$$\phi_{epi}(\bar{r}) = C\phi_{th}(\bar{r}) \quad (3.2)$$

en donde  $C = 0.9$  en zona de longitud activa de los EECC. De esta manera, la Ecuación 1.16 se puede reescribir:

$$i_{spnd}(\bar{r}) = S_{epi}C\phi_{th}(\bar{r}) + S_{th}\phi_{th}(\bar{r}) \quad (3.3)$$

y, despejando el flujo térmico, se obtiene:

$$\phi_{th}(\bar{r}) = \frac{i_{spnd}(\bar{r})}{S_{epi}C + S_{th}} \quad (3.4)$$

Una vez obtenido el flujo térmico, el flujo epitérmico podría estimarse a partir de la Ecuación 3.2. En la Figura 3.5 se presentan los dos perfiles de flujo obtenidos con esta metodología.

Para las posiciones ubicadas en la zona denominada REFLECTOR en la Figura 3.5, es decir por encima del núcleo, sólo se realizaron las mediciones correspondientes en las posiciones B y A (ver Figura 2.5) que es en donde se conoce la relación entre los flujos epitérmico y térmico gracias a las mediciones con alambres (valor  $C$  de la Ecuación 3.2, siendo alrededor de 0.32 en la posición B y de 0.13 en la posición A). Por último, en las posiciones intermedias entre estos dos puntos no se llevaron a cabo mediciones porque se desconoce cómo varía la relación de flujos allí.

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

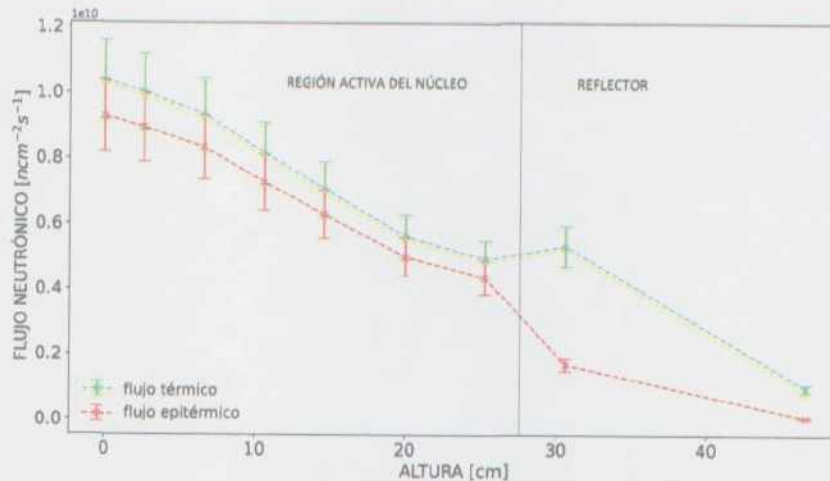


Figura 3.5: Flujo directo en zona de longitud activa de EECC.

A partir del gráfico puede observarse una evolución cosenoidal para ambos perfiles de flujo. En la altura más baja se estimó un valor de flujo térmico de  $(1.04 \pm 0.12)10^{10} \frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$  en una primera medición y un valor de  $(1.01 \pm 0.10)10^{10} \frac{n}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$  en una segunda medición, lo cual está dentro de los valores esperables según lo reportado en la Tabla 3.5. En cuanto al comportamiento de cada rango de energía, puede apreciarse que el flujo térmico presenta un aumento del valor en el reflector, indicando una tendencia a observar algún máximo local en dicha región. Este comportamiento también se obtuvo al calcular el flujo sin perturbar en las mismas posiciones por simulación, y esto se debe a que se está en un medio que posee una alta sección eficaz de *scattering* para poder moderar los neutrones. Debido a esta alta moderación, el flujo epitérmico decrece rápidamente mientras que el flujo térmico crece. Esto representa el pasaje de neutrones desde el grupo de mayor energía hacia el grupo de menor energía, apareciendo un pico en el perfil térmico y una marcada depresión en el perfil epitérmico. Este comportamiento es el esperado según la teoría de difusión a 2 grupos de energía. [4]

Por otro lado, las barras de error muestran una alta variabilidad en los resultados. Se debe tener en cuenta que entre las dependencias del cálculo del flujo térmico se tiene la sensibilidad epitérmica del detector, la cual posee un error alto e inevitablemente esto se ve reflejado en los errores de los flujos que ascienden hasta el 10% en algunas posiciones.

### 3.3. Medición de reactividad en transitorios

En las Figura 3.6 y Figura 3.7 se presentan las mediciones del cambio en reactividad obtenido a partir de la inserción de cadmio y uranio respectivamente, superponiendo la reactividad procesada a partir del voltaje filtrado a la reactividad original, la cual se obtiene de manera instantánea durante la experiencia. Por lo tanto en color negro se muestra la señal con tiempo de muestreo de 10 ms (reactividad original) mientras que en color rojo están representados los valores de reactividad estimados a partir de una señal de voltaje con tiempo de muestreo de 1 s (reactividad procesada).

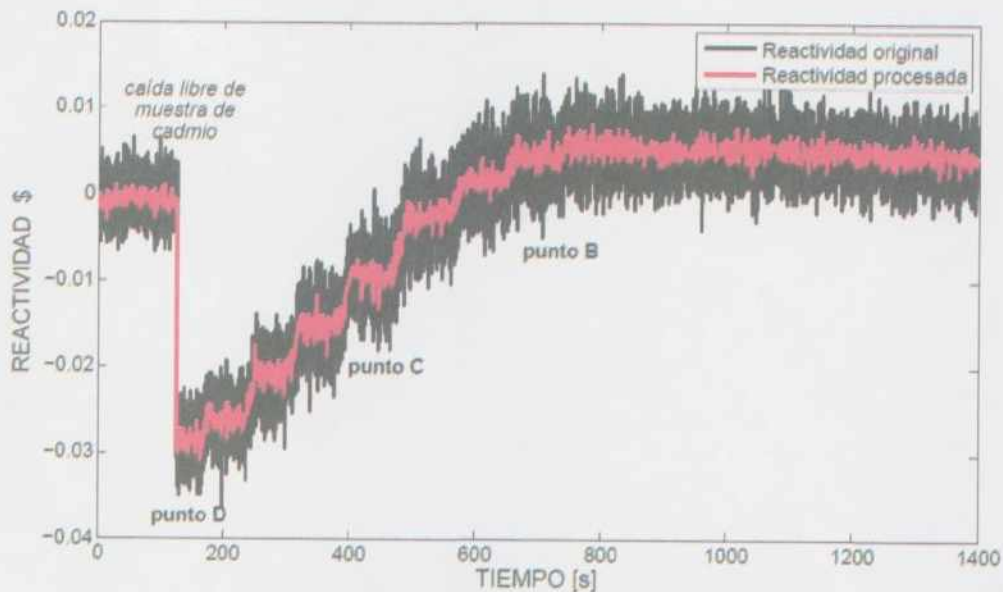


Figura 3.6: Cambio en reactividad por inserción de muestra de cadmio.

Se observa cómo la reactividad en el punto más bajo (D) se vuelve negativa al soltar el cadmio. Esto es un comportamiento esperable ya que este es un material fuertemente absorbente de neutrones térmicos y, al aparecer una depresión en el flujo térmico por su presencia, esto provoca una caída importante en la reactividad, llegando a un valor máximo negativo de  $\$ = (-0.0286 \pm 0.0012)$ . Por otro lado, se observa una marcada disminución en el desvío de la señal procesada en contraposición con la señal original en los distintos escalones de reactividad constante.

A medida que el dispositivo posicionador sube, alejándose del núcleo, se puede ver cómo la reactividad aumenta. Este es el comportamiento típico que se observa al retirar un material con una alta sección eficaz macroscópica de absorción.

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Además, se observa que, una vez ubicada a la muestra por fuera del núcleo (cercana a la posición B), queda una reactividad positiva remanente que se asocia a la ausencia del tubo de aluminio del dispositivo posicionador. Esta reactividad debe corregirse para obtener el efecto producido únicamente por la presencia de la muestra.

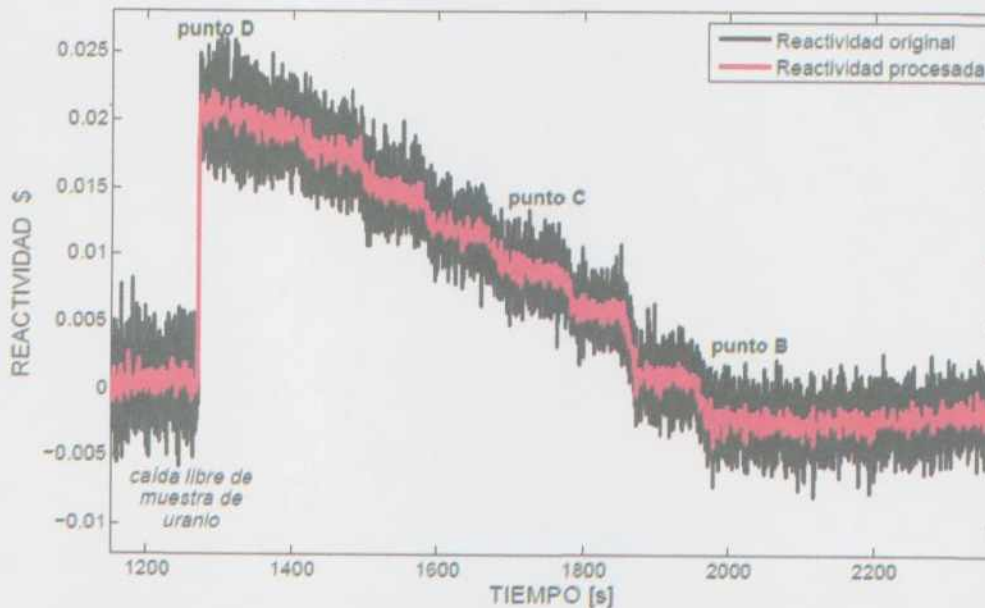


Figura 3.7: Cambio en reactividad por inserción de muestra de uranio.

En el caso del uranio la evolución del sistema es la opuesta. Al caer la muestra hasta la posición más baja (0.6 cm por encima de la posición del cadmio producto del cambio del tubo de aluminio mencionado anteriormente) se produce un aumento de la reactividad en un valor de  $\rho = (0.0188 \pm 0.0012)$ , lo cual se condice con el hecho de agregar un material fisible que emite neutrones rápidos al producirse fisiones con los neutrones térmicos del medio. A medida que sube la muestra se observa una caída en la reactividad, comportamiento esperado al retirar una muestra que aporta neutrones al medio. En contraposición con lo observado en la experiencia con cadmio, llegando a la zona de la posición B y más allá se puede apreciar una reactividad remanente negativa. Este fenómeno puede estar asociado a un cambio en la temperatura del combustible, ya que al haber aumentado la potencia a lo largo de la experiencia y encontrarse las bombas apagadas tal vez hayan existido efectos de retroalimentación negativa.

En ambos gráficos puede verse que a partir de la posición B hacia arriba el cambio en reactividad deja de ser apreciable. Por lo tanto, para el cálculo del flujo

adjunto sólo serán de interés las mediciones hasta este punto.

Para evaluar el cambio en reactividad producido por el movimiento del dispositivo posicionador se realizaron mediciones con el dispositivo sin muestra, en las mismas posiciones medidas para las experiencias de cadmio y uranio, las cuales se muestran en la Figura 3.8.

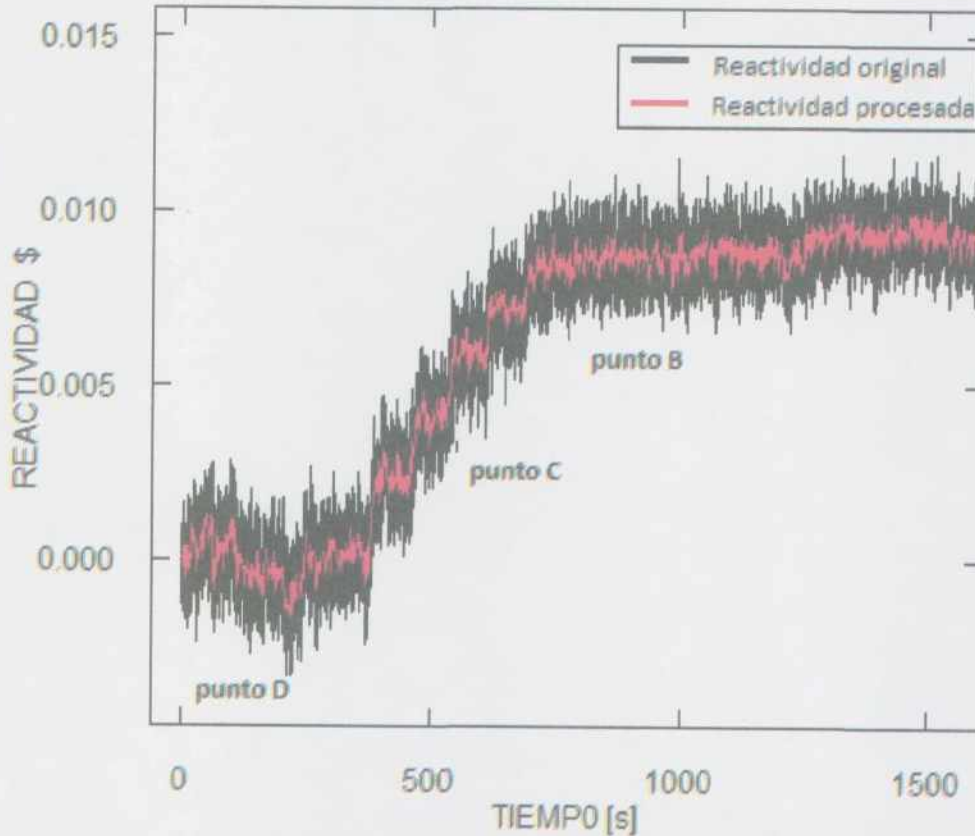


Figura 3.8: Cambio en reactividad por dispositivo posicionador.

Se puede ver la inserción de reactividad positiva a partir de la extracción del dispositivo desde la altura más baja (punto D) hasta llegar al punto B, obteniéndose una reactividad total agregada de alrededor de 1 centavo de dólar. Al igual que en las demás experiencias analizadas, a partir de este punto en adelante no se observan diferencias significativas en la reactividad medida.

Una vez obtenidas las mediciones de reactividad para cada punto tanto del cadmio como del uranio se realizó la resta punto a punto con los valores del dispositivo para cada caso y se obtuvieron finalmente los valores de cambio en reactividad únicamente por contribución de las muestras.

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

En las Tabla 3.7 y Tabla 3.8 se muestran los valores corregidos para cadmio y uranio respectivamente, que luego serán utilizados en la estimación de flujo adjunto.

Altura [cm]	$\rho_{Cd}$
0 (punto D)	$(-0.0286 \pm 0.0012)$
2.6	$(-0.02848 \pm 0.00018)$
6.6	$(-0.0251 \pm 0.0002)$
10.6	$(-0.0210 \pm 0.0002)$
16 (punto C)	$(-0.01636 \pm 0.00008)$
20.2	$(-0.01112 \pm 0.00007)$
25.3	$(-0.0067 \pm 0.0003)$
B	$(-0.0043 \pm 0.0002)$

Tabla 3.7: Cambios en reactividad para el cadmio.

Altura [cm]	$\rho_{ULE}$
0.6	$(0.0188 \pm 0.0012)$
4.6	$(0.01661 \pm 0.00018)$
8.6	$(0.0123 \pm 0.0002)$
12.6	$(0.0074 \pm 0.0002)$
16.6	$(0.00276 \pm 0.00017)$

Tabla 3.8: Cambios en reactividad para el uranio.

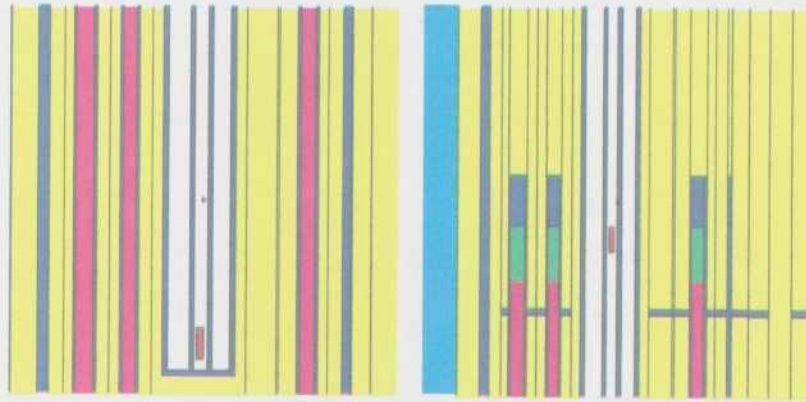
Resulta interesante destacar que los valores medidos en la posición más baja para ambos casos coinciden con resultados obtenidos por simulación.

### 3.4. Secciones eficaces macroscópicas

Para la obtención de estos datos se simularon las muestras utilizadas con MCNP5, respetando las dimensiones y masas reales, a dos alturas diferentes: en la posición D, base del tubo guía, y en la posición B, apenas por encima de la longitud activa de los EECC. Se decidió calcular el valor de las secciones eficaces en estos dos extremos para cuantificar la variabilidad de las mismas, pudiéndose obtener un valor promedio (utilizado como constante para todas las posiciones en las que se calculará el flujo adjunto) y una incerteza asociada a la semidiferencia entre ambos puntos. La elección de la posición superior se hizo en base a que el cambio en reactividad se puede distinguir hasta ese punto, por lo tanto hasta ahí será posible estimar la función importancia. Además, estas secciones eficaces se obtuvieron considerando el autoapantallamiento del flujo dentro de la muestra.

Matemáticamente, esto representa el producto de la densidad atómica del material, la sección eficaz microscópica obtenida con la Ecuación 1.21 y el factor de depresión de flujo de la Ecuación 1.22.

En las Figura 3.9a y Figura 3.9b se muestran dos esquemas de la simulación de la muestra de cadmio en MCNP5 (análogo a la simulación con uranio, con la diferencia de que también se simuló el material contenedor de la muestra para este último).



(a) Muestra de cadmio en posición D. (b) Muestra de cadmio en posición B.

Figura 3.9: Cortes longitudinales de simulación de muestra de cadmio ubicada por dentro de la varilla de aluminio del dispositivo posicionador.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.9.

Parámetro	Valor $\left[\frac{1}{cm}\right]$
$\Delta(v_2\Sigma_f2)$	$4.25\pm 0.52$
$\Delta\Sigma_{abs2}^{ULE}$	$2.08\pm 0.25$
$\Delta\Sigma_{abs2}^{Cd}$	$3.84\pm 0.29$

Tabla 3.9: Secciones eficaces macroscópicas.

### 3.5. Flujo adjunto

El perfil de flujo adjunto térmico se estima utilizando la Ecuación 1.12 con la sección eficaz macroscópica del cadmio y el valor de flujo térmico directo obtenido para cada posición. Para la obtención del perfil de flujo adjunto rápido (Ecuación 1.13) se requiere este perfil de adjunto térmico. Dado que los puntos donde se midieron los flujos directos y los cambios en reactividad se encontraban desfasados, fue necesario interpolar la solución de este parámetro. Esto se logró

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

utilizando un polinomio cúbico. En el gráfico se decidió presentar los valores de flujo adjunto normalizados al valor máximo.

En la Figura 3.10 se presentan los perfiles de flujo adjunto obtenidos para ambos grupos.

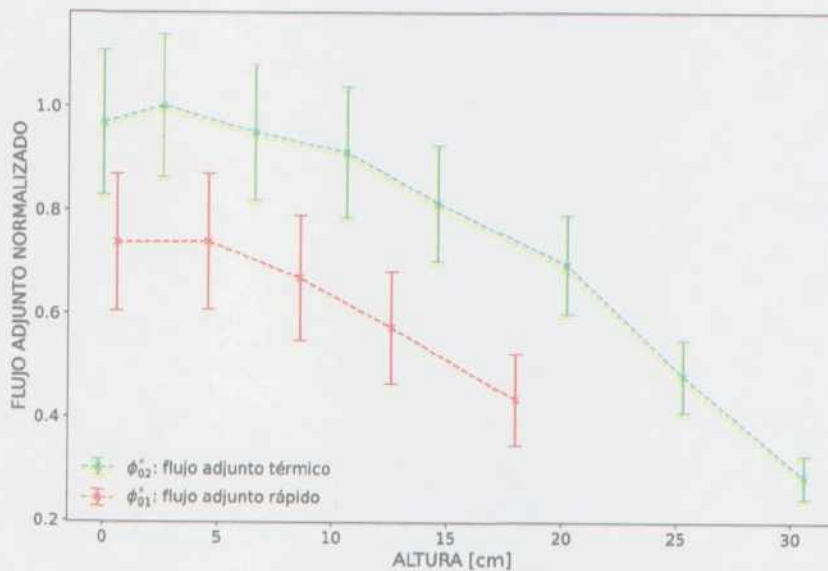


Figura 3.10: Perfiles de flujo adjunto térmico y rápido estimados.

Se puede observar que los valores de flujo adjunto para ambos grupos presentan la misma tendencia: los valores máximos se encuentran en zona de longitud activa de los EECC en el núcleo y luego decrecen de forma monótona a medida se alejan de allí. Además, el flujo adjunto rápido resulta menor que el flujo adjunto térmico en todo el perfil estudiado, lo cual es consistente con el comportamiento teórico esperado [4] y con otros trabajos en donde también se llevaron a cabo mediciones de flujo adjunto a dos grupos de energía [18]. Si bien los valores están desfasados por el cambio de la varilla de aluminio, se puede ver que para el primer punto se tienen valores de  $\phi_{02}^* = (0.97 \pm 0.14)$  y  $\phi_{01}^* = (0.74 \pm 0.13)$ .

Por otro lado, los puntos medidos en el caso de la muestra de ULE fueron menos y se encuentran todos en zona de longitud activa de los EECC.

En cuanto a los errores obtenidos, para el flujo adjunto térmico estos rondan en 14% mientras que para el rápido ascienden hasta el 20%. La mayor contribución a estos resulta la incerteza en la medición de flujo térmico directo, con errores del

### CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

---

10 % aproximadamente, y la asociada a las secciones eficaces. Para este último caso, los errores para los términos del ULE de absorciones y de fisiones rondan entre el 10 % y el 12 %, mientras que para el caso del cadmio el error es de alrededor del 7 %. Por último, el error del flujo adjunto térmico tiene impacto en el flujo adjunto rápido debido a su dependencia con el mismo. Por todo lo expuesto, es esperable encontrar errores porcentuales relativos de esta magnitud y se deberá trabajar a futuro para minimizarlos.

## Capítulo 4

### Conclusiones

En el presente trabajo se estimaron los perfiles de flujo adjunto a dos grupos de energía en una posición interna al núcleo del reactor RA-1, partiendo de teoría de perturbaciones a dos grupos de energía y planteando perturbaciones con material físil y absorbente. Para ello se midió el flujo directo en la zona de interés y el cambio en reactividad producido por la inserción de las muestras mencionadas, para lo cual fue necesario diseñar y programar un dispositivo posicionador.

En cuanto a la medición del flujo directo, esta se realizó utilizando un detector SPND, cuya respuesta se caracterizó contra mediciones de activación de cobre y oro por el método de los dos materiales. Los valores de flujo directo obtenidos mediante este método se encuentran dentro de los valores esperados, con incertezas del orden del 4 % para el flujo térmico y de entre el 11 % y el 55 % para el flujo epitérmico. Estos errores se vieron fuertemente influenciados por la incerteza en la composición de oro y cobre de los alambres utilizados. Además, estos errores afectaron la incerteza en la respuesta del SPND, cuyos valores resultaron ser de 13 % y 22 % para las respuestas térmica y epitérmica respectivamente.

El efecto en reactividad introducida por las muestras se obtuvo a partir de la señal de detectores de marcha del reactor y resolviendo las ecuaciones de cinética inversa con estos datos. Las mediciones fueron complementadas con parámetros obtenidos por simulación utilizando MCNP5.

Los perfiles de flujo adjunto obtenidos son consistentes con los valores esperados teóricamente y con resultados reportados en bibliografía, con valores de flujo adjunto térmico mayores que los de flujo adjunto rápido para posiciones en zona de longitud activa de los EECC. La incerteza en el flujo adjunto térmico resultó de aproximadamente el 14 %, viéndose fuertemente influenciada por la incerteza en el valor del flujo térmico directo y, en menor medida, por la incerteza de la sección

eficaz obtenida numéricamente. Para el flujo adjunto rápido, la incerteza se ubicó en torno al 18 %, siendo los flujos térmicos adjunto y directo los parámetros más influyentes.

Como trabajo a futuro se plantea validar los resultados, comparando los cambios en reactividad predichos por esta técnica contra valores experimentales que se obtendrían utilizando distintas muestras a las utilizadas en este trabajo como perturbaciones. Para que la validación hecha sea más representativa de la utilidad de la técnica, sería necesario disminuir las incertezas obtenidas. Esto podría lograrse mejorando la precisión de la medición del flujo térmico directo, ya sea caracterizando mejor la respuesta del SPND (con más puntos medidos para mejorar el ajuste, usando alambres con composición mejor conocidas y considerando la contribución gamma de la señal del detector) o contemplando el uso de algún otro tipo de detector. Por último, podría considerarse disminuir el error de las secciones eficaces calculadas utilizando valores ajustados por una función dependiente de la posición.

## Bibliografía

- [1] Ing. Barberis C.M. “Caracterización radiológica del reactor RA-1 para la elaboración del plan de clausura”. En: *Tesis de Maestría - UTN* (2008).
- [2] Bellino P. “Estimación de reactividad - Aplicación en el reactor RA-1”. En: *Laboratio II, IDB, UNSAM* (2007).
- [3] Karl O. Ott Robert J. Neuhold. *Introductory Nuclear Reactor Dynamics*. 1.<sup>a</sup> ed. American Nuclear Society, 1985.
- [4] John R. Lamarsh. *Introduction to Nuclear Theory*. 2.<sup>a</sup> ed. Addison-Wesley Publishing Company, 2004.
- [5] Miller M.E. et al. “Implantable self-powered detector for on-line determination of neutron flux in patients during NCT treatment”. En: *Applied Radiation and Isotopes* 61 (2004), págs. 1033-1037.
- [6] Glenn F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. 3.<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [7] Miller M.E. et al. “Rhodium self-powered neutron detector as a suitable on-line thermal neutron flux monitor in BNCT treatments”. En: *Medical Physics* 38 (2011), págs. 6502-6512.
- [8] Myong-Seop Kim et al. “Self-Powered Neutron Detector Calibration Using a Large Vertical Irradiation Hole of HANARO”. En: *The European Physical Journal Conferences* (2018).
- [9] X-5 Monte Carlo Team. “MCNP — A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5: Volume II: User’s Guide”. En: *LA-CP-03-0245* (2003).
- [10] Mg. Ing. Barberis C.M. y Mg. Ing. Bazzana S. “Cálculo de parámetros neutrónicos del reactor RA-1”. En: *IN-EN-GRYCN-DAN-008 Rev. 0* (2019).
- [11] IAEA. “Neutron Fluence Measurements”. En: *Technical Reports Series* 107 (1970), págs. 54-55.

- 
- [12] Lic. Sánchez F. A. “Técnicas de medición de flujos de neutrones con detectores de activación”. En: *INFORME TECNICO CNEA-CAB 047/029/07 107* (2007), págs. 1-19.
- [13] *Nucléide - Lara: Library for gamma and alpha emissions*. 2023. URL: <http://www.lnhb.fr/Laraweb/>.
- [14] Benhaim A. Bellino P. y Gomez A. “Determinación de la reactividad mediante la cinética inversa para reactores en estado crítico y subcrítico”. En: *XXXIX Reunión Anual de la AATN* (2012).
- [15] Canberra Industries. “Genie 2000 Tutorials”. En: (2004).
- [16] Ing. Bazzana S. “Desarrollo, análisis y evaluación de experimentos neutrónicos en el RA-6”. En: *Tesis de maestría - Instituto Balseiro* (2012).
- [17] “Comunicación privada con Jennifer Rodríguez Mazziere”. En: *Medición de flujo en el núcleo del RA-1* (2021).
- [18] M. Milošević et al. “Measurement of the Adjoint Flux at the RB Reactor”. En: *The Boris Kidrič Institute of Nuclear Sciences* (1983).

# Apéndice A

## Flujo adjunto: desarrollo de ecuaciones

### A.1. Teoría de perturbaciones a dos grupos de energía

Siendo  $\hat{F}$  el operador que condensa toda la información de las fisiones y  $\hat{M}$  el que engloba el resto de las interacciones del neutrón en el medio (absorciones, fugas, ganancias o pérdidas por *scattering*), se presentan las expresiones correspondientes a dos grupos de energía:

$$\hat{F}\phi = \begin{bmatrix} \chi_1 v_1 \Sigma_{f1} & \chi_1 v_2 \Sigma_{f2} \\ \chi_2 v_1 \Sigma_{f1} & \chi_2 v_2 \Sigma_{f2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1(\bar{r}) \\ \phi_2(\bar{r}) \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

donde  $v_i$  es la producción de neutrones por fisión en el grupo  $i$ ,  $\chi_i$  es el espectro de fisión del grupo  $i$  y  $\Sigma_{fi}$  es la sección eficaz macroscópica de fisión condensada al grupo  $i$ .

$$\hat{M}\phi = \begin{bmatrix} \Sigma_{a1} + \Sigma_{12} - D_1 \nabla^2 & -\Sigma_{21} \\ -\Sigma_{12} & \Sigma_{a2} + \Sigma_{21} - D_2 \nabla^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1(\bar{r}) \\ \phi_2(\bar{r}) \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

en este caso  $\Sigma_{ai}$  es la sección eficaz macroscópica de absorción condensada al grupo  $i$ ,  $\Sigma_{ij}$  es la sección eficaz macroscópica de *scattering* del grupo  $i$  al grupo  $j$  y  $D_i \nabla^2$  es el coeficiente de difusión del grupo  $i$  junto al operador laplaciano. Los flujos  $\phi_1(\bar{r})$  y  $\phi_2(\bar{r})$  son los correspondientes a los grupos 1 (rápido) y 2 (térmico) de energía. A la sumatoria de los términos de absorción y *scattering* se la suele llamar sección eficaz macroscópica de remoción y se simboliza  $\Sigma_r$ .

## A.2. Perturbaciones

Si se elige como energía de corte la energía de corte térmico,  $\Sigma_{r2} = \Sigma_{a2}$  debido a que los neutrones térmicos no experimentarán colisiones en donde adquieran la energía suficiente para pasar al grupo rápido. Además, teniendo en cuenta que el espectro de fisión se extiende desde los 100 keV en adelante, se puede afirmar con el corte elegido que todos los neutrones producidos por fisión aparecerán en el grupo rápido. De esta manera  $\chi_2 = 0$  y  $\chi_1 = 1$ .

### Material físil

En este caso la perturbación afectará al operador de fisiones en ambos grupos y al operador de no fisiones también en ambos grupos pero únicamente a los términos de absorción, ya que se consideran no despreciables. No se plantean cambios ni en la matriz de *scattering* ni en los términos de fugas. Las matrices de perturbaciones para los distintos operadores resultan ser:

$$\Delta\hat{F} = \begin{bmatrix} \Delta(v_1\Sigma_{f1}) & \Delta(v_2\Sigma_{f2}) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

y

$$\Delta\hat{M} = \begin{bmatrix} \Delta\Sigma_{a1} & 0 \\ 0 & \Delta\Sigma_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Teniendo en cuenta la ecuación Ecuación 1.9 Se plantea:

$$\Delta\rho^{(1)} = \frac{\int_V [\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \left( \lambda_0 \begin{bmatrix} \Delta(v_1\Sigma_{f1}) & \Delta(v_2\Sigma_{f2}) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta\Sigma_{a1} & 0 \\ 0 & \Delta\Sigma_{a2} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \phi_{01} \\ \phi_{02} \end{bmatrix} dV}{\int_V [\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \lambda_0 \begin{bmatrix} \chi_1 v_1 \Sigma_{f1} & \chi_1 v_2 \Sigma_{f2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{01} \\ \phi_{02} \end{bmatrix} dV} \quad (\text{A.5})$$

y trabajando con los productores escalares se obtiene:

$$\begin{aligned} [\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \begin{bmatrix} \Delta(v_1\Sigma_{f1}) - \Delta\Sigma_{a1} & \Delta(v_2\Sigma_{f2}) \\ 0 & -\Delta\Sigma_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{01} \\ \phi_{02} \end{bmatrix} = \\ [\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \begin{bmatrix} (\Delta(v_1\Sigma_{f1}) - \Delta\Sigma_{a1})\phi_{01} + \Delta(v_2\Sigma_{f2})\phi_{02} \\ -\Delta\Sigma_{a2}\phi_{02} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Por lo que la expresión final para el cambio en reactividad por perturbación de un material físil resulta:

$$\Delta\rho^{(1)} = \frac{\int_V [\phi_{01}^* ((\Delta(v_1\Sigma_{f1}) - \Delta\Sigma_{a1})\phi_{01} + \Delta(v_2\Sigma_{f2})\phi_{02}) - \phi_{02}^* \Delta\Sigma_{a2}\phi_{02}] dV}{\int_V (\phi_{01}^* \chi_1 v_1 \Sigma_{f1} \phi_{01} + \phi_{01}^* \chi_1 v_2 \Sigma_{f2} \phi_{02}) dV} \quad (\text{A.7})$$

### Material absorbente

En este caso se propone utilizar un material fuertemente absorbente de neutrones térmicos, por lo que la perturbación se dará en el operador  $\hat{M}$  y afectará únicamente al grupo térmico, considerándose despreciable el efecto de absorción en el grupo rápido. En este caso la matriz de perturbación quedará así:

$$\Delta\hat{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Delta\Sigma_{a2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

El cambio en reactividad estará dado por:

$$\Delta\rho^{(1)} = \frac{\int_V [\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\Delta\Sigma_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{01} \\ \phi_{02} \end{bmatrix} dV}{\int_V [\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \lambda_0 \begin{bmatrix} \chi_1 v_1 \Sigma_{f1} & \chi_1 v_2 \Sigma_{f2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{01} \\ \phi_{02} \end{bmatrix} dV} \quad (\text{A.9})$$

y haciendo los productos escalares se obtiene:

$$[\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\Delta\Sigma_{a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{01} \\ \phi_{02} \end{bmatrix} = [\phi_{01}^* \quad \phi_{02}^*] \begin{bmatrix} 0 \\ -\Delta\Sigma_{a2} \phi_{02} \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

La expresión final para el cambio en reactividad resulta en este caso:

$$\Delta\rho^{(1)} = -\frac{\int_V \phi_{02}^* \Delta\Sigma_{a2} \phi_{02} dV}{\int_V (\phi_{01}^* \chi_1 v_1 \Sigma_{f1} \phi_{01} + \phi_{01}^* \chi_1 v_2 \Sigma_{f2} \phi_{02}) dV} \quad (\text{A.11})$$

## Apéndice B

### Ritmos de activación: tablas de datos

#### Masas de alambres

Alambre	Masa [mg]
W6	(68.49±0.01)
W7	(67.20±0.01)
W8	(69.07±0.01)
W10	(68.26±0.01)
W11	(68.89±0.01)
W12	(67.83±0.01)
W22	(68.70±0.01)
W23	(69.10±0.01)
W24	(67.60±0.01)
W25	(67.60±0.01)

Tabla B.1: Listado de alambres utilizados.

Elemento	Concentración en masa
oro	(1.50±0.05)%
cobre	(98.50±0.05)%

Tabla B.2: Composición de alambres.

### Valores tabulados

Definición	Valor
$N_A$	$6.0221476 \cdot 10^{23} \left[ \frac{at}{mol} \right]$
$M_{Au}$	$196.96657 \left[ \frac{g}{mol} \right]$
$M_{Cu}$	$63.55 \left[ \frac{g}{mol} \right]$
$\eta_{Au}$	100 %
$\eta_{Cu}$	69.15 %
$\Gamma_{198Au}$	95.62 %
$\Gamma_{64Cu}$	35.04 %
$\lambda_{198Au}$	$2.97760 \cdot 10^6 \left[ \frac{1}{s} \right]$
$\lambda_{64Cu}$	$15.1602 \cdot 10^6 \left[ \frac{1}{s} \right]$

Tabla B.3: Valores obtenidos de tablas.[13]

### Valores de calibraciones

Energía	Ajuste [keV]	Valor teórico [keV]	$e_{rel}$ %
E ( $^{198}Au$ )	$411.77 \pm 0.14$	411.80205	$7 \cdot 10^{-3}$ %
E ( $^{64}Cu$ )	$510.83 \pm 0.15$	511	$3 \cdot 10^{-2}$ %

Tabla B.4: Energías obtenidas por calibración.

Eficiencia	Valor
$\varepsilon (^{198}Au)$	$0.00286 \pm 0.00007$
$\varepsilon (^{64}Cu)$	$0.00232 \pm 0.00006$

Tabla B.5: Eficiencia del detector para cada pico.

### Datos por irradiación

Irradiación 1:  $t_{irr} = (4099 \pm 1)$  s

z [cm]	Alambre	RT [s]	LT [s]	$t_{dec}$ [s]	$C_{Au}$ [ctas]	$C_{Cu}$ [ctas]
0	W6	(2059±1)	(1980±1)	(31260±1)	(290839±582)	(1041385±1041)
16	W7	(3310±1)	(3213±1)	(27600±1)	(354561±638)	(1271592±1144)
32	W8	(2668±1)	(2614±1)	(24360±1)	(144147±418)	(738964±887)
48	W10	(4947±1)	(4921±1)	(18840±1)	(44717±268)	(288320±577)

APÉNDICE B. RITMOS DE ACTIVACIÓN: TABLAS DE DATOS

---

**Irradiación 2:**  $t_{irr} = (3543 \pm 1)$  s

z [cm]	Alambre	RT [s]	LT [s]	$t_{dec}$ [s]	$C_{Au}$ [ctas]	$C_{Cu}$ [ctas]
0	W11	(6298±1)	(6163±1)	(62520±1)	(683401±1025)	(1621110±1459)
16	W12	(3547±1)	(3461±1)	(21000±1)	(302337±695)	(1159436±1159)
32	W22	(10073±1)	(10000±1)	(92400±1)	(342974±789)	(751747±1128)
48	W23	(5445±1)	(5422±1)	(12780±1)	(34640±339)	(240929±626)

**Irradiación 3:**  $t_{irr} = (3654 \pm 1)$  s

z [cm]	Alambre	RT [s]	LT [s]	$t_{dec}$ [s]	$C_{Au}$ [ctas]	$C_{Cu}$ [ctas]
0	W10	(1966±1)	(1895±1)	(21840±1)	(242818±656)	(972000±1069)
32	W24	(5901±1)	(5797±1)	(19140±1)	(255818±691)	(1439239±1295)

**Irradiación 4:**  $t_{irr} = (3624 \pm 1)$  s

z [cm]	Alambre	RT [s]	LT [s]	$t_{dec}$ [s]	$C_{Au}$ [ctas]	$C_{Cu}$ [ctas]
0	W8	(1936±1)	(1873±1)	(31440±1)	(239335±550)	(853171±1024)
16	W7	(1979±1)	(1932±1)	(29160±1)	(175086±508)	(621176±870)
32	W23	(3304±1)	(3250±1)	(25500±1)	(147060±544)	(743011±966)
48	W25	(10079±1)	(10034±1)	(14700±1)	(73679±302)	(474631±807)

donde  $t_{irr}$  es el tiempo durante el cual se irradiaron los alambres, RT es el tiempo real de medición, LT es el tiempo vivo de medición,  $t_{dec}$  es el tiempo de decaimiento desde fin de irradiación hasta inicio de medición,  $C_{Au}$  son las cuentas netas totales para el oro y  $C_{Cu}$  son las cuentas netas totales para el cobre.

**Ritmos de activación**

Altura [cm]	N° irradiación	$R_{Au} [\frac{r}{s}]$	$R_{Cu} [\frac{r}{s}]$
0	<b>1</b>	<b><math>(1.63 \pm 0.12) 10^{-12}</math></b>	<b><math>(4.14 \pm 0.10) 10^{-14}</math></b>
	2	$(1.56 \pm 0.11) 10^{-12}$	$(3.93 \pm 0.10) 10^{-14}$
	3	$(1.55 \pm 0.11) 10^{-12}$	$(3.92 \pm 0.10) 10^{-14}$
	4	$(1.59 \pm 0.11) 10^{-12}$	$(4.01 \pm 0.10) 10^{-14}$
16	1	$((1.24 \pm 0.09) 10^{-12}$	$(3.03 \pm 0.08) 10^{-14}$
	<b>2</b>	<b><math>(1.10 \pm 0.08) 10^{-12}</math></b>	<b><math>(2.65 \pm 0.07) 10^{-14}</math></b>
	3	no medido	no medido
	4	$(1.15 \pm 0.08) 10^{-12}$	$(2.81 \pm 0.07) 10^{-14}$
32	1	$(5.9 \pm 0.4) 10^{-13}$	$(2.00 \pm 0.05) 10^{-14}$
	2	$(5.3 \pm 0.4) 10^{-13}$	$(1.82 \pm 0.05) 10^{-14}$
	<b>3</b>	<b><math>(5.4 \pm 0.4) 10^{-13}</math></b>	<b><math>(1.90 \pm 0.05) 10^{-14}</math></b>
	4	$(5.5 \pm 0.4) 10^{-13}$	$(1.86 \pm 0.05) 10^{-14}$
48	1	$(9.8 \pm 0.7) 10^{-14}$	$(3.92 \pm 0.10) 10^{-15}$
	2	$(7.7 \pm 0.6) 10^{-14}$	$(3.09 \pm 0.08) 10^{-15}$
	3	no medido	no medido
	<b>4</b>	<b><math>(9.0 \pm 0.6) 10^{-14}</math></b>	<b><math>(3.51 \pm 0.09) 10^{-15}</math></b>

Tabla B.6: Ritmos de activación del oro y del cobre para las distintas irradiaciones. En negrita se señala la posición para la cual el SPND se encontraba a esa misma altura.