

***“Diseño, construcción y caracterización de una  
cámara de ionización  $\gamma$ , para mediciones de  
dosis en campos de irradiación mixtos (n- $\gamma$ )”***

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES  
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

**Alumno:** Facundo Gonzalez

**Director:** Marcelo Miller

Septiembre 2024



## Índice

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1: Introducción.....                                                                 | 4  |
| I. Diseño conceptual de la cámara .....                                                       | 4  |
| Capítulo 2: Materiales y método .....                                                         | 6  |
| I. Fabricación de prototipo.....                                                              | 6  |
| II. Ensayos eléctricos .....                                                                  | 20 |
| ➤ Ensayo de aislación: .....                                                                  | 20 |
| ➤ Ensayo de acople capacitivo.....                                                            | 20 |
| III. Caracterización en campo gamma puro.....                                                 | 21 |
| ➤ Mediciones en el bunker de IyC .....                                                        | 21 |
| ➤ Medición con la fuente de cesio del búnker CRRD .....                                       | 24 |
| IV. Caracterización en campo mixto conocido.....                                              | 25 |
| ➤ Medición de la CI en el RA-3.....                                                           | 25 |
| Capítulo 3: Resultados y discusión .....                                                      | 29 |
| I. Ensayos eléctricos .....                                                                   | 29 |
| ➤ Ensayo de aislación: .....                                                                  | 29 |
| ➤ Ensayo de acople capacitivo.....                                                            | 29 |
| II. Caracterización en campo gamma puro.....                                                  | 29 |
| ➤ Mediciones en el bunker de IyC (25/08/2023) .....                                           | 29 |
| ➤ Medición con la fuente de cesio del búnker del CRRD (28/08/2023).....                       | 30 |
| III. Caracterización en campo mixto conocido.....                                             | 31 |
| ➤ Medición de la CI en el RA-3 (11/09/2023).....                                              | 31 |
| IV. Estimación del peso de las señales debidas a fotones y neutrones en el núcleo del RA-3 .. | 33 |
| Capítulo 4: Conclusiones .....                                                                | 39 |
| Anexo I.....                                                                                  | 41 |
| Índice de figuras .....                                                                       | 45 |
| Agradecimientos .....                                                                         | 46 |

## Capítulo 1: Introducción

### I. Diseño conceptual de la cámara

En un marco de colaboración entre la Universidad de Pavía y la División Instrumentación y Dosimetría de la Subgerencia de IyC del Centro Atómico Ezeiza, la Universidad solicitó el diseño y provisión de un detector de radiación gamma de tamaño compacto, con el fin de realizar un mapeo del flujo gamma en el núcleo de su reactor nuclear de pileta abierta en condición de plena potencia [1]. Dadas las condiciones del campo mixto a ser usado (neutrón-gamma), el detector debía ser diseñado de forma tal de minimizar, en la medida de lo posible, la respuesta a los neutrones para que la señal fuera principalmente debida a la radiación gamma. Por otro lado, dado el muy alto nivel de radiación al que sería sometido, se debieron seleccionar materiales de alta resistencia a la radiación. Con respecto al tamaño, el limitante fue el diámetro interno del tubo de irradiación con acceso al núcleo, que se propuso usar para estas mediciones. Dicho diámetro es de 34 mm [2] por lo que el diámetro externo del detector, de geometría cilíndrica, debía ser menor que esa medida, por lo que se propuso un diámetro del orden de los 20 mm. Con respecto a la longitud, se consideró diseñarlo con una medida del mismo orden del diámetro, con lo que debía ser de aproximadamente 20 mm. De esa forma se tendría un detector muy compacto como para realizar mediciones que podrían aproximarse a puntuales en comparación con el tamaño del núcleo. Si bien el tubo de irradiación mencionado es cerrado en su parte inferior, por lo que está lleno de aire y no de agua, se prefirió realizar un diseño que fuera sumergible, al menos en una de las versiones, como para poder extender su uso a los reactores tipo pileta propios de CNEA por inmersión directa en el agua del reactor, sin necesidad de un tubo seco. En principio, no se encontraron en el mercado detectores con estas características, por lo que su desarrollo resultó de interés para IyC, tanto para responder a la necesidad de la Universidad de Pavía como para su uso en los reactores propios.

Durante el diseño, se evaluaron diversas opciones de materiales. Para la carcasa exterior de la cámara se consideraron aleaciones conductoras con las que se pudiera construir un volumen estanco, de forma tal de confinar el gas de llenado, tales como acero inoxidable (AISI 304L o 316L), Inconel-600 y Zircaloy-4. Los dos primeros materiales, tienen la ventaja de la facilidad para ser soldados con condición de estanqueidad. Además, ambos materiales son compatibles para ser soldados entre sí. Por otro lado, tienen la desventaja de una sección eficaz de captura neutrónica relativamente alta y por lo tanto producen una mayor señal debida a la captura de neutrones con emisión secundaria de radiación gamma que incrementa en forma espuria el flujo gamma a medir. El Zy-4 tiene la ventaja de ser una de las aleaciones con menor sección eficaz de captura neutrónica, pero presenta importantes dificultades tecnológicas para la soldadura estanca Zy-Zy y para soldaduras mixtas con aleaciones de base hierro o níquel. Por este motivo no fue

una opción para los primeros prototipos. Para los electrodos internos, tanto de señal como el de alta tensión, se definió usar grafito ya que entre los materiales conductores y resistentes a la radiación es el que menor sección eficaz de captura neutrónica posee [3]. Sin embargo, por su porosidad e imposibilidad de soldadura no puede usarse como carcasa exterior estanca. Como gas de llenado, se definió utilizar CO<sub>2</sub> [4] por poseer ambos elementos de la molécula muy baja sección eficaz de captura neutrónica y de reacciones generadoras de partículas cargadas. Como materiales aislantes, por el requerimiento de la alta resistencia a la radiación, se consideró usar cerámicos como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y OMg. Para los cables de alta tensión y señal de la cámara, se definió utilizar cables de aislación mineral, de alta resistencia a la radiación, con vaina exterior y conductor de Inconel-600 y aislante de OMg. El laboratorio contaba con stock de este material con un diámetro exterior de 2mm, lo cual se consideró compatible con las dimensiones requeridas para la cámara y con la robustez mecánica suficiente.

Se elaboró un primer diseño de la cámara en la división, que fue enviado al grupo de la universidad que lo utilizó para realizar simulaciones numéricas y verificar la repuesta ante distintos escenarios de radiación. Este trabajo fue tema de una tesis de maestría en la universidad [2]. En dicho trabajo se concluyó que el inoxidable AISI 316L era una mejor alternativa que el Inconel-600 como material para la carcasa exterior y que la señal neutrónica, con el espectro del núcleo del reactor y a plena potencia, era el 3% de la señal total de la cámara. Esto se consideró un muy bueno resultado ya que indicó, a nivel de simulación, que el 97 % de la señal era debida a la radiación gamma.

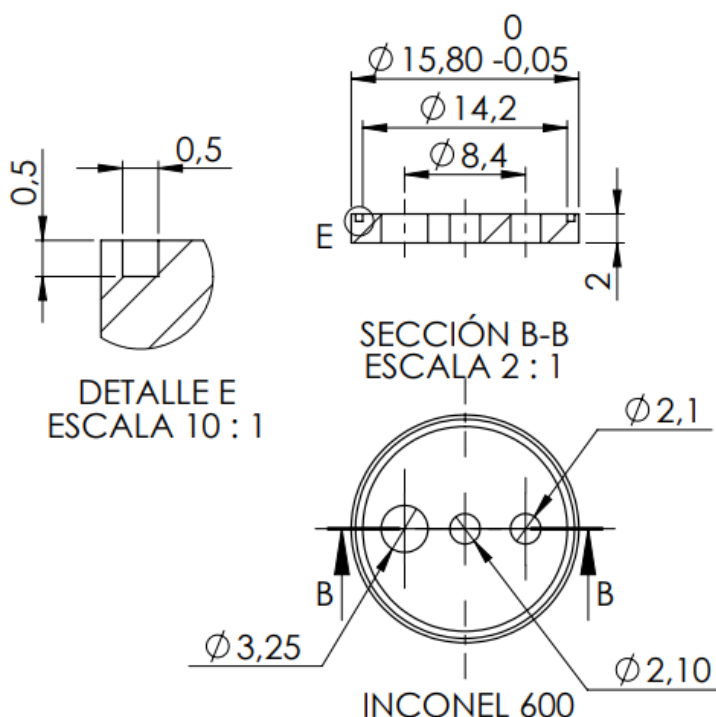
En este trabajo se describe la construcción de un prototipo y la caracterización de su respuesta cuando es irradiado con radiación gamma pura y en campo mixto gamma-neutrón. Se evaluó inicialmente la sensibilidad gamma al exponer la cámara a una fuente de 137-Cs en una posición con una tasa de dosis gamma conocida. Posteriormente, la cámara se irradió en la columna térmica del RA-3, en una posición de irradiación debidamente caracterizada en términos de tasa de dosis gamma y flujo neutrónico. A partir de esta medición, se pudo estimar la sensibilidad a neutrones térmicos. Finalmente, utilizando las sensibilidades obtenidas para radiación gamma y neutrónica, junto con las condiciones del núcleo del reactor RA-3, se llevó a cabo una inferencia del porcentaje de señal debido a radiación gamma y a neutrones térmicos en el núcleo del reactor. Por otra parte, en base al trabajo mencionado [2], se estimó el porcentaje de la señal debida a neutrones rápidos. Este proceso permitió demostrar, con la información disponible actualmente, que la respuesta principal en el núcleo del reactor RA-3 y en condiciones de plena potencia se debe a la radiación gamma.



La secuencia de armado de la cámara se detalla a continuación:

1. Soldadura de cables minerales y tubo de cobre:

Se suelda con brazing de plata-cobre-zinc sobre la tapa de la cámara, según lo indicado en el plano (Figura 1), dos cables minerales y un tubo de cobre. Un detalle del diseño de la tapa de la cámara se puede ver en la Figura 2. Los cables deben sobresalir por encima de la tapa aproximadamente 250mm cada uno y por debajo de la tapa unos pocos centímetros. El tubo de cobre tiene la función de posibilitar el vaciado, el ensayo de estanqueidad al helio y el llenado de la cámara. El tubo y los cables soldados a la tapa se pueden ver en la fotografía de la Figura 3.



**Figura 2** Detalle de la tapa de la cámara.

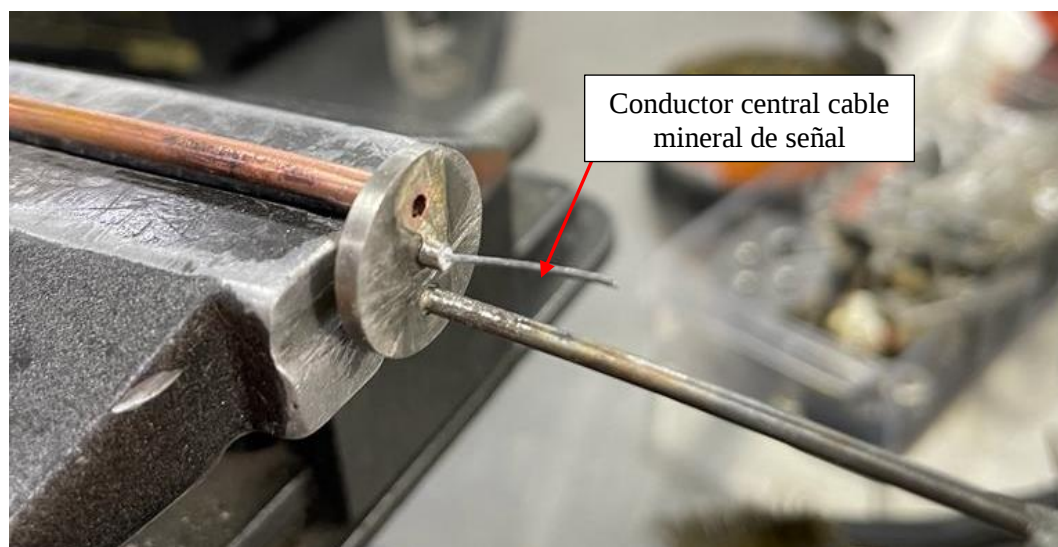


**Figura 3** Tapa soldada con cables minerales y tubo de cobre.

## 2. Retiro de la vaina exterior del cable de aislación mineral:

Se debe retirar la vaina exterior del cable de aislación mineral central, dejando un segmento de 2mm de esta vaina justo por debajo de la tapa de la cámara. Este detalle específico se visualiza en el plano general de la cámara (Figura 1) y se puede ver en la Figura 4.

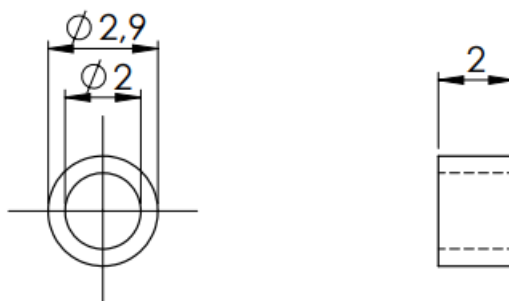
Estos 2mm de vaina exterior sobre el cable mineral central tiene el propósito de permitir el centrado preciso del electrodo de señal en la configuración final de la cámara. Este cuidado garantiza una alineación óptima entre ambos electrodos, contribuyendo al correcto funcionamiento de la cámara.



**Figura 4** Cable mineral central sin vaina exterior.

### 3. Soldadura del anillo para centrar la cerámica aislante:

Se procede a soldar con láser un anillo de inoxidable que permitirá centrar la cerámica aislante dentro de la cámara. Las dimensiones del anillo de inoxidable se pueden ver en la Figura 5 montado y soldado puede verse en la fotografía de la Figura 6.



**Figura 5** Anillo central.

El diámetro externo de este anillo corresponde al diámetro interno de la cerámica utilizada, de esta manera se asegura una colocación adecuada y estable de la cerámica en relación con la carcasa externa. La soldadura con láser se realiza con cuidado para garantizar una unión segura entre el anillo y la vaina exterior del cable mineral.

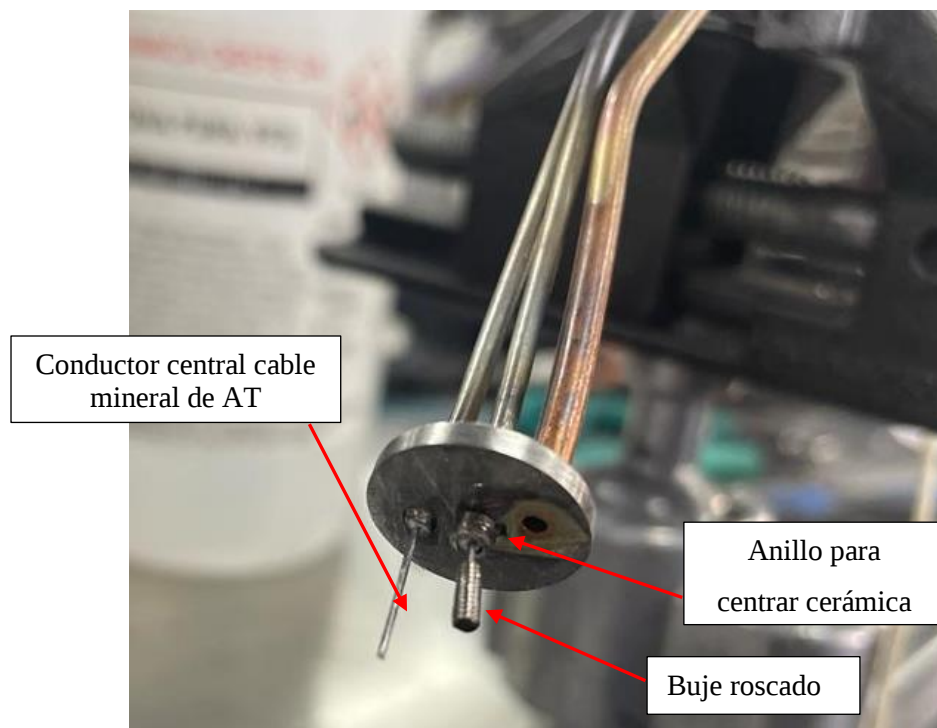
### 4. Soldadura buje roscado al conductor central del cable mineral de señal:

Se realiza otra soldadura con láser para unir un buje roscado al conductor central del cable mineral de señal tal como se ve en la fotografía de la Figura 6. El buje roscado cuenta con un agujero donde se inserta el conductor central del cable mineral. La soldadura láser se realiza entre el extremo del conductor central y el extremo del buje roscado.

### 5. Retiro de la vaina exterior del cable mineral de AT:

Luego de completar las soldaduras con láser sobre el cable mineral de señal, se procede a retirar la vaina exterior del cable mineral de alta tensión. Este paso se realiza con cuidado, para que al retirar la vaina externa no queden aristas de ésta que faciliten saltos de arcos eléctricos.

El detalle se puede ver en la fotografía de la Figura 6.



**Figura 6** Conjunto obtenido en pasos 3, 4 y 5.

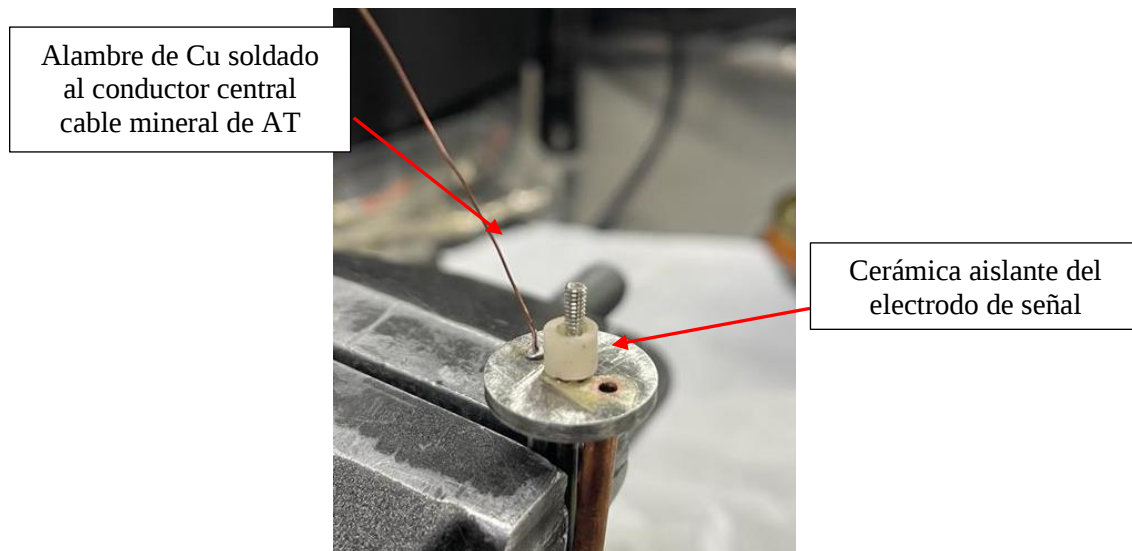
6. Soldadura de alambre de Cobre al conductor central del cable mineral AT:

Se procede a soldar con láser un alambre de cobre de diámetro  $\varnothing 0.4\text{mm}$  al conductor central del cable mineral de alta tensión tal como se muestra en la fotografía de la Figura 7.

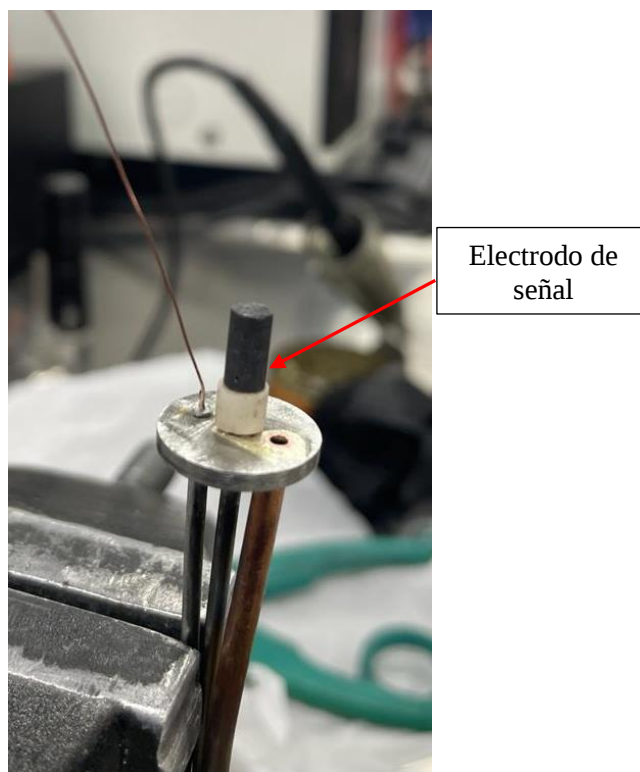
7. Armado del electrodo de señal:

Se coloca la cerámica central en la posición que se muestra en el plano general de la cámara (Figura 1 y Figura 7). La presencia del anillo de inoxidable soldado anteriormente ayuda a centrar la cerámica dentro de la cámara. Este componente cerámico actúa como aislante, y forma parte del diseño del sistema de guarda de la cámara. A continuación, se rosca el electrodo de grafito de señal sobre el buje soldado al conductor central del cable mineral hasta hacer tope con cierta presión sobre la cerámica central. La rosca permite ajustar la posición del electrodo según sea necesario para lograr una conexión eléctrica segura, ya que el grafito no admite una unión por soldadura.

Los pasos 6 y 7 completan el montaje del electrodo de señal de la cámara, los dos pasos descriptos se pueden ver en la Figura 7 y Figura 8.



**Figura 7** Cerámica aislante central.



**Figura 8** Electrodo de señal montado.

#### 8. Verificación de aislación y continuidad eléctrica:

Utilizando un multímetro, se verifica cuidadosamente que haya aislación entre el alambre de cobre soldado al conductor central del cable mineral de alta tensión y la tapa de la cámara. Además, se verifica la continuidad eléctrica entre el electrodo de señal (grafito central) y el conductor central del cable mineral de señal en el extremo opuesto del cable.

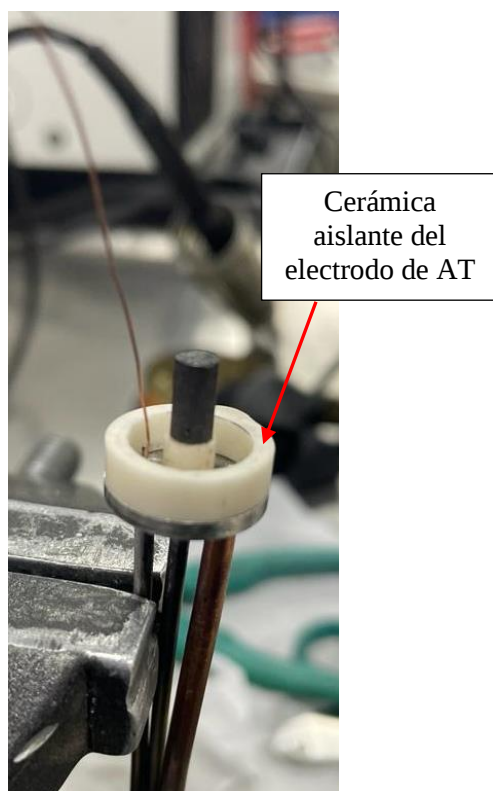
9. Colocación de la cerámica exterior:

Luego de las verificaciones eléctricas, se procede a colocar la cerámica exterior que actuará como aislante para el electrodo de alta tensión tal como se ve en la fotografía de la Figura 9. Esta cerámica también es parte del diseño del sistema de guarda de la cámara.

10. Colocación del grafito superior del electrodo de AT:

Seguidamente, se coloca el grafito superior del electrodo de alta tensión en la posición prevista en el plano general de la cámara. Al colocar este grafito se debe tener la precaución de enhebrar del alambre de cobre a través del agujero perforado sobre él tal como se ve en la fotografía de la Figura 10.

Los pasos 8, 9 y 10 completan el montaje de la parte superior de la cámara.



**Figura 9** Cerámica aislante de AT.

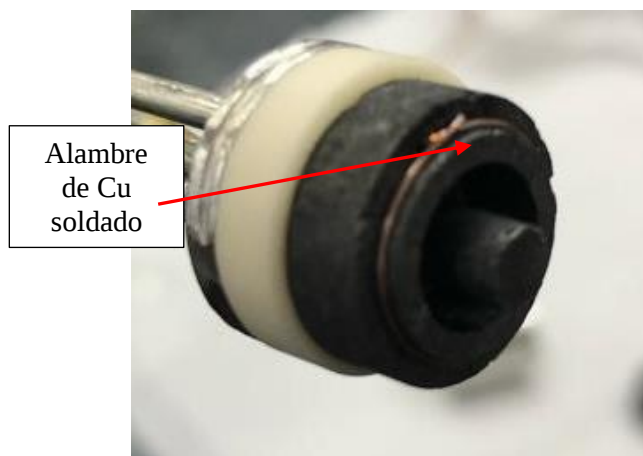


**Figura 10** Electrodo superior de AT.

11. Formación de un anillo con el alambre de cobre sobre el grafito superior del electrodo de AT:

Se procede a darle una vuelta al alambre de cobre sobre el grafito superior del electrodo de alta tensión, formando un anillo alrededor de éste. Esto busca asegurar una adecuada conexión eléctrica entre el alambre y el electrodo. Se realizan puntadas de soldadura láser para fijar el anillo de alambre de cobre en su posición sobre el grafito. Finalmente, se corta el exceso de alambre de

cobre una vez que el anillo está firmemente soldado. El conjunto queda montado como se muestra en la fotografía de la Figura 11.



**Figura 11** Electrodo superior de AT con cable de Cu soldado.

#### 12. Colocación de la parte inferior del electrodo de AT:

Se coloca la parte inferior del electrodo de AT. Esta parte del electrodo, una vez montada y soldada la carcasa exterior, presiona sobre el alambre de cobre, asegurando así la continuidad eléctrica entre el conductor central del cable mineral de AT y el electrodo de AT (Figura 12). La presión ejercida por la parte inferior de grafito es esencial para mantener una conexión eléctrica confiable. Se debe verificar la continuidad eléctrica entre el electrodo de AT y el conductor central del cable mineral de AT en el extremo opuesto del cable. Esta verificación garantiza que la conexión eléctrica se mantenga íntegra a lo largo de todo el cable y el electrodo.

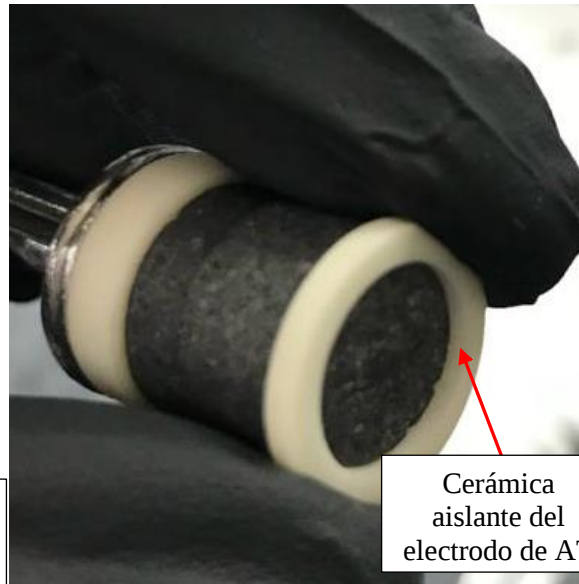
#### 13. Colocación de la cerámica inferior:

Finalmente, se coloca la cerámica inferior que actúa como aislante para el electrodo de AT y la carcasa exterior de la cámara tal como se ve en la fotografía de la Figura 13.



Grafito inferior  
del electrodo de  
AT

**Figura 12** Electrodo inferior de AT.



Cerámica  
aislante del  
electrodo de AT

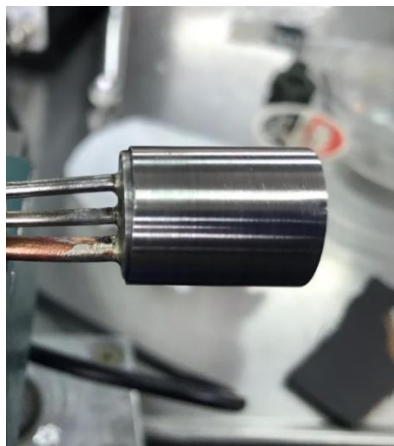
**Figura 13** Cerámica inferior aislante.

#### 14. Colocación de la carcasa exterior:

Con precaución para mantener las piezas en posición correcta, se coloca la carcasa exterior sobre la cámara. Es esencial sostener cuidadosamente el conjunto mientras se posiciona la carcasa, se empuja hacia la tapa hasta que realice tope. En esta posición, de acuerdo con el diseño, la tapa y la carcasa deben quedar al ras. Finalmente se realizan dos puntadas de soldadura láser a 180° para fijar de manera segura la carcasa en su lugar, ver Figura 14 (en esta figura no se ve al ras ya que no se está haciendo presión sobre la carcasa para tomar la foto).

#### 15. Verificación de Aislación Eléctrica:

Posteriormente, se lleva a cabo una verificación de la aislación eléctrica entre los conductores centrales de cada cable mineral y la carcasa de la cámara. Además, se verifica la aislación eléctrica entre ambos electrodos.



**Figura 14** Carcasa exterior en posición.

16. Soldadura de la carcasa a la tapa de la cámara:

Una vez verificada correctamente la aislación eléctrica entre las diferentes partes, se procede a soldar con láser en toda la periferia la carcasa a la tapa de la cámara. Este proceso fija los internos de la cámara. La soldadura debe ser estanca.

17. Ensayo de fugas al helio (He):

Después de completar la soldadura de la carcasa, se realiza el ensayo de fugas al helio para verificar la última soldadura y las soldaduras brazing sobre la tapa de la cámara. Los extremos de los cables minerales se sellan con epoxi de manera provisoria, y se coloca una válvula de aguja sobre el tubo de cobre. El sistema se acopla a la máquina de detección de fugas al helio. El objetivo es asegurar que la tasa de fugas sea menor a  $3 \times 10^{-9}$  sccs (centímetros cúbicos estándar por segundo).

18. Desgasado del conjunto:

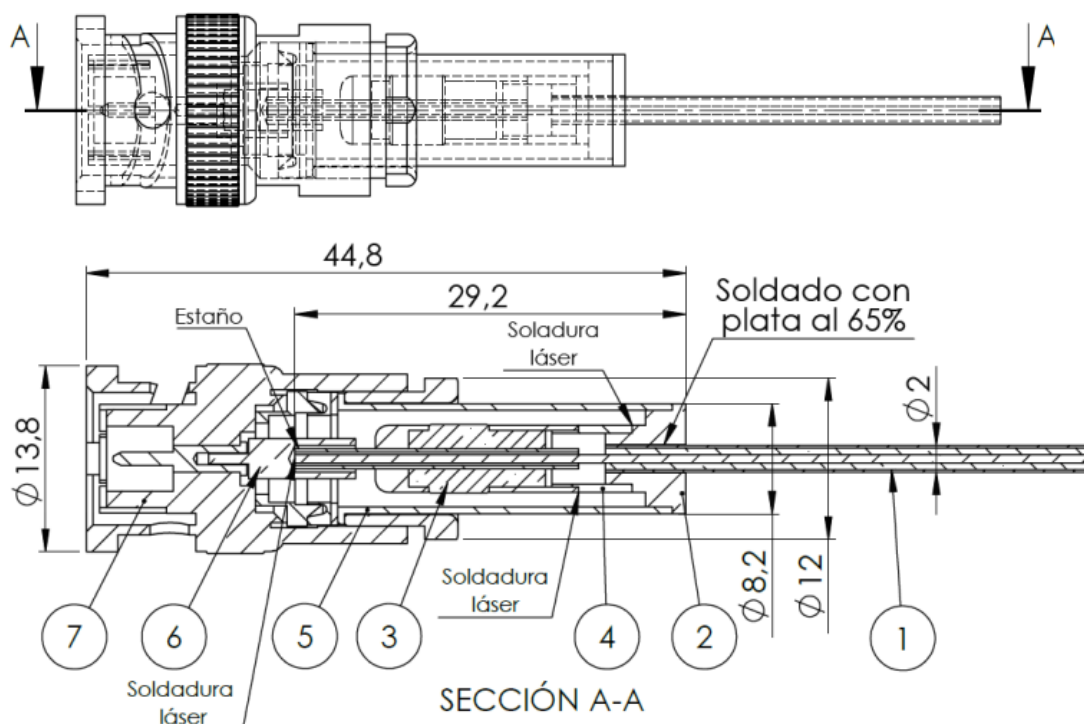
Después de verificar la estanqueidad del conjunto, se procede a calentar toda la zona de la cámara y los cables minerales para lograr un primer desgasado del conjunto. Esto ayuda a eliminar cualquier residuo de gases atrapados en el sistema. Luego del desgasado, se cierra la válvula para dejar el conjunto en vacío.

Con la cámara en estas condiciones se procede a realizar los cierres estancos sobre los cables de aislación mineral mediante pasantes de cerámico-metal.

19. Cierres estancos sobre los cables de aislación mineral:

Estos cierres se realizan de manera desplazada para facilitar la posterior inserción del conjunto en las diferentes facilidades donde se lo podría utilizar.

La Figura 15 muestra un esquema del diseño para el cierre estanco del extremo de los cables.



**Figura 15** Cierre estanco superior con conector BNC.

| Nº de Orden | Denominación             | Observaciones                      |
|-------------|--------------------------|------------------------------------|
| 1           | Cable mineral            | Ø2mm (Inconel 600-OMg-Inconel 600) |
| 2           | Copa unión cable-pasante | AISI 304L                          |
| 3           | Pasante cerámico metal   | FRIATEC Art N° 551-1063            |
| 4           | Buje de separación       | AISI 304L                          |
| 5           | Buje de cierre           | AISI 304L                          |
| 6           | Pin de acople pasante    | Latón                              |
| 7           | Conector BNC             | Amphenol ITEM N° 031-212           |

**Tabla 1** Componentes del cierre estanco.

Mediante las piezas 2 y 4 y tres soldaduras (una con brazing y dos con láser) se busca lograr un sello estanco de cada pasante con su respectivo cable. Una vez realizado este ensamble, cada pasante cerámico-metal con su extremo superior abierto se conecta individualmente a la máquina de detección de fugas al helio. Este paso no solo permite la verificación de todas las soldaduras realizadas en el cierre estanco, sino que también posibilita el secado de los cables minerales hasta alcanzar una aislación mayor a  $10^{11}\Omega$ . Se aprovecha para calentar los cables minerales, hasta lograr la aislación eléctrica adecuada.

Como último paso, se llena el cierre estanco con  $\text{CO}_2$ , este gas se utiliza para generar una atmósfera inerte dentro del conjunto, ver Figura 16 y Figura 17 y se suelda el extremo superior con soldadura láser.



**Figura 16** Cierre estanco en máquina de vacío.



**Figura 17** Cierre estanco en máquina de vacío-1.

Luego que ambos cierres estancos quedaron debidamente sellados y con la correcta aislación, se colocan los conectores BNC correspondientes.



**Figura 18** Cierre estanco con conector BNC.

#### 20. Último desgasado en la máquina de detección de fugas al He:

La cámara se vuelve a colocar en la máquina de detección de fugas al helio para un último desgasado. Durante este proceso, se calienta el conjunto mientras se realiza el vacío desde la válvula. Con este paso se buscan eliminar gases o humedad residual que puedan estar presentes en la cámara y/o en los cables.

Simultáneamente al desgasado, se mide la aislación de los cables minerales con un electrómetro analógico (Figura 19). Este procedimiento permite monitorear si, con la temperatura aplicada durante el desgasado, la aislación de los cables disminuye, lo cual podría indicar la presencia de humedad en el cable o en el conjunto de la cámara. Una vez finalizado el proceso de desgasado y verificación de la aislación de los cables, se cierra la válvula para dejar el conjunto en vacío.



**Figura 19** Electrómetro analógico.

#### 21. Vaciado, llenado y estrangulamiento de la cámara

El proceso de llenado de la cámara se lleva a cabo utilizando un sistema de vaciado y llenado que con distintas válvulas puede conectarse a la cámara y a un tubo de gas. También cuenta con un

manómetro calibrado para medir la presión de llenado. La máquina para hacer vacío cuenta con una bomba mecánica y una difusora. A continuación, se describen los pasos para llenar la cámara:

Se conecta la válvula de la cámara en el tubo que se observa a la izquierda de la Figura 20. En la válvula de la derecha del sistema se conecta un tubo de CO<sub>2</sub> (gas de llenado). El equipo de vacío permite alcanzar un vacío del orden de 10<sup>-6</sup> torr.



**Figura 20** Sistema para hacer vacío.



**Figura 21** Sistema de vaciado y llenado.

Se prende la máquina de vacío para realizar el alto vacío en la cámara. Inicialmente se realiza vacío con la bomba mecánica y luego se realiza vacío con la difusora hasta lograr que el sistema llegue a los valores antes mencionados, de ser necesario se calienta la zona de la cámara para facilitar el desgasado. Una vez logrado el alto vacío en la cámara, se aísla el sistema de la máquina de vacío mediante el cierre de la válvula inferior.

Se abre la válvula que comunica el sistema con el tubo de CO<sub>2</sub> (válvula de la derecha). Se procede a llenar la cámara con CO<sub>2</sub> a una presión de 10 kg/cm<sup>2</sup> relativos. El manómetro calibrado permite monitorear y controlar la presión de llenado de la cámara. Cuando la presión del sistema llega a los 10 kg/cm<sup>2</sup>, se cierra la válvula de la cámara y se desconecta del sistema.

Luego de llenar la cámara se debe estrangular el tubo de cobre acoplado a la válvula en una posición entre la tapa superior de la cámara y la válvula. Para este proceso se utiliza una prensa hidráulica (Figura 22). Luego de estrangular el tubo de cobre se sumerge en un vaso con alcohol y se verifica que no burbujee. Finalmente, para asegurar el cierre, también se procede a estañar la zona de estrangulamiento (Figura 23).



**Figura 22** Prensa hidráulica.



**Figura 23** Tubo de cobre prensado y estañado.

La cámara en estas condiciones queda lista para realizar las mediciones eléctricas de funcionamiento y las caracterizaciones correspondientes.

## **II. Ensayos eléctricos**

Con la cámara presurizada se procede a realizar los ensayos eléctricos de funcionamiento.

### **➤ Ensayo de aislación:**

Para medir la aislación de los cables minerales se utiliza un electrómetro analógico.

- Se conecta el cable de señal y se debe verificar que la aislación sea mayor a  $10^{11}\Omega$ .
- Se conecta el cable de AT y se debe verificar que la aislación sea mayor a  $10^{11}\Omega$ .

### **➤ Ensayo de acople capacitivo**

Para medir el acople capacitivo se debe utilizar un electrómetro analógico y una fuente de tensión.

Se conecta el cable de señal al electrómetro y este se configura para medir corriente. El cable de alta tensión se conecta a la fuente y se inyecta un escalón de tensión de 50V. Se debe registrar un salto de corriente característico de la cámara. Este ensayo permite asegurar el correcto conexionado entre cada uno de los electrodos del detector y el conector correspondiente.

Con estos ensayos se comprueba que la cámara funciona correctamente, con lo cual se puede realizar una primera caracterización sometiendo a ésta a un campo de radiación gamma puro.

### III. Caracterización en campo gamma puro

Luego de los ensayos eléctricos la cámara se lleva al bunker de Instrumentación y Control donde se cuenta con una fuente de  $^{137}\text{Cs}$ . En el bunker se realiza una primera medición de sensibilidad a radiación gamma utilizando un detector calibrado de dimensiones similares y se realizan mediciones durante un dado período temporal para verificar que la presión de llenado se mantenga constante.

#### ➤ Mediciones en el bunker de IyC

Los pasos para realizar la medición son los siguientes:

1. Se coloca la CI alineada con la posición de la fuente de cesio (ver Figura 24).
2. Se polariza la cámara con 500 V.
3. Se inicia el registro de la corriente medida con un electrómetro utilizando un software de adquisición.
4. Manteniendo la fuente cerrada, se verifica que la corriente de fondo sea estable y se espera hasta adquirir un mínimo de 100 datos cuyo promedio,  $I_{fdo-ini}$ , se toma como corriente de fondo inicial.
5. Se abre la fuente y se adquieren un mínimo de 100 datos bajo irradiación. El promedio de esos datos,  $I_{irr-TOT}$ , es la corriente total durante la irradiación.
6. Se cierra la fuente y se realiza una medición de fondo post-irradiación adquiriendo al menos 100 datos cuyo promedio,  $I_{fdo-fin}$ , se toma como corriente de fondo final.
7. Se finaliza la adquisición y se despolariza la cámara.

Se toma como corriente de fondo,  $I_{fdo}$ , el promedio del fondo inicial y final.

Se toma como corriente neta,  $I_{irr-NET} = I_{irr-TOT} - I_{fdo}$



**Figura 24** Cámara alineada con la fuente de Cs.

Para poder tener una primera aproximación de sensibilidad de la CI diseñada y fabricada se utiliza un cámara de ionización de sensibilidad conocida y de geometría parecida. La característica que tiene esta cámara de referencia (CI Far West) es que es una cámara abierta y la sensibilidad está reportada según parámetros específicos de presión-temperatura, por lo que hay que hacer correcciones a las mediciones. Los pasos para realizar la medición son los siguientes:

1. Se coloca en la misma posición que la cámara anterior a la CI Far West (ver Figura 25) procurando que las zonas sensibles de ambas cámaras queden en posición similar.
2. Se polariza la CI Far West con 300 V.
3. Se inicia el registro de la corriente medida con un electrómetro utilizando un software de adquisición.
4. Se registran la temperatura  $T_{med}$  y presión  $p_{med}$  correspondientes a la medición.
5. Manteniendo la fuente cerrada, se verifica que la corriente de fondo sea estable y se espera hasta adquirir un mínimo de 100 datos cuyo promedio,  $^{FW}_{ini}I_{fdo}$ , se toma como corriente de fondo inicial.
6. Se abre la fuente y se adquieren un mínimo de 100 datos bajo irradiación. El promedio de esos datos,  $^{FW}_{TOT}I_{irr}$ , es la corriente total durante la irradiación.
7. Se cierra la fuente y se realiza una medición de fondo post-irradiación adquiriendo al menos 100 datos cuyo promedio,  $^{FW}_{fin}I_{fdo}$ , se toma como corriente de fondo final.
8. Se finaliza la adquisición y se despolariza la CI Far West.
9. Se retira la CI FW del lugar de irradiación

Se toma como corriente de fondo,  ${}^{FW}_{\square}I_{fdo}$ , el promedio del fondo inicial y final.

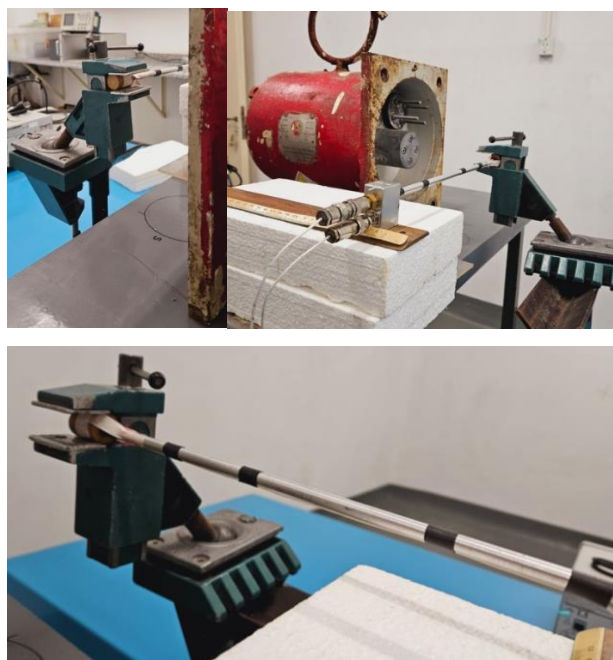
Se toma como corriente neta,  ${}^{FW}_{NET}I_{irr} = {}^{FW}_{TOT}I_{irr} - {}^{FW}_{\square}I_{fdo}$

Dado que la sensibilidad de la CI Far West,  $Sens_{20^{\circ}C\ 101.15\ kPa}^{FW}$ , está referida a 20°C y 101.325 kPa, se corrige la corriente neta multiplicándola por el factor que tiene en cuenta la densidad del aire en cámaras abiertas,  $f_{T,p} = \frac{(273.15+t_{med})}{293.15} \times \frac{101.325}{p_{med}}$

$${}^{FW}_{NET}I_{irr\ corr} = {}^{FW}_{NET}I_{irr} \times f_{T,p}$$

Se determina la tasa de dosis en el punto de medición de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Tasa = \frac{{}^{FW}_{TOT}I_{irr\ corr}}{Sens_{20^{\circ}C\ 101.15\ kPa}^{FW}}$$



**Figura 25** CI Far West alineada con la fuente de Cs.

Se determina la sensibilidad de la CI como el cociente entre su corriente neta y la tasa medida con la CI Far West.

$$Sens_{137-Cs}^{CI} = \frac{I_{irr-NEt}}{Tasa}$$

Se vuelve a colocar la CI en la morsa delante de la fuente de Cs y se monitorea la estabilidad de la señal durante 3 semanas lo cual es una indicación de la estabilidad de la presión. Al no observar modificaciones en la presión de llenado, se puede realizar una calibración en campo gamma puro

en la instalación que cuenta el Centro Regional de Referencia con Patrones Secundarios para Dosimetría (CRRD).

➤ **Medición con la fuente de cesio del búnker CRRD**

Se coloca la CI alineada con la abertura de la fuente de cesio (ver Figura 26) en la posición calibrada, a una distancia de 80 cm.



**Figura 26** CI alineada con la fuente de Cs.

Los pasos para realizar la medición son los siguientes:

1. Se polariza la cámara con 500 V.
2. Se inicia el registro de la corriente medida con un electrómetro utilizando un software de adquisición.
3. Manteniendo la fuente cerrada, se verifica que la corriente de fondo sea estable y se espera hasta adquirir un mínimo de 100 datos cuyo promedio,  $I_{fdo-ini}$ , se toma como corriente de fondo inicial.
4. Se abre la fuente y se adquieren un mínimo de 100 datos bajo irradiación. El promedio de esos datos,  $I_{irr-TOT}$ , es la corriente total durante la irradiación.
5. Se cierra la fuente y se realiza una medición de fondo post-irradiación adquiriendo al menos 100 datos cuyo promedio,  $I_{fdo-fin}$ , se toma como corriente de fondo final.
6. Se repite esta secuencia tres veces.
7. Se finaliza la adquisición y se despolariza la cámara.

Se toma como corriente de fondo de cada una de las tres mediciones,  $I_{fdo}$ , el promedio del fondo inicial y final.

Se toma como corriente neta de cada una de las tres mediciones,  $I_{irr-NET} = I_{irr-TOT} - I_{fdo}$

Se toma como corriente neta final el promedio de las tres corrientes netas:

$$I_{irr-NEC\ CRRD} = \frac{\sum_{n=1}^3 I_{irr-NEC\ n}}{3}$$

Se determina la sensibilidad de la CI como el cociente entre la corriente neta promedio y la tasa en el punto de calibración, informada por el CRRD.

$$Sens_{137-Cs}^{CI} = \frac{I_{irr-NEC\ CRRD}}{Tasa_{Cs\ en\ CRRD}^{a\ 80\ cm}}$$

Con el valor de sensibilidad de la cámara sometida a un campo de radiación gamma puro se puede continuar con la caracterización en la columna térmica del reactor RA-3 donde está disponible una posición de irradiación con campo mixto caracterizado. Por diseño, en dicha posición la componente neutrónica predomina sobre la gamma.

#### IV. Caracterización en campo mixto conocido

Para realizar la caracterización de la CI en un campo mixto conocido se utiliza la facilidad de columna térmica del reactor RA-3, donde se realizan diversas experiencias de caracterización de distintos tipos de detectores. En esta experiencia se obtiene la sensibilidad a neutrones térmicos de la cámara. Para medir el flujo neutrónico durante la experiencia se utiliza un detector autoenergizado de Rh (SPND) de sensibilidad conocida.

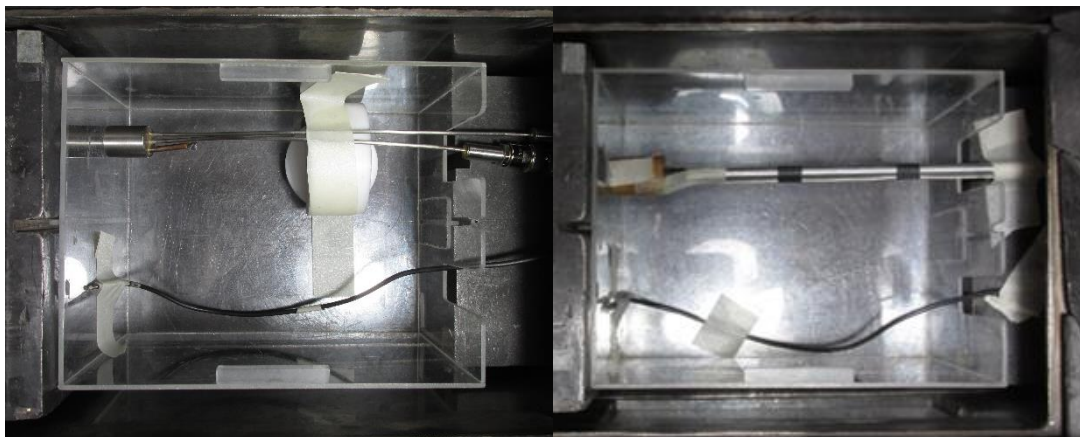
##### ➤ Medición de la CI en el RA-3

Para poder introducir la CI y sus cables de conexión en la columna térmica del RA-3 se realizó una adaptación adicional de conectores BNC a LEMO, como se ve en la Figura 27. Lo que se buscaba con este arreglo era achicar el diámetro de pasaje de los conectores para que se pudieran introducir en el tubo guía de ingreso a la columna térmica.



**Figura 27** CI con adaptación de conector BNC a LEMO.

La cámara y el SPND se ubican de manera tal de reproducir la posición de los detectores que se utilizan para caracterizar la columna térmica durante cada caracterización anual. En dicha configuración se utiliza la CI Far West con blindaje neutrónico (capuchón de carbonato de litio) y un detector autoenergizado de Rh. La comparación de ambas experiencias se puede ver en la Figura 28.



**Figura 28** Disposición de CI con SPND (izquierda) y CI Far West con SPND (derecha).

A continuación, se describen las cadenas de medición (equipos utilizados) para realizar la experiencia en la columna térmica.

Cadena para detector autoenergizado:

- Detector autoenergizado de Rh (SPND) con N° de serie A0:  
Sensibilidad SPND A0 =  $(2.06 \times 10^{-21} \pm 1 \times 10^{-22}) \text{ A/n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Electrómetro Keithley 6514 (RA-3)

Cadena para detector CI:

- Cámara de ionización (CI):  
Sensibilidad =  $(4.94 \times 10^{-11}) \text{ A} / \frac{\text{Gy}}{h}$  (calibrada con  $^{137}\text{Cs}$  en CRRD)
- Electrómetro Keithley 6514 (RA-3)
- Fuente de alta tensión Canberra 3002D +500V

Los pasos para realizar la medición fueron los siguientes:

1. En la FCCT (Facilidad Central de irradiación en Columna Térmica) se enhebran los cables de conexión, se arma la configuración de grafitos correspondiente y se colocan los detectores en su posición de irradiación.
2. Se mide la corriente de fuga inicial de cada detector, siendo:

$$I_{0-SPND} \rightarrow \text{corriente de fondo SPND}$$

$$I_{0-CI} \rightarrow \text{corriente de fondo CI}$$

3. Luego, la bandeja de irradiación donde se ubica la cámara y el SPND, se inserta en la columna térmica hasta una posición separada 70 cm de la posición de máximo acercamiento al núcleo (denominada tope).

4. Se adquieren señales durante 25 min para garantizar que el SPND llegue a su corriente de saturación.

$$I_{irr70-SPND} \rightarrow \text{corriente total SPND}$$

$$I_{irr70-CI} \rightarrow \text{corriente total CI}$$

5. La bandeja se acerca hasta la posición a 50 cm del tope.
6. Se vuelve a adquirir señales durante 25 minutos.

$$I_{irr50-SPND} \rightarrow \text{corriente total SPND}$$

$$I_{irr50-CI} \rightarrow \text{corriente total CI}$$

7. Se retira la bandeja y finaliza la experiencia.

Las corrientes netas se calculan restando las corrientes de fondo del promedio de los valores de corriente total obtenidos en los tres últimos minutos de cada escalón.

$$I_{irr70-SPND NET} = I_{irr70-SPND} - I_{0-SPND}$$

$$I_{irr50-SPND NET} = I_{irr50-SPND} - I_{0-SPND}$$

Utilizando la sensibilidad neutrónica del SPND se calcula el flujo neutrónico.

$$\phi_{n_{th-70}} = \frac{I_{SPND-70 NET}}{\text{Sensibilidad SPND A0}}$$

$$\phi_{n_{th-50}} = \frac{I_{SPND-50 NET}}{\text{Sensibilidad SPND A0}}$$

A partir de la corriente del SPND [5] se obtiene la tasa gamma usando el factor medido en la caracterización 2023 (mediciones históricas permiten inferir la tasa de dosis gamma a partir de la señal de corriente de los SPNDs de rodio debida a los neutrones).

$$\text{Factor tasa gamma} = (2.6 \pm 0.2) \times 10^{11} \frac{\text{Gy h}^{-1}}{\text{A}}$$

$$\text{Tasa gamma}_{70} = I_{SPND-70 NET} \times \text{Factor tasa gamma}$$

$$\text{Tasa gamma}_{50} = I_{SPND-50 NET} \times \text{Factor tasa gamma}$$

Utilizando el factor de calibración gamma de la CI se calcula la corriente esperada por contribución gamma.

$$I_{CI-esperada-70} = \text{Sens}_{137-Cs}^{CI} \times \text{Tasa gamma}_{70}$$

$$I_{CI-esperada-50} = \text{Sens}_{137-Cs}^{CI} \times \text{Tasa gamma}_{50}$$

Se resta esta contribución de la corriente total, para discriminar la que proviene de neutrones.

$$I_{n_{th}70} = I_{NET-CI} - I_{CI-esperada-70}$$

$$I_{n_{th}50} = I_{NET-CI} - I_{CI-esperada-50}$$

Se estima la sensibilidad neutrónica dividiendo la corriente neutrónica por el flujo.

$$Sens_{n_{th}}^{CI-70} = \frac{I_{n_{th}70}}{\phi_{n_{th}-70}}$$

$$Sens_{n_{th}}^{CI-70} = \frac{I_{n50}}{\phi_{n_{th}-50}}$$

## Capítulo 3: Resultados y discusión

### I. Ensayos eléctricos

#### ➤ Ensayo de aislación:

- Aislación electrodo de señal  $> 10^{11}\Omega$ .
- Aislación electrodo de AT  $> 10^{11}\Omega$ .

#### ➤ Ensayo de acople capacitivo

$$\Delta V = 50V \text{ en AT} \Rightarrow \Delta I = 0.15 \times 10^{-9} A \text{ en señal}$$

### II. Caracterización en campo gamma puro

#### ➤ Mediciones en el bunker de IyC (25/08/2023)

CI:

Corriente de fondo:  $I_{fdo} = (0.036 \pm 0.003)pA$

Corriente durante irradiación:  $I_{irr-TOT} = (1.94 \pm 0.02)pA$

Corriente neta:  $I_{irr-NET} = I_{irr-TOT} - I_{fdo}$

$$I_{irr-NET} = (1.94 \pm 0.02)pA$$

CI Far West:

Corriente de fondo:  ${}^{FW}_{\square}I_{fdo} = (0.004 \pm 0.004)pA$

Corriente durante irradiación:  ${}^{FW}_{TOT}I_{irr} = (0.056 \pm 0.003)pA$

Corriente neta:  ${}^{FW}_{NET}I_{irr} = {}^{FW}_{TOT}I_{irr} - {}^{FW}_{\square}I_{fdo}$

$${}^{FW}_{NET}I_{irr} = (0.052 \pm 0.005)pA$$

Parámetros ambientales durante la medición:  $t_{med} = 11.5^{\circ}C$

$$p_{med} = 101.905kPa$$

$$\text{Factor de corrección: } f_{T,p} = \frac{(273.15+t_{med})}{293.15} \times \frac{101.325}{p_{med}}$$

$$f_{T,p} = 0.96547806$$

Corriente neta corregida:  ${}^{FW}_{NET}I_{irr \text{ corr}} = {}^{FW}_{NET}I_{irr} \times f_{T,p}$

$${}_{NET}^{FW}I_{irr\ corr} = (0.050 \pm 0.005)pA$$

Con la sensibilidad de CI Far West:

$$Sens_{20^{\circ}C-101.15kPa}^{FW} = (1.31 \pm 0.07) pA / Gy\ h^{-1},$$

$$\text{La tasa de dosis se calcula como: } Tasa = \frac{{}_{TOT}^{FW}I_{irr\ corr}}{{}_{20^{\circ}C-101.15kPa}^{FW}Sens}$$

$$Tasa = (0.038 \pm 0.004) Gy/h$$

$$\text{La sensibilidad de CI se calcula como: } Sens_{137-Cs}^{CI} = \frac{I_{irr-NEt}}{Tasa}$$

$$Sens_{137-Cs\ IyC}^{CI} = (5.0 \pm 0.6) \times 10^{-11} A / (Gy\ h^{-1})$$

### ➤ **Medición con la fuente de cesio del búnker del CRRD (28/08/2023)**

CI:

Las corrientes de fondo y en los tres ciclos de exposición a la fuente son las siguientes:

Corriente de fondo:  $I_{fdo\ i}$

Corriente durante irradiación:  $I_{irr-TOT\ i}$

Corriente neta:  $I_{irr-NEt\ i} = I_{irr-TOT\ i} - I_{fdo\ i}$

| 1° Medición                             | 2° Medición                        | 3° Medición                        |
|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| $I_{fdo1} = (0.057 \pm 0.008)pA$        | $I_{fdo2} = (0.062 \pm 0.007)pA$   | $I_{fdo3} = (0.065 \pm 0.007)pA$   |
| $I_{irr-TOT1} = (1.33 \pm 0.01)pA$      | $I_{irr-TOT2} = (1.33 \pm 0.01)pA$ | $I_{irr-TOT3} = (1.33 \pm 0.01)pA$ |
| $I_{irr-NEt1} = (1.27 \pm 0.02)pA$      | $I_{irr-NEt1} = (1.26 \pm 0.02)pA$ | $I_{irr-NEt1} = (1.26 \pm 0.02)pA$ |
| $I_{irr-NEt\ CRRD} = (1.27 \pm 0.01)pA$ |                                    |                                    |

**Tabla 2** Corrientes durante medición en CRRD

Tasa en el punto de calibración, informada por el CRRD

$$Tasa_{Cs\ en\ CRRD}^{a\ 80\ cm} = 25.62\ mGy/h$$

$$\text{La sensibilidad de CI se calcula como: } Sens_{137-Cs\ CRRD}^{CI} = \frac{I_{irr-NEt\ CRRD}}{Tasa_{Cs\ en\ CRRD}^{a\ 80\ cm}}$$

$$Sens_{137-Cs\ CRRD}^{CI} = (4.94 \pm 0.05) \times 10^{-11} A / (Gy\ h^{-1})$$

Los valores de sensibilidad obtenidos en el bunker de IyC y en el CRRD no difieren significativamente.

Dado que el CRRD es un laboratorio secundario acreditado, se considera el valor allí obtenido como el válido para este modelo de cámara de ionización.

### III. Caracterización en campo mixto conocido

#### ➤ Medición de la CI en el RA-3 (11/09/2023)

Posición a 70 cm:

**SPND Rh:**

Corriente de fondo:  $I_{0-SPND} = (0.013 \pm 0.003)pA$

Corriente durante irradiación a 70cm:  $I_{irr70-SPND} = (1.612 \pm 0.005)pA$

Corriente neta a 70cm:  $I_{irr70-SPND NET} = (1.600 \pm 0.006)pA$

Se calcula el flujo neutrónico como:  $\phi_{nth-70} = \frac{I_{SPND-70 NET}}{Sensibilidad SPND A0}$

$$\phi_{nth-70} = (7.8 \pm 0.5) \times 10^8 n cm^{-2} s^{-1}$$

La tasa gamma se calcula como:  $Tasa gamma_{70} = I_{SPND-70 NET} \times Factor tasa gamma$

$$Tasa gamma_{70} = (0.42 \pm 0.03) Gyh^{-1}$$

La corriente esperada se calcula como:  $I_{CI-esperada-70} = Sens_{137-CS}^{CI} \times Tasa gamma_{70}$

$$I_{CI-esperada-70} = (21 \pm 2)pA$$

**CI:**

Corriente de fondo:  $I_{0-CI} = (0.055 \pm 0.006)pA$

Corriente durante irradiación a 70cm:  $I_{IRR-CI} = (102.8 \pm 0.3)pA$

Corriente neta a 70cm:  $I_{NET-CI} = (102.8 \pm 0.3)pA$

La corriente neta debido a neutrones:  $I_{nth70} = I_{NET-CI} - I_{CI-esperada} = (82 \pm 2)pA$

Se calcula la sensibilidad como:  $Sens_{nth}^{CI-70} = \frac{I_{nth70}}{\phi_{nth-70}}$

$$Sens_{nth}^{CI-70} = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{-19} \frac{A}{n \text{ cm}^{-2} s^{-1}}$$

Posición a 50 cm:

### SPND Rh

Corriente de fondo:  $I_{0-SPND} = (0.013 \pm 0.003)pA$

Corriente durante irradiación a 50cm:  $I_{irr50-SPND} = (2.944 \pm 0.004)pA$

Corriente neta a 50cm:  $I_{irr50-SPND NET} = (2.932 \pm 0.005)pA$

Se calcula el flujo neutrónico como:  $\phi_{nth-50} = \frac{I_{SPND-50 NET}}{\text{Sensibilidad SPND A0}}$

$$\phi_{nth-50} = (1.4 \pm 0.1) \times 10^9 n \text{ cm}^{-2} s^{-1}$$

La tasa gamma se calcula como:  $Tasa \text{ gamma}_{50} = I_{SPND-50 NET} \times \text{Factor tasa gamma}$

$$Tasa \text{ gamma}_{70} = (0.76 \pm 0.05) Gyh^{-1}$$

La corriente esperada se calcula como:  $I_{CI-esperada-50} = Sens_{137-Cs}^{CI} \times Tasa \text{ gamma}_{50}$

$$I_{CI-esperada-50} = (37 \pm 2)pA$$

### CI:

Corriente de fondo:  $I_{0-CI} = (0.055 \pm 0.006)pA$

Corriente durante irradiación a 50cm:  $I_{IRR-CI} = (187.2 \pm 0.4)pA$

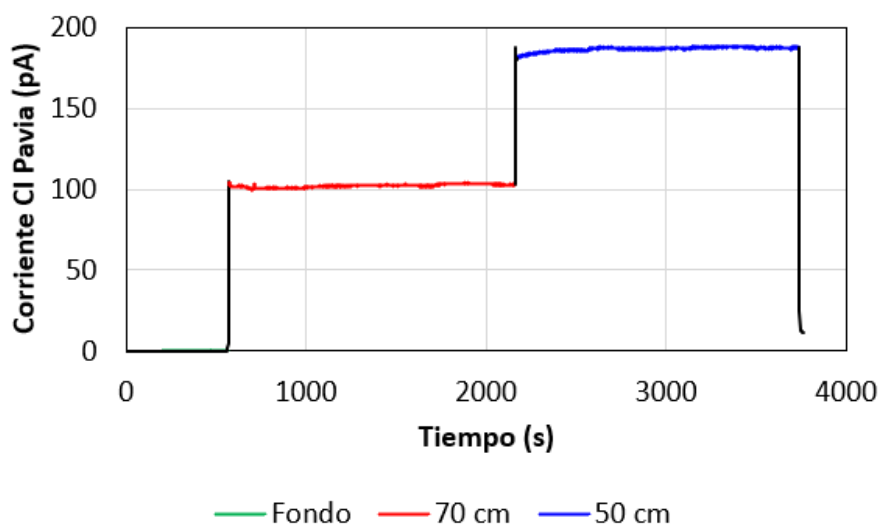
Corriente neta a 50cm:  $I_{NET-CI} = (187.1 \pm 0.4)pA$

La corriente neta debido a neutrones:  $I_{nth50} = I_{NET-CI} - I_{CI-esperada-50} = (150 \pm 3)pA$

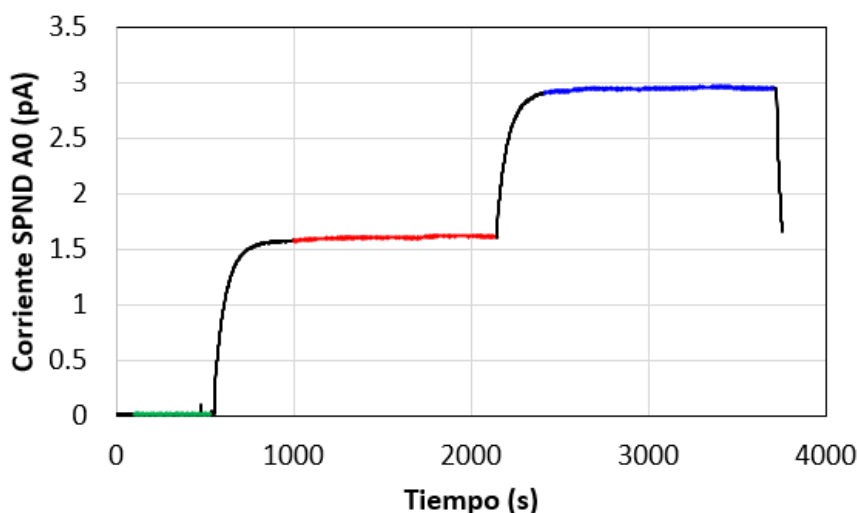
Se calcula la sensibilidad como:  $Sens_{nth}^{CI-50} = \frac{I_{nth50}}{\phi_{nth-50}}$

$$Sens_{nth}^{CI-50} = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{-19} \frac{A}{n \text{ cm}^{-2} s^{-1}}$$

Se grafican a continuación las señales obtenidas durante la experiencia:



**Figura 29** Corriente CI posición 50cm y 70cm.



**Figura 30** Corriente SPND posición 50cm y 70cm.

Se obtuvo el mismo valor de sensibilidad neutrónica,  $(1.1 \pm 0.3) \times 10^{-19} \frac{A}{n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}}$ , en ambas posiciones de irradiación para la cámara presurizada con 10.68 atm abs de  $\text{CO}_2$ .

#### **IV. Estimación del peso de las señales debidas a fotones y neutrones en el núcleo del RA-3**

Con los valores de sensibilidades obtenidos, es posible estimar el peso relativo de las señales gamma y neutrónica de la CI en un campo mixto y establecer posibles rangos de uso de acuerdo con el grado de interferencia que se admita. Este primer análisis alcanza a la comparación entre el porcentaje de señal debido al flujo neutrónico térmico y rápido y el debido al flujo gamma. Dado que las capturas neutrónicas en el rango epitérmico caen muy fuertemente a medida que aumenta la energía (idealmente el flujo epitérmico  $\propto 1/E$  [6] y la sección eficaz de los elementos

constructivos  $\propto 1/v$  [7]), se asume como hipótesis simplificadora que los neutrones del rango epitérmico producen una señal suficientemente baja como para ser considerada despreciable. En particular, para neutrones de 1keV los cálculos presentados en [2] y que se transcriben en la Tabla 3 muestran este comportamiento. Sin embargo, faltarían cálculos adicionales en el rango de 0,1eV a 1keV para terminar de confirmar esta hipótesis.

En un campo mixto de valores:

$\dot{D}_\gamma = \text{tasa de dosis gamma}$

$\Phi_{th} = \text{flujo térmico}$

$\Phi_r = \text{flujo rápido}$

La corriente total medida por la CI será:

$$I_{total}^{CI} = I_\gamma^{CI} + I_{n_{th}}^{CI} + I_{n_r}^{CI}$$

Que en función de las sensibilidades y los flujos queda:

$$I_{total}^{CI} = Sens_\gamma^{CI} \times \dot{D}_\gamma + Sens_{n_{th}}^{CI} \times \Phi_{th} + Sens_{n_r}^{CI} \times \Phi_r$$

La información de flujo neutrónico térmico, epitérmico y rápido y tasa de dosis gamma en distintas posiciones del núcleo del reactor RA-3 se obtiene de un trabajo de cálculo interno [8]. El modelo para cálculo con MCNP6 utilizado no consideró evolución por quemado. Como resultado, se generó el valor promedio de los flujos neutrónico y de fotones en cada uno de los cubos de 4 cm de lado en los que se discretizó todo el volumen del núcleo para el cálculo. Se asignó el valor promedio al centro de cada cubo. Tanto para neutrones como para fotones, el modelo consideró tres grupos de energía, los neutrones se agruparon en energías menores que 0.1eV (térmicos), entre 0.1 eV y 1MeV (epitérmicos) y entre 1 MeV y 17 MeV (rápidos) y los fotones se agruparon en energías menores que 0.1 MeV, entre 0.1 MeV y 1 MeV y entre 1 MeV y 17 MeV.

Un extracto del trabajo se adjunta como Anexo I, donde se consideraron los perfiles del cociente fotón/neutrón, obtenidos a partir de los resultados de simulación. En dicho trabajo, los cocientes se calcularon como flujo de fotones sobre flujo de neutrones por lo que no se dispone de información de dosis gamma.

Para hacer una estimación de la sensibilidad de la cámara por unidad de flujo de fotones se considera la calibración realizada en el CRRD y se estima el flujo de fotones que llegaban a la posición de calibración usando la constante de kerma en aire [9]. El valor de esta constante para

el  $^{137}\text{Cs}$  es  $76.16 \text{ m}^2\mu\text{Gy/h/GBq}$ , y debe interpretarse como la tasa de dosis generada por una fuente de  $1\text{GBq}$  a una distancia de  $1\text{m}$  de la misma.

Se puede calcular el flujo de fotones ( $\text{fotones s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) que genera esa tasa de dosis como:

$$Flujo_{\gamma} = \frac{(1 \times 10^9) \times 0.851}{4 \times \pi \times 100^2} \text{ fotón s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

$$Flujo_{\gamma(1m)} = 6772.04 \text{ fotón s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

Siendo el factor  $0.851$  la probabilidad de emisiones de fotones por cada decaimiento del  $^{137}\text{Cs}$ .

De esta forma para el  $^{137}\text{Cs}$  se obtiene una relación  $R$  de  $Flujo_{\gamma} / \text{Tasa de dosis}$ :

$$R = \frac{6772.04 \text{ fotón s}^{-1} \text{ cm}^{-2}}{76.16 \frac{\mu\text{Gy}}{\text{h}}} = 88,92 \frac{\text{fotón s}^{-1} \text{ cm}^{-2}}{\frac{\mu\text{Gy}}{\text{h}}}$$

Para el caso particular del punto de calibración en el CRRD se tiene una tasa de dosis de  $2,56 \times 10^4 \mu\text{Gy/h}$ , con lo que el flujo de fotones correspondiente en este punto es:

$$Flujo_{\gamma(CRRD)} = 2,28 \times 10^6 \text{ fotón s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

De esta manera se obtiene una sensibilidad en función del flujo de fotones de:

$$Sens\ coef_{^{137}\text{Cs CRRD}}^{CI} \approx 5.56 \times 10^{-19} \text{ A} / (\text{fotón s}^{-1} \text{ cm}^{-2})$$

Con este valor de sensibilidad en función del flujo de fotones se puede escribir la corriente total medida por la CI como:

$$I_{total}^{CI} = Sens\ coef_{\gamma}^{CI} \times Flujo_{\gamma} + Sens_{n_{th}}^{CI} \times \Phi_{th} + Sens_{n_r}^{CI} \times \Phi_r$$

Se puede calcular cuál es el porcentaje  $p_{th}$  de aporte correspondiente a la componente neutrónica térmica respecto a la componente gamma de la siguiente manera:

$$p_{th} = \frac{I_{n_{th}}}{I_{\gamma}} \times 100$$

Que en función de las sensibilidades y los flujos queda:

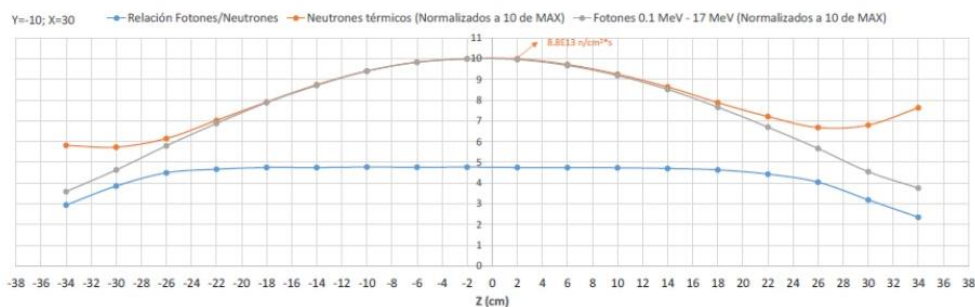
$$p_{th} = \frac{Sens_{n_{th}}^{CI} \times \Phi_{th}}{Sens\ coef_{\gamma}^{CI} \times Flujo_{\gamma}} \times 100$$

Reemplazando las sensibilidades obtenidas:

$$p_{th} = 19.78 \times \frac{\Phi_{th}}{Flujo_{\gamma}} [\%]$$

Debe tenerse en cuenta que este es un cálculo muy aproximado, ya que utiliza coeficientes específicos para la radiación del  $^{137}\text{Cs}$  en aire, cuando en realidad el reactor presenta un espectro de fotones en un rango amplio de energías.

Dado que el uso de la CI tiene como objetivo medir perfiles gamma a lo largo del núcleo, se estimará la contribución neutrónica a lo largo de un perfil vertical en una posición del núcleo libre de elementos combustibles de forma tal de permitir el ingreso de la cámara. En el Anexo I se observa que esta condición es satisfecha por la posición de irradiación I6. Para la mencionada posición en la Figura 31 se grafican los perfiles de flujo de fotones y flujo de neutrones térmicos normalizados a 10 y el cociente entre ambos a lo largo de toda la longitud del núcleo (aproximadamente 80cm).



**Figura 31** Perfiles normalizados del flujo neutrónico térmico y de fotones (E mayor que 100KeV) y perfil sin normalizar del cociente fotón/neutrón, a lo largo de la dirección Z (fila 6). Posición de irradiación I6.

En esta figura se observa que el cociente entre el flujo de fotones y neutrones varía desde 3 hasta 5, de modo que utilizando la ecuación:

$$p_{th} = 19.78 \times \frac{\Phi_{th}}{Flujo_{\gamma}} [\%]$$

es posible determinar el peso relativo de la componente neutrónica térmica sobre la fotónica como sigue:

$$\frac{\Phi_{th}}{Flujo_{\gamma}} = \frac{1}{3} \Rightarrow p_{th} = 6.59\%$$

$$\frac{\Phi_{th}}{Flujo_{\gamma}} = \frac{1}{5} \Rightarrow p_{th} = 3.96\%$$

Para esta posición de irradiación se obtiene que el peso de la señal neutrónica térmica sobre la señal gamma de la cámara varía de un 4% al 6,6%.

Teniendo en cuenta todas las otras posiciones analizadas en el trabajo del Anexo I, se ve que los cocientes varían desde un mínimo de 2 a un máximo de 15, por lo que,  $p_{th}$  está en un rango de 1,5% y 10%.

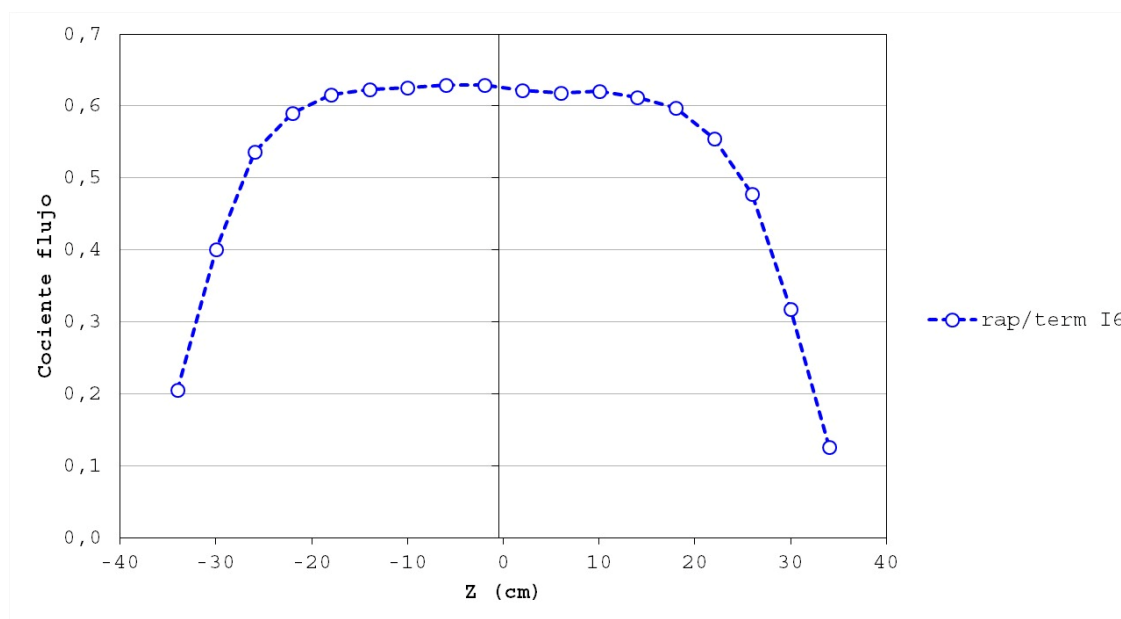
Con respecto a la estimación del peso de la señal debida a los neutrones rápidos, no se dispone en la actualidad de una facilidad caracterizada adecuadamente como la disponible para neutrones térmicos. Como alternativa se consideran los valores de las corrientes esperadas para neutrones monoenergéticos de distintas energías extraídos de la referencia [2], que se muestran en la Tabla 3 como valores relativos a la corriente asociada a neutrones térmicos:

| E (MeV)             | 2.50E-08 | 1.00E-03 | 0.5   | 1    | 1.5  | 2    | 5    | 7    | 10   |
|---------------------|----------|----------|-------|------|------|------|------|------|------|
| I / I <sub>th</sub> | 1.00     | 0.007    | 0.002 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.38 | 0.65 | 0.86 |

**Tabla 3** Peso de señal para neutrones monoenergéticos para distintas energías, normalizado a neutrones térmicos.

El caso más desfavorable sería para los neutrones rápidos de mayor energía (10 MeV). En ese caso, los neutrones rápidos contribuirían con un 86% de la corriente que generaría el mismo flujo, pero de neutrones térmicos.

Por otro lado, en la Figura 32 se ve el cociente entre el perfil de flujo de neutrones rápidos y el flujo de neutrones térmicos a lo largo de la posición I6. Estos cálculos se realizaron simultáneamente con los de la referencia [5] aunque no se muestran en el Anexo I.



**Figura 32** Cociente entre el perfil de flujo de neutrones rápidos y el flujo de neutrones térmicos a lo largo de la posición I6.

De esta forma se puede hacer una estimación conservativa suponiendo que todos los neutrones rápidos tienen una energía de 10MeV y que la relación entre el flujo de neutrones rápidos y flujo de neutrones térmicos es 0.63, correspondiente al máximo de la Figura 32.

A partir de los extremos del peso relativo de la componente neutrónica térmica sobre la fotónica se calcula el peso relativo de la componente neutrónica rápida como:

$$p_r = 3.96 \times 0.86 \times 0.63 \Rightarrow p_r = 2.14\%$$

$$p_r = 6.59 \times 0.86 \times 0.63 \Rightarrow p_r = 3.57\%$$

Para esta posición de irradiación se obtiene que el peso de la señal neutrónica rápida sobre la señal gamma de la cámara varía entre 2.1% y 3.6%.

Para obtener el peso total de la señal neutrónica se suma el aporte térmico más el rápido y se obtienen valores entre un rango de 6.1% y 10.1%. Dado que la estimación se realizó en forma conservativa en cualquier caso el aporte a la señal proveniente de los neutrones sería inferior al 10%, lo que permite considerar a esta cámara como un instrumento adecuado para medir tasa de dosis gamma en las condiciones descriptas, ya que más del 90% de la señal sería debida a componente gamma. Para mejorar la estimación del peso de la señal neutrónica, a futuro deberá contemplarse realizar un cálculo de Montecarlo con los espectros de fotones y neutrones a lo largo de la zona donde se pretende medir el perfil gamma. En esta misma línea de cálculos se podrá estimar la contribución de los neutrones epitérmicos a la señal para evaluar la validez de la hipótesis asumida en este análisis.

## Capítulo 4: Conclusiones

Se pudo cumplir con el objetivo de diseñar y construir un detector de radiación gamma de tamaño compacto y de alta resistencia a la radiación.

Se pudo caracterizar el detector en un campo gamma puro y en un campo mixto con flujo de neutrones térmicos y tasa de dosis gamma conocidos. Esta caracterización permitió obtener la sensibilidad a flujo gamma y a flujo de neutrones térmicos.

Con las dos sensibilidades obtenidas, ciertas consideraciones sobre los neutrones rápidos basadas en un trabajo previo de cálculo sobre este detector y cálculos de los flujos dentro del núcleo del RA-3, también realizados con anterioridad, se pudo estimar, en forma conservativa, que la señal debido al flujo de fotones supera el 90% de la señal total en la posición de irradiación I6. Es decir que para la posición evaluada se puede considerar a la cámara como un instrumento adecuado para medir tasa de dosis gamma en presencia de un campo neutrónico intenso.

Como trabajo a futuro se puede mejorar la estimación del peso de la señal neutrónica realizando un cálculo de Montercarlo con los espectros de fotones y neutrones a lo largo de la zona donde se pretende medir el perfil gamma. En esta misma línea de cálculos se podrá estimar la contribución de los neutrones epitérmicos a la señal para evaluar la validez de la hipótesis asumida en este trabajo.

## Bibliografía

- [1] Applied Nuclear Energy Laboratory- The reactor Triga Mark I- University of Pavía-  
<https://lena.unipv.it/en/the-reactor/>
- [2] Alice Cimino, “Monte carlo study of an-ion chamber sensitivity in a nuclear reactor n-  $\gamma$  field”  
Tesi per la Laurea Magistrale in scienze fisiche. Universidad de Pavía (2019).
- [3] <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
- [4] [https://www.fwt.com/detector/prod\\_det.htm](https://www.fwt.com/detector/prod_det.htm)
- [5] PPD-06Y-438 “Ensayos de calibración de detectores autoenergizados de uso en la columna  
térmica del RA-3” (protocolo de ensayo del sistema de gestión de la calidad de IyC).
- [6] K. H Beckurts, K. Wirtz-Neutron physics (1964).
- [7] <https://t2.lanl.gov/nis/data/endl/endlvii.1-n.html>
- [8] Manuel Szejnberg comunicación privada.
- [9] Seltzer, S. (2004), Air-kerma rate coefficients for selected photon-emitting radionuclide  
sources: National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD,  
<https://doi.org/10.6028/NIST.IR.7092A>)

## Anexo I

### Simulación de cocientes flujo fotones / flujo neutrónico en núcleo del RA-3 (Manuel Szejnberg)

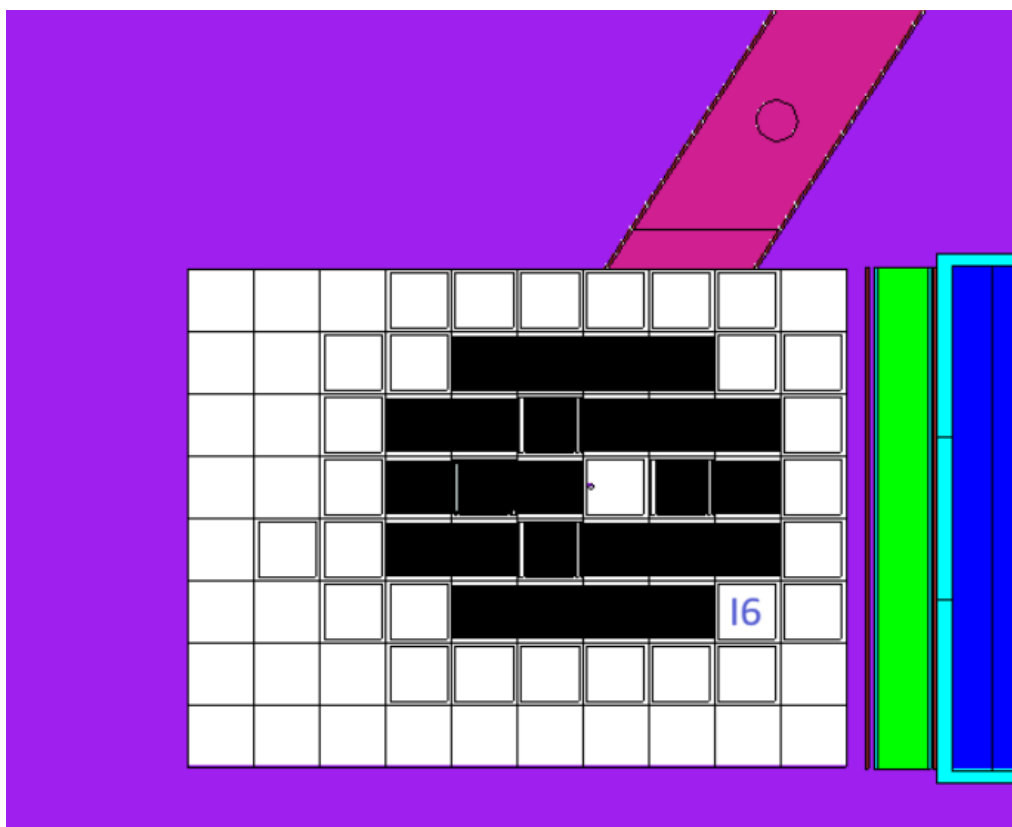
Los cálculos de flujo gamma y flujo neutrónico en el núcleo del reactor RA-3 fueron realizados por Manuel Szejnberg, utilizando el programa MCNP6. Para los cálculos se utilizó el modelo del núcleo del RA-3 (2022) y que tiene detalles a nivel de placa. Se modeló en forma estática (sin considerar evolución por quemado) y en estado cuasi-crítico. Para obtener los valores se superpuso en todo el volumen del núcleo una malla que estaba discretizada en cubos de 4 cm de lado. Se calculó el valor promedio de los flujos neutrónico y de fotones en cada uno de estos cubos, y se asignó el valor promedio al centro de cada cubo.

Con respecto a los tres grupos de energía, en ambas simulaciones los neutrones se agruparon en energías menores que 0.1 eV (térmicos), entre 0.1 eV y 1MeV (epitérmicos) y entre 1 MeV y 17 MeV (rápidos) y los fotones se agruparon en energías menores que 0.1 MeV, entre 0.1 MeV y 1 MeV y entre 1 MeV y 17 MeV.

Para la comparación de posición se tomó como parámetro el cociente entre el flujo gamma con energías mayores a 100 KeV y el flujo térmico. A partir de los datos de los cálculos mencionados, se obtuvieron estos cocientes y se pudieron graficar perfiles a lo largo de diferentes direcciones en los núcleos del RA-3. Estos perfiles fueron realizados por Silvia Thorp y Matías Valero.

En este anexo no se presentan los resultados de la distribución de flujos neutrónicos y de fotones en el RA-3 en los diferentes cubos de la malla de medición. Sí se presentan varios perfiles de los cocientes fotón/neutrón obtenidos a lo largo de diferentes direcciones en el núcleo.

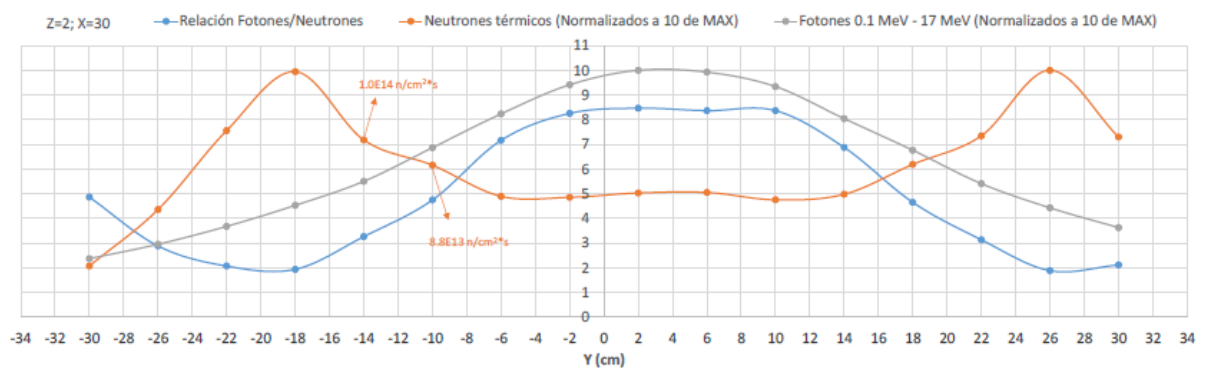
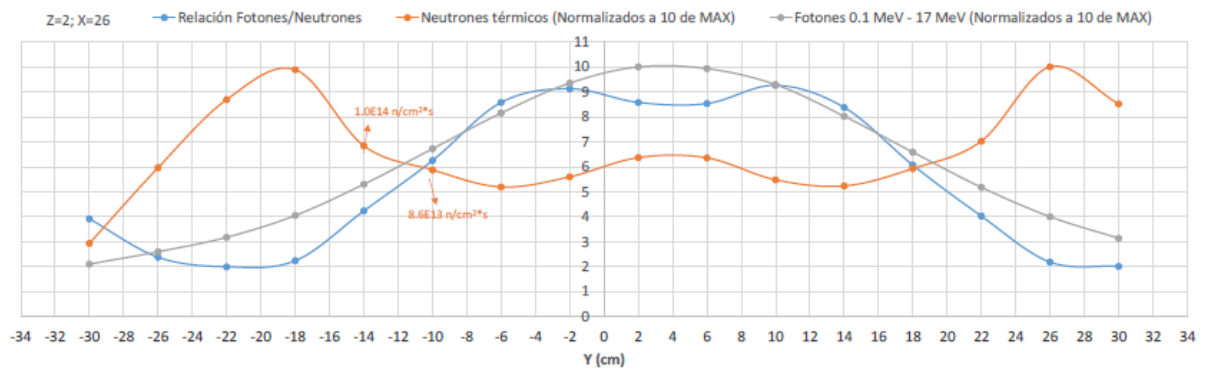
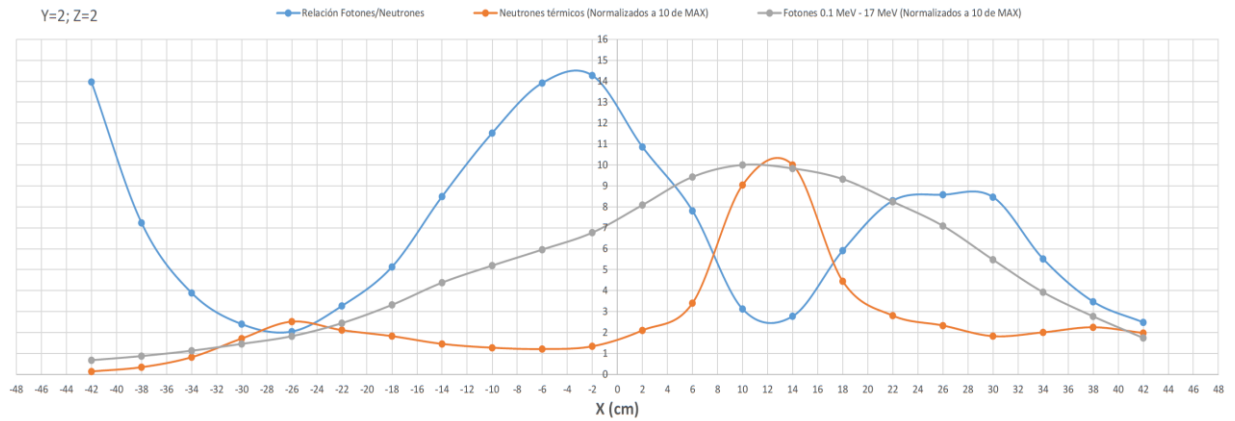
Para poder entender los perfiles del cociente fotón/neutrón y su ubicación en el núcleo es necesario describir en forma sintética algunos aspectos del núcleo del RA-3. La figura de abajo muestra un corte de la grilla del núcleo modelado.

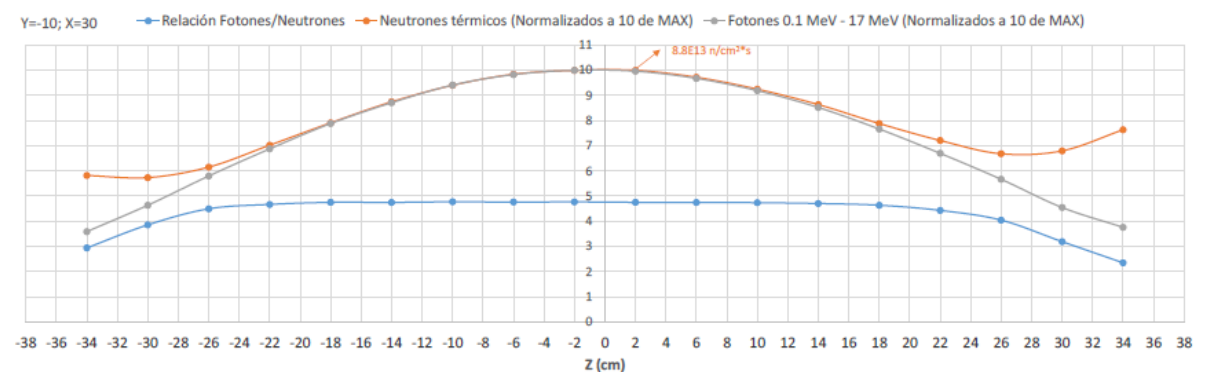
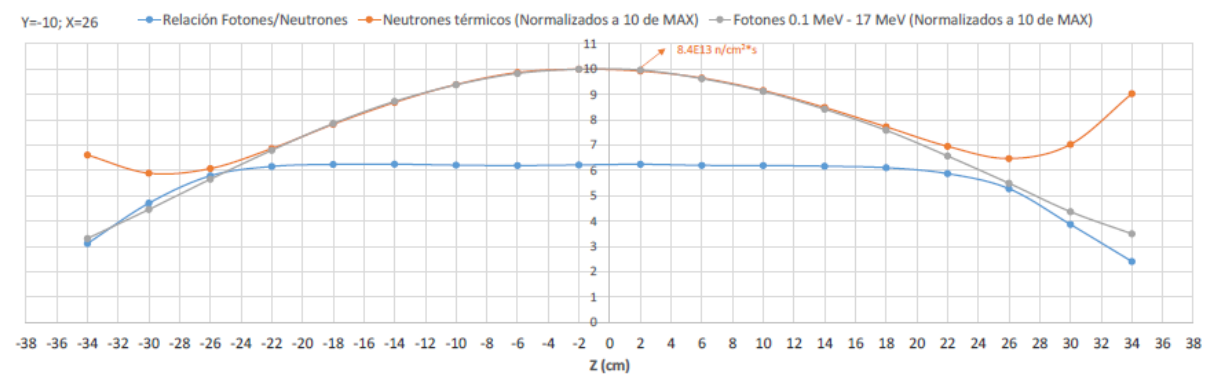
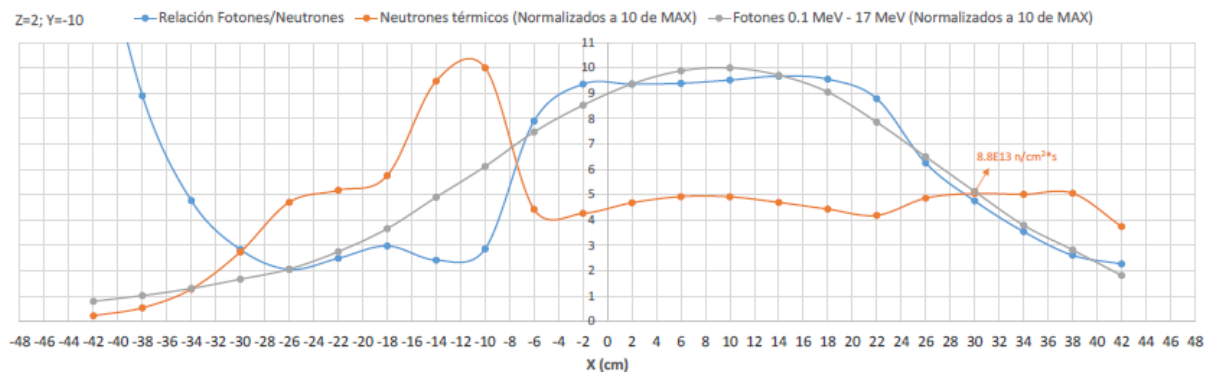
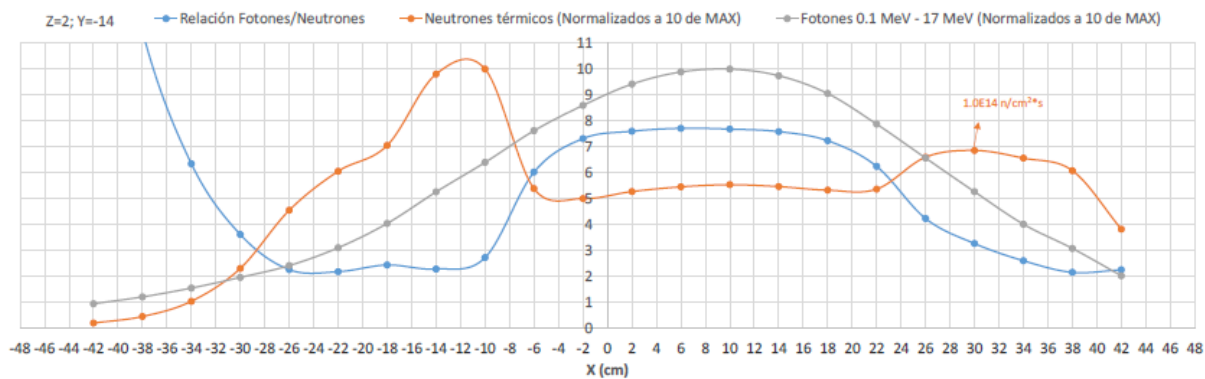


Esquema de un corte horizontal de la grilla del núcleo del RA-3

El núcleo posee una grilla de 10x8 rectángulos. Las columnas que forman estos rectángulos se identifican de izquierda a derecha con las letras de A a J (total 10 letras), en tanto que las filas se identifican de arriba hacia abajo con los números del 1 al 8. De acuerdo con la vista de la figura de arriba, cada rectángulo posee un ancho de 8.1 cm y un alto de 7.7 cm. Cada rectángulo puede tener un elemento combustible, un reflector de grafito o estar vacío como posición de irradiación. Los rectángulos en negro poseen elementos combustibles, la mayoría de los rectángulos en blanco con borde ancho poseen grafito reflector (rodean a los elementos combustibles) y las siguientes posiciones en blanco con borde grueso se encuentran vacías para su uso como posición de irradiación: I2, I6, B5, D6, G8 y G4 (esta última posición está rodeada de elementos combustibles, es la de máximo flujo neutrónico térmico y se utiliza para la irradiación del molibdeno). Para tener una mejor claridad de la ubicación del esquema del núcleo dentro de la piletta del reactor se presenta la columna térmica, a la derecha de la grilla en verde y azul, y el haz para el prompt-gamma, arriba, en rosa oscuro y con cierto ángulo con respecto a la grilla.

A continuación, se muestran distintos gráficos donde se obtuvieron los perfiles de cociente fotón-neutrón en distintas posiciones del núcleo.





## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> Diseño de la CI .....                                                                                                                                                                                             | 6  |
| <b>Figura 2</b> Detalle de la tapa de la cámara. ....                                                                                                                                                                             | 7  |
| <b>Figura 3</b> Tapa soldada con cables minerales y tubo de cobre. ....                                                                                                                                                           | 8  |
| <b>Figura 4</b> Cable mineral central sin vaina exterior .....                                                                                                                                                                    | 8  |
| <b>Figura 5</b> Anillo central .....                                                                                                                                                                                              | 9  |
| <b>Figura 6</b> Conjunto obtenido en pasos 3, 4 y 5.....                                                                                                                                                                          | 10 |
| <b>Figura 7</b> Cerámica aislante central.....                                                                                                                                                                                    | 11 |
| <b>Figura 8</b> Electrodo de señal montado.....                                                                                                                                                                                   | 11 |
| <b>Figura 9</b> Cerámica aislante de AT.....                                                                                                                                                                                      | 12 |
| <b>Figura 10</b> Electrodo superior de AT.....                                                                                                                                                                                    | 12 |
| <b>Figura 11</b> Electrodo superior de AT con cable de Cu soldado.....                                                                                                                                                            | 13 |
| <b>Figura 12</b> Electrodo inferior de AT.....                                                                                                                                                                                    | 14 |
| <b>Figura 13</b> Cerámica inferior aislante.....                                                                                                                                                                                  | 14 |
| <b>Figura 14</b> Carcasa exterior en posición.....                                                                                                                                                                                | 14 |
| <b>Figura 15</b> Cierre estanco superior con conector BNC.....                                                                                                                                                                    | 16 |
| <b>Figura 16</b> Cierre estanco en máquina de vacío. ....                                                                                                                                                                         | 17 |
| <b>Figura 17</b> Cierre estanco en máquina de vacío-1. ....                                                                                                                                                                       | 17 |
| <b>Figura 18</b> Cierre estanco con conector BNC.....                                                                                                                                                                             | 18 |
| <b>Figura 19</b> Electrómetro analógico.....                                                                                                                                                                                      | 18 |
| <b>Figura 20</b> Sistema para hacer vacío. ....                                                                                                                                                                                   | 19 |
| <b>Figura 21</b> Sistema de vaciado y llenado.....                                                                                                                                                                                | 19 |
| <b>Figura 22</b> Prensa hidráulica.....                                                                                                                                                                                           | 20 |
| <b>Figura 23</b> Tubo de cobre prensado y estañado.....                                                                                                                                                                           | 20 |
| <b>Figura 24</b> Cámara alineada con la fuente de Cs.....                                                                                                                                                                         | 22 |
| <b>Figura 25</b> CI Far West alineada con la fuente de Cs.....                                                                                                                                                                    | 23 |
| <b>Figura 26</b> CI alineada con la fuente de Cs .....                                                                                                                                                                            | 24 |
| <b>Figura 27</b> CI con adaptación de conector BNC a LEMO.....                                                                                                                                                                    | 25 |
| <b>Figura 28</b> Disposición de CI con SPND (izquierda) y CI Far West con SPND (derecha.).....                                                                                                                                    | 26 |
| <b>Figura 29</b> Corriente CI posición 50cm y 70cm .....                                                                                                                                                                          | 33 |
| <b>Figura 30</b> Corriente SPND posición 50cm y 70cm.....                                                                                                                                                                         | 33 |
| <b>Figura 31</b> Perfiles normalizados del flujo neutrónico térmico y de fotones (E mayor que 100KeV) y perfil sin normalizar del cociente fotón/neutrón, a lo largo de la dirección Z (fila 6). Posición de irradiación I6. .... | 36 |
| <b>Figura 32</b> Cociente entre el perfil de flujo de neutrones rápidos y el flujo de neutrones térmicos a lo largo de la posición I6 .....                                                                                       | 37 |

## Agradecimientos

En este punto, quiero dedicar unas palabras de agradecimiento a todas las personas que hicieron posible este trabajo.

En primer lugar, un agradecimiento a mi director, Marcelo Miller, cuyo apoyo y orientación fueron fundamentales para este proyecto. Aprecio especialmente su insistencia en que terminara el trabajo.

A Silvia Thorp, gracias por su disponibilidad constante para las explicaciones que necesitaba y, sobre todo, por realizar las mediciones necesarias de la cámara.

Mi agradecimiento a Claudio Sambarino y Hernán Rodríguez por su valiosa e indispensable ayuda en la construcción de la cámara.

A Manuel Szejnberg, gracias por estar siempre dispuesto a proporcionar los datos necesarios.

Gracias a Gustavo Montaña del CRRD por permitir usar la facilidad para la calibración de la cámara.

También es importante agradecer al personal del RA-3 por estar siempre disponible para realizar la experiencia en la columna térmica, en especial a Paula Curotto.

Agradezco al IDB por su paciencia durante la conclusión del trabajo y pido disculpas por los retrasos.

Finalmente, un agradecimiento muy especial a mi esposa Sofia y mi familia, cuyo apoyo incondicional fue fundamental para la conclusión de este trabajo.