



***“Estimación de reactividad para distintos materiales a lo largo  
de una facilidad de irradiación del reactor RA-1”***

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

Alumno:  
Director:  
Co-director

**Roberto Pereira  
Pablo Armando Bellino  
Claudia Barberis**

Noviembre de 2015



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN



Dan Beninson

Instituto de Tecnología Nuclear

## AGRADECIMIENTOS

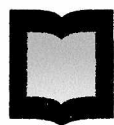
*A Pablito Bellino, mi Director que además de ser un brillante profesional es una excelente persona.*

*A Jorge Castillo por toda la colaboración recibida.*

*Al grupo de operación del Reactor RA-1, Fabi, Willy, Martín y Ezequiel por su ayuda y paciencia.*

*A mi compañera de vida Claudia.*

*A mi querida familia...*



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## INDICE

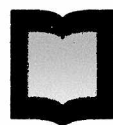
Resumen.....	5
Capitulo 1 .....	6
1.    Introducción .....	6
a.    Descripción general del Reactor RA-1 .....	8
Capítulo 2 .....	12
1.    Fundamento teórico del método .....	12
1.1. Reactor tipo slab homogéneo y desnudo .....	15
1.2. Reactor tipo slab homogéneo reflejado.....	17
Capitulo 3 .....	19
1.    Descripción del sistema de medición.....	19
2.    Ubicación y características de las muestras .....	22
3.    Operación del reactor durante la experiencia .....	26
1.    Procedimiento para el cadmio .....	28
2.    Procedimiento para el grafito .....	32
Capitulo 4 .....	35
1.    Procesamiento de datos.....	35
2.    Resultados.....	38
1.    Reactividades estimadas para la muestra de cadmio .....	38
2.    Reactividades estimadas para la muestra de cadmio .....	40



Dan Beninson

Instituto de Tecnología Nuclear

3. Trabajo a futuro.....	42
Conclusiones .....	43
Referencias .....	44
Anexo A.....	45
1. Facilidades de irradiación del Reactor RA-1.....	45
2. Control del Reactor .....	47
3. Sistema de Refrigeración.....	48



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## Resumen

Frecuentemente en un reactor nuclear de investigación de baja potencia, tal como lo es el RA-1, es necesario introducir muestras de materiales de distinto tipo. Dichas muestras generan un cambio en reactividad en el núcleo debido a la variación que producen en las propiedades neutrónicas del sistema. Es sabido que la misma muestra tendrá un valor distinto dependiendo de la posición en donde sea introducida. En el presente trabajo se realiza un análisis sistemático del valor de reactividad producido por una muestra de cadmio y otra de grafito al ser introducidas en distintas posiciones de una facilidad de irradiación del reactor. Las mediciones fueron realizadas con un reactímetro digital asociado a una cámara de ionización compensada. Una de las muestras consistió en un material absorbente de neutrones térmicos (cadmio) y la otra un elemento con alta sección eficaz de dispersión (grafito). Los perfiles de reactividad a lo largo del canal de irradiación fueron los predichos por un modelo sencillo realizado a un grupo de energías. Para el material absorbente, el máximo valor negativo de reactividad se obtuvo en el plano central del núcleo. El material dispersor, en cambio, introdujo una reactividad positiva con un máximo a una distancia de 15 cm del plano medio del núcleo.

# Capítulo 1

## 1. Introducción

La inserción de muestras en las facilidades de irradiación en un reactor de investigación es una práctica habitual y necesaria. Esto se hace por diversos motivos, desde la determinación de los constituyentes de una muestra (análisis por activación neutrónica) hasta la utilización de la muestra como método de medición de flujo neutrónico (método de activación de hojuelas), pasando también por el estudio del daño por radiación que sufre el material estudiado. Todos los casos anteriores tienen en común el hecho de que una muestra, muchas veces con características desconocidas, es introducida dentro del reactor. Es de gran importancia, entonces, saber cómo se modifican las propiedades neutrónicas del reactor con la presencia de este elemento. En particular, en el presente trabajo se estudiará uno de los parámetros más relevantes a nivel operacional que tiene un reactor nuclear, que es su reactividad. Sistemáticamente se pondrán muestras de distinto material en distintas posiciones del reactor y se estimarán los valores de reactividad que agrega o quita la muestra estudiada.

Es sabido que los cambios en reactividad no sólo dependerán del material, sino también del lugar geométrico en donde se introduzca la muestra. Por este motivo, en el presente trabajo se realizó un estudio sistemático de este efecto, posicionando la muestra en distintas posiciones a lo largo de un canal de irradiación del reactor RA-1.

Para realizar un estudio detallado de estos efectos, es preciso conocer tanto el flujo neutrónico en todo punto del reactor, como así también el flujo adjunto (también denominado función importancia del reactor). Un estudio teórico de



tales características superaría el alcance del presente trabajo, y no será tenido en cuenta. Sin embargo es posible realizar un análisis cualitativo trabajando a un grupo de energías, ya que en tal caso el flujo y el flujo adjunto son equivalentes. Con esto en mente, se realizó un sencillo análisis cualitativo de un reactor homogéneo, tanto desnudo como reflejado, y se encontraron resultados suficientes como para explicar los resultados obtenidos de las mediciones.

Las mediciones de reactividad fueron realizadas con un reactímetro digital asociado a una cámara de ionización neutrónica. Las muestras utilizadas fueron de cadmio y de grafito, siendo la principal característica de la primera su gran poder de absorción de neutrones térmicos, mientras que el grafito se caracteriza por su alta sección eficaz de dispersión. Con esta elección de materiales se buscó analizar por separado ambos efectos y observar la respuesta del reactor a cambios en sólo una de sus propiedades a la vez.

A continuación se realizará una descripción sobre las características más importantes del reactor RA-1. En el Capítulo 2 se realizará un análisis teórico simplificado para comprender los resultados que se esperan obtener. Luego, en el Capítulo 3 se explicará el método de medición y los distintos pasos realizados para la obtención de las reactividades de ambas muestras. En el Capítulo 4 se indicarán los resultados obtenidos para cada muestra a lo largo de todas las posiciones medidas, y finalmente se cierra el trabajo con las conclusiones y discusiones sobre lo realizado.

### a. Descripción general del Reactor RA-1

El Reactor RA-1 es de construcción enteramente nacional, y se encuentra ubicado en el Centro Atómico Constituyentes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (ver Figuras 1 y 2).



Figura 1: Reactor RA-1

Fue puesto a crítico en 1958 y a la fecha sigue operativo prestando entre otros, los siguientes servicios:

- Ensayos experimentales e irradiación de muestras para mediciones de parámetros nucleares.
- Irradiación de células en cultivos y hámster para estudios de terapia por captura neutrónica en Boro (BNCT).

- Irradiaciones de muestras para determinar el daño por radiación en metales, celdas solares, cables, fibra óptica, gomas, etc.
- Irradiación de cabellos y sangre para aplicaciones médicas.
- Irradiaciones diversas para determinar contenidos de impurezas en materiales y alimentos, por medio del análisis por activación.
- Actividades docentes: perfeccionamiento de profesionales y técnicos.
- Actividades de divulgación: a estudiantes universitarios, terciarios y secundarios que visitan el Reactor.



Figura 2: Boca de tanque del reactor RA-1

El Reactor tiene actualmente una potencia autorizada de 40 KW térmicos, es del tipo tanque abierto, con núcleo de uranio enriquecido al 20 % en U235, y está reflejado con grafito. El moderador y refrigerante es agua liviana desmineralizada.

Los Elementos Combustibles son barras cilíndricas formadas por una mezcla de dióxido de uranio (UO<sub>2</sub>) y Carbono envainado en tubos de Aluminio.

El núcleo está constituido por elementos combustibles distribuidos en anillos concéntricos, o coronas, y alojados en una grilla de aluminio, formando una geometría anular (Figura 3).

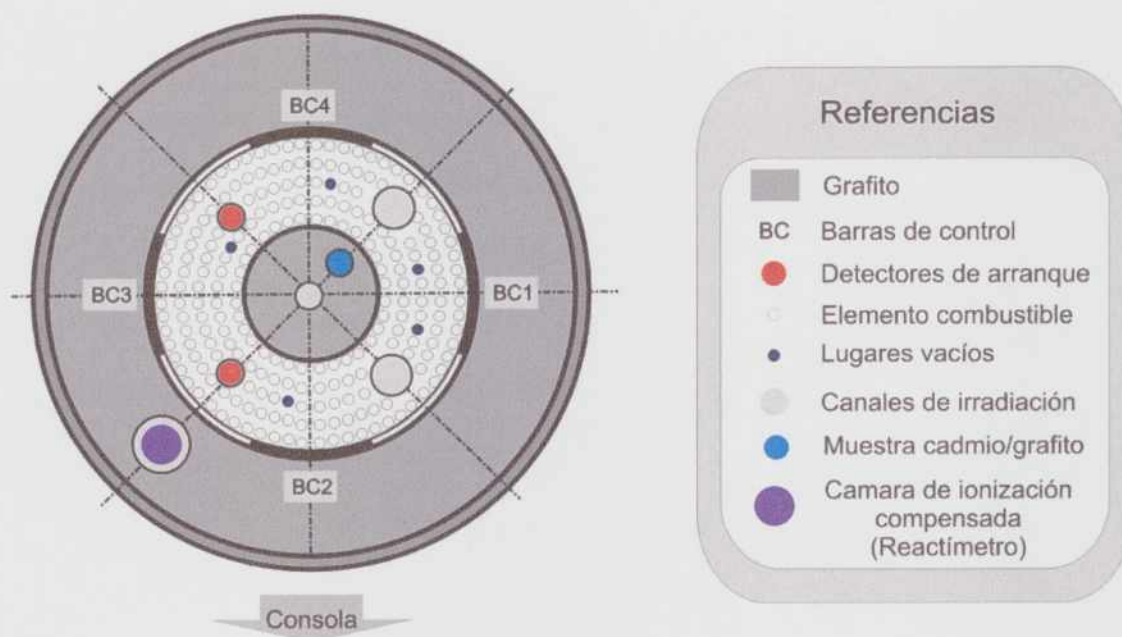


Figura 3: Vista superior del núcleo del Reactor RA-1

El reactor contiene tres reflectores de grafito de pureza nuclear. Uno de ellos está ubicado en la parte exterior del recipiente, y se denomina reflector exterior. Los otros dos están ubicados en el interior del recipiente; uno de ellos

denominado reflector central está en el centro de la corona de combustibles, y el otro denominado reflector radial interior está rodeando la corona de combustibles.

El recipiente está formado por secciones cilíndricas, de chapa de aluminio tratadas para evitar la corrosión. En su parte inferior se hallan las tuberías de llenado y descarga. Un tanque separador conforma un espacio anular que contiene el reflector de grafito interior. En el interior del primer tanque se encuentran la grilla, los elementos combustibles y el reflector central.

A continuación del grafito exterior, se encuentran un anillo de plomo y bloques de hormigón con diferente composición. Además el reactor tiene como blindaje axial el agua que cubre el núcleo.

## Capítulo 2

### 1. Fundamento teórico del método

Para calcular la reactividad de la muestra introducida en el reactor se utilizó la teoría de perturbaciones a primer orden. Este método consiste en conocer de antemano el flujo exacto para una dada configuración (reactor sin perturbar) y luego calcular la reactividad que introduciría una pequeña perturbación en alguna de las propiedades del reactor (reactor perturbado).

En el contexto de este trabajo, el reactor sin perturbar hace referencia al reactor sin la muestra introducida, mientras que el reactor perturbado se refiere a la configuración con la muestra introducida en una dada posición.

Con este método se evita tener que resolver la ecuación de difusión con cada nueva modificación del núcleo. Este método es válido sólo cuando las perturbaciones realizadas en el reactor son pequeñas, de tal manera que los flujos sin perturbar y perturbado son esencialmente iguales. Si esto no se cumple, se debe trabajar a órdenes superiores hasta alcanzar la precisión deseada. En este trabajo sólo se analizará la teoría a primer orden y se indicará de qué manera podría ampliarse el método para explicar con más detalle las mediciones obtenidas.

Tal como se mencionó antes, la teoría de perturbaciones parte del conocimiento del flujo neutrónico del reactor sin perturbar  $\phi(x)$ . En rigor de verdad, también es necesario conocer el flujo adjunto del reactor sin perturbar  $\phi^+(x)$ , sin embargo, sólo se trabajará a un grupo de energía, en donde el flujo adjunto y el flujo son iguales por lo cual se simplifica el análisis.

Se comienza el análisis asumiendo conocidos a los parámetros a un grupo de energías de sección eficaz macroscópica de absorción ( $\Sigma_a$ ), sección eficaz macroscópica de fisión ( $\nu\Sigma_f$ ) y el coeficiente de difusión ( $D$ ). Si bien no se hace explícito en la notación, estos parámetros podrán depender de las coordenadas espaciales del reactor, no así de la energía ni del tiempo. En este punto, es cuando se considera un nuevo reactor donde dichos parámetros fueron perturbados para obtener:

$$\begin{aligned}\Sigma_a^* &= \Sigma_a + \delta\Sigma_a \\ \Sigma_f^* &= \Sigma_f + \delta\Sigma_f \\ D^* &= D + \delta D\end{aligned}$$

donde el superíndice \* hace referencia a los parámetros perturbado del reactor. Considerando la teoría de perturbaciones a primer orden, y asumiendo que el reactor sin perturbar se encontraba crítico, es posible deducir que la nueva reactividad de reactor perturbado vale:

$$\rho = \frac{\int_V [(\nu\delta\Sigma_f - \delta\Sigma_a) \phi^2(r) - \delta D (\nabla\phi(r))^2] dV}{\int_V \nu\Sigma_f \phi^2(r) dV} \quad (1)$$

siendo  $\nabla\phi$  el gradiente del flujo neutrónico. La integración se realiza sobre todo el reactor, a pesar de que muchas constantes se anulan en determinadas zonas (por ejemplo,  $\Sigma_f$  será nula allí donde no hubiere combustible). En el presente trabajo no se trabajará con perturbaciones en el combustible, por lo cual no se tendrá en cuenta en lo que sigue del análisis.

Es útil en este punto pensar que las perturbaciones se realizan de manera localizada dentro del reactor, es decir, que son perturbaciones puntuales de la forma Delta de Dirac  $\delta(r-r_0)$  siendo  $r_0$  la posición en donde se introduce la perturbación (posición de la muestra):

$$\begin{aligned}\delta\Sigma_a &= \delta\Sigma_a \delta(r-r_0) \\ \delta D &= \delta D \delta(r-r_0)\end{aligned}$$

Reemplazando en la Ecuación (1) se obtiene la variación de reactividad producida por la inserción de la muestra en una posición  $r_0$  del reactor:

$$\rho = -\delta\Sigma_a \phi^2(r_0) - \delta D [\nabla\phi(r_0)]^2 \quad (2)$$

Para poder analizar por separado las contribuciones de los dos términos, se tratará por separado, la contribución de una variación en la sección eficaz de absorción, de la contribución producida por una variación del coeficiente de difusión. En la parte práctica esto conlleva a que se utilizará un material cuya principal propiedad sea modificar la absorción (cadmio) y por otro lado un material que modifique esencialmente a la constante de difusión (grafito). Por lo tanto, se puede escribir el efecto sobre la reactividad de un material absorbente como:

$$\rho_{abs} = -\delta\Sigma_a \phi^2(r_0) \quad (3)$$

y para un material dispersor que cambie sólo las propiedades difusivas del reactor:

$$\rho_{dif} = -\delta D [\nabla\phi(r_0)]^2 \quad (4)$$

Resulta de utilidad analizar las consecuencias cualitativas que se observaran en las descripciones mostradas en las ecuaciones (3) y (4). Al introducir un material absorbente, se está incrementando la sección eficaz de absorción, por lo tanto el signo de la reactividad  $\rho_{abs}$  será negativa, como era de esperar. El valor en la reactividad, mirando la ecuación (3), será proporcional al cuadrado del flujo en el reactor, es decir, será mayor en

aquellas regiones en donde el flujo sea mayor, e irá disminuyendo la reactividad si la muestra se introduce en lugares donde el flujo es menor.

Por otro lado, al introducir un material como el grafito en el reactor, se está disminuyendo la constante de difusión a través de un cambio en la sección eficaz macroscópica de scattering. Entonces, si se produce una disminución del coeficiente de difusión se tendrá que  $\delta D < 0$  y por lo tanto la reactividad tendrá un valor positivo. Es decir, de acuerdo a este simple análisis se espera que la introducción de grafito dentro del reactor lo ponga en estado hipercrítico. Esto hará que en la parte práctica se deban tener ciertas consideraciones en cuanto a la operación y seguridad durante la experiencia.

### 1.1.Reactor tipo slab homogéneo y desnudo

Con el objetivo de ejemplificar los resultados obtenidos, se mostraran a continuación cómo son los cambios en reactividad producidos en un reactor tipo slab homogéneo y desnudo. Si el ancho del reactor tiene una distancia  $a$ , el flujo neutrónico del reactor sin perturbar puede escribirse como:

$$\phi(x) = A \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \quad (5)$$

donde  $A$  es una constante arbitraria dependiente de la potencia del reactor. Con este resultado puede escribirse también su gradiente que interviene en la teoría de perturbaciones:

$$\nabla\phi(x) = \frac{d\phi(x)}{dx} = -\frac{A\pi}{a} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{a}x\right) \quad (6)$$

Con las expresiones obtenidas se está en condiciones de poder graficar los cambios en reactividad que produciría insertar un material absorbente o uno

dispersor, utilizando las ecuaciones (3) y (4) con los perfiles de flujos calculados. En la Figura 4 se muestra un gráfico genérico del perfil de reactividad esperado en función de las distintas posiciones en donde se introduce el material dentro del reactor. Ambas curvas tienen normalización arbitraria, y sólo reproducen los signos esperados en las perturbaciones (agregado de cadmio y agregado de grafito).

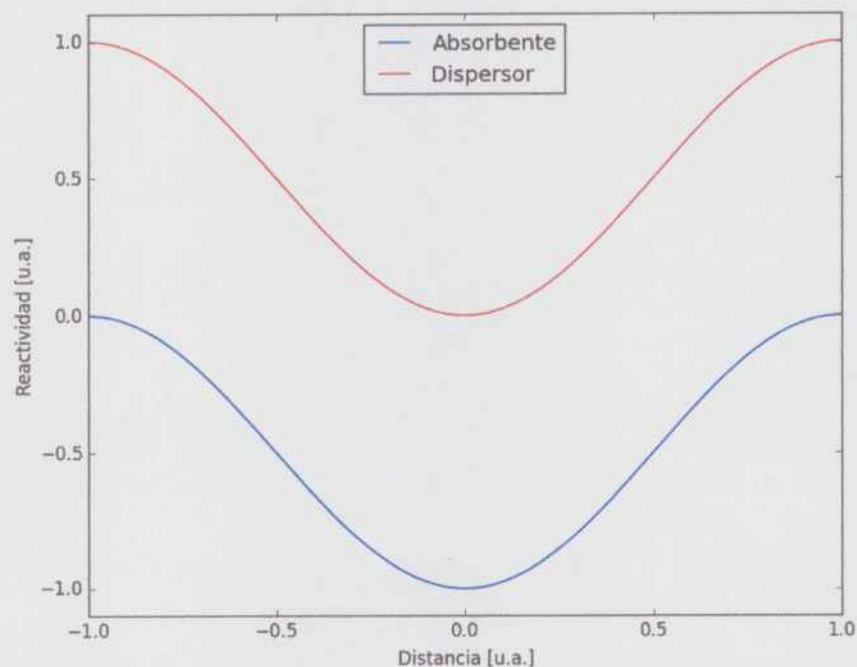


Figura 4: Variaciones de reactividad en función de la distancia de la muestra para un reactor tipo slab homogéneo y desnudo.

Puede apreciarse que al introducir un absorbente neutrónico la disminución en reactividad es muy marcada en el centro del reactor y se hace despreciable a medida que llega a la periferia del mismo. Por otro lado, el efecto de introducir un material dispersor es opuesto. Tiene un valor de reactividad nulo

en el centro del núcleo y aumenta progresivamente hasta alcanzar un máximo en los bordes del reactor.

## 1.2. Reactor tipo slab homogéneo reflejado

El modelo utilizado anteriormente es en extremo sencillo y simplificado. Un paso más en complejizar el problema, sería agregar un reflector al núcleo y volver a calcular los cambios en reactividad al introducir las muestras.

Si se llama  $a$  al tamaño del núcleo y  $b$  al tamaño del reflector ubicado en ambos extremos del reactor, el flujo neutrónico puede escribirse como [Lamarsh]:

$$\phi(x) = \begin{cases} A \cos(B_c x) & |x| \leq a/2 \\ \frac{A \cos(B_c x)}{\sinh\left(\frac{b}{L}\right)} \sinh\left(\frac{\frac{a}{2} + b - |x|}{L}\right) & |x| > a/2 \end{cases} \quad (7)$$

donde  $B_c$  se obtiene de resolver la ecuación de criticidad y  $L$  es la distancia de difusión. La derivada del flujo escribe como:

$$\frac{d\phi(x)}{dx} = \begin{cases} -B_c A \cos(B_c x) & |x| \leq a/2 \\ \frac{A \cos(B_c x)}{L \sinh\left(\frac{b}{L}\right)} \cosh\left(\frac{\frac{a}{2} + b - |x|}{L}\right) & |x| > a/2 \end{cases} \quad (8)$$

Con el flujo calculado en la Ecuación (7) y su derivada en la Ecuación (8) es posible graficar cómo se verían los perfiles de reactividad al introducir una muestra de material absorbente o dispersor dentro del reactor reflejado. En la Figura 5 se muestran las curvas obtenidas.

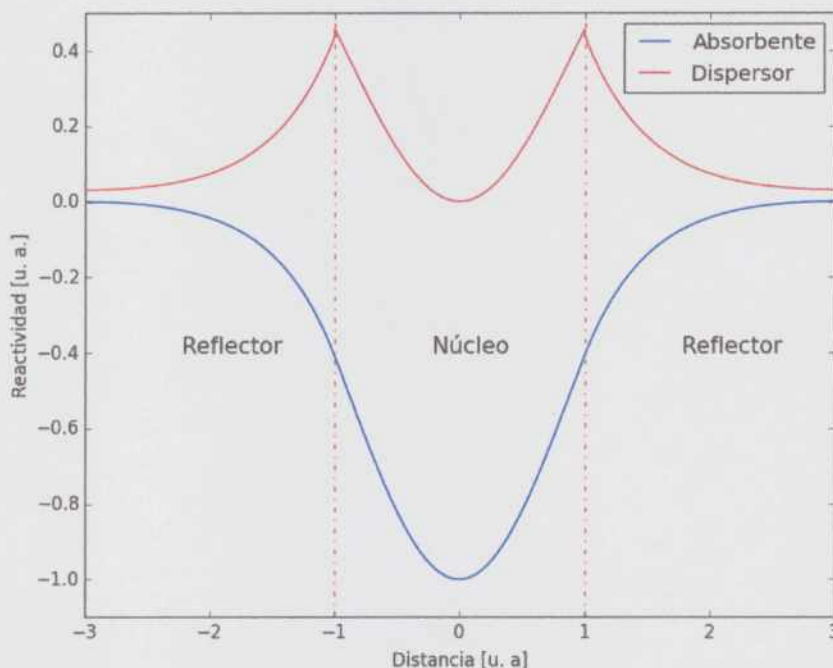


Figura 5: Variación de la reactividad de la muestra introducida en función de la distancia para un reactor tipo slab homogéneo y reflejado

Se aprecia que la forma de la curva para el material absorbente difiere en muy poco respecto a la obtenida con el reactor desnudo. Sin embargo, para el material dispersor se observa que donde comienza el reflector es donde mayor valor de reactividad tendrá la muestra. Esto puede entenderse pensando en que la muestra mejora la capacidad de reflejar los neutrones, produciendo un aumento en la reactividad del núcleo.

## Capítulo 3

### 1. Descripción del sistema de medición.

Se coloca en la facilidad del reflector exterior una cámara de ionización compensada CIC41 con polaridad +,- 400 Volts, que será utilizada como patrón para la medición de flujo neutrónico. Esta CIC41 estará conectada a la cadena de medición de Física de Reactores.

La cadena utilizada está conformada por un amplificador de corriente Modelo CNEA K 330, dos fuentes de voltaje fuente Ortec para la CIC41 y un osciloscopio Tektronix tds 210. El sistema de adquisición de datos se realizó con un dispositivo National Instruments USB-6353 conectado a una notebook en donde se tiene instalado un reactímetro digital. Estos sistemas son independientes a los sistemas de adquisición de datos propios del reactor. En la Figura 6 se muestran los equipos al momento de realizar la experiencia.



Figura 6: Cadena de medición de Grupo Física Experimental de Reactores

El reactor en la etapa de arranque cuenta con dos tubos de trifloruro de boro ubicados en el núcleo con una tensión de alimentación de +2350 Volts cada uno (Figura 7).



Figura 7. Etapa de Arranque, Trifloruro de Boro

La etapa de marcha cuenta con cinco cámaras de ionización compensadas ubicadas fuera del núcleo, con tres canales logarítmicos y dos canales lineales con tensiones de alimentación entre -200 Volts y + 500 Volts, que tienen como objetivo el seguimiento de la evolución de la potencia.

( Figuras 8 y 9).



Figura 8 Canal de marcha para medición de flujo logarítmico (CIC1, CIC2, CIC3)



Figura 9. Canal de marcha para medición de flujo lineal ( CIC4, CIC5)

La medición de estas cámaras de ionización compensadas fue contrastada con la medición de la CIC41.

## 2. Ubicación y características de las muestras

En la facilidad del reflector central (ver Figura 10) se introducirán los dispositivos experimentales que serán utilizados para el desarrollo de esta experiencia cuyas dimensiones, material utilizado y características serán presentados a continuación. ( ver figuras 11,12 y 13).



Figura 10. Facilidad en el Reflector Central



Figura 11: Can de aluminio



Figura 12: Cilindro de grafito



Figura 13. Rollo de cadmio

Características de cada elemento utilizado:

➤ Can de Aluminio:

Largo: 58 milímetros

Diámetro: 21 milímetros

Masa: 3 gramos

➤ Cadmio:

Largo: 16 milímetros

Diámetro: 20 milímetros (rollo)

Masa: 18 gramos

➤ Grafito:

Largo: 58 milímetros

Diámetro: 20 milímetros

Masa: 30,75 gramos

La Facilidad del Reflector Central se extiende desde su posición inferior que coincide con la parte media de los elementos combustibles en la grilla hasta su parte superior que está aproximadamente 1 metro por encima del pelo de agua del tanque del reactor (Figura 14).

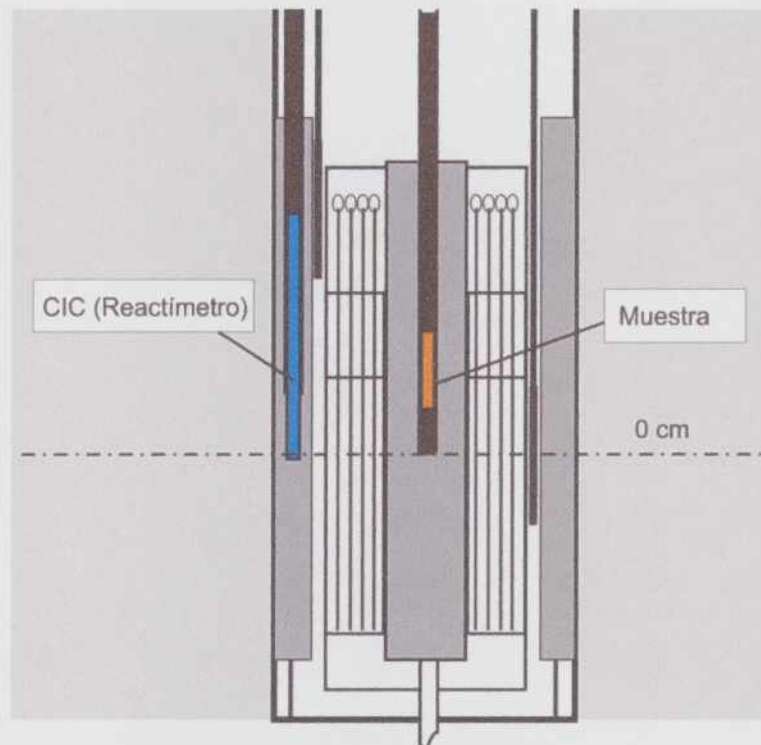


Figura 14. Muestra en el Reflector Central

Los elementos combustibles miden 660 mm, teniendo una longitud activa de 540 mm, los 120 mm restantes se reparten en 60 mm donde 0,95 mm es la cabeza que es utilizada para agarre y el resto es grafito utilizado como reflector (Figura 15).

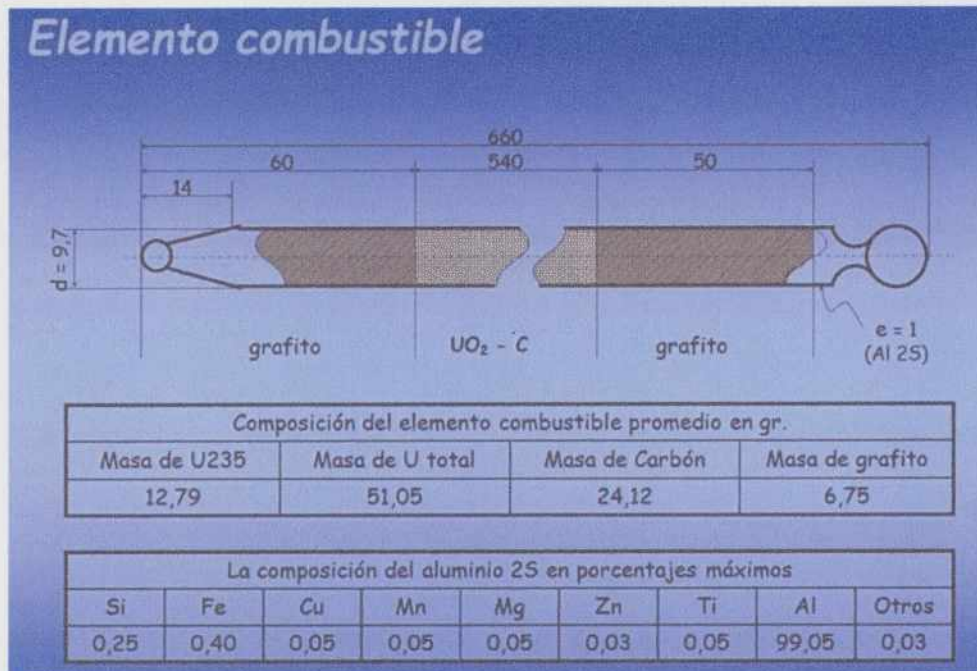


Figura 15 Elemento Combustible

El can de aluminio donde se introduce el cadmio y el grafito estará amarrado con una tanza que servirá como herramienta de izaje. Esa tanza se hará deslizar por sobre elementos estructurales del puente de mecanismos que soportan las barras de control.

En uno de los laterales del reactor (lado del circuito primario) se coloca un metro que servirá para medir el nivel de deslizamiento de la tanza que será la cota de introducción o extracción de la muestra (Figura 16).

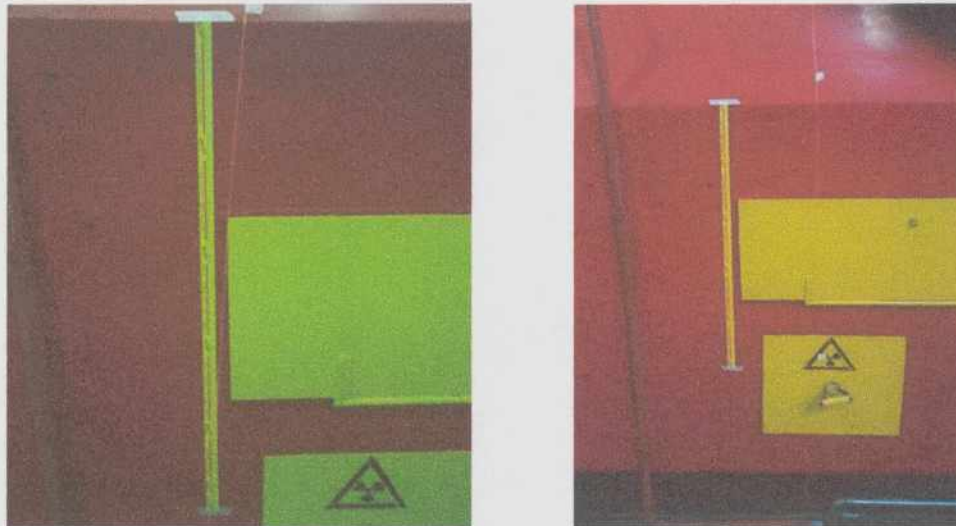


Figura 16. Sistema para medir la posición de la muestra.

### 3. Operación del reactor durante la experiencia

Se parte de la condición de reactor en parada. Se hace una recorrida inicial para controlar todos los parámetros de instrumentación nuclear, convencional, sistemas de adquisición de datos, circuito primario, circuito secundario, etc., datos que serán volcados en la planilla de verificación previa al arranque RA-1.

Se trabajará en la etapa de marcha con todos los sistemas de refrigeración en servicio ya que la potencia del reactor estará aproximadamente a 600 watts.

Una vez posicionado el can de aluminio conteniendo al cadmio o el grafito a 1 metro sobre la parte inferior de la facilidad del reflector central (totalmente extraído del núcleo) se comienza la extracción de barras siguiendo la secuencia B1, B2, B4 y B3.

Se llega a una posición de reactor crítico con B1 extraída al 100%, B2 extraída al 100%, B4 extraída al 100% y B3 extraída al 70,3% (Figura 17).

La indicación de corriente de cámaras de ionización compensadas es:

**IM1:**  $1 \times 10^{-8}$  Amperes

**IM2:**  $0,6 \times 10^{-8}$  Amperes

**IM3:**  $0,9 \times 10^{-8}$  Amperes

**IM4:**  $0,8 \times 10^{-8}$  Amperes

**IM5:**  $0,35 \times 10^{-8}$  Amperes

La indicación de Potencia Térmica es 600 Watts

La indicación de corriente de cámara de ionización compensada CIC4. (Física de reactores) es:

**ICIC4:**  $8,45 \times 10^{-6}$  Amperes



Figura 17. Registradores de posición de las barras de control

Esta posición de crítico es la que se parte para hacer la experiencia por lo tanto ante cualquier inserción o extracción de reactividad que se produzca en el reactor, luego de un período se deberá volver a éste valor.

La experiencia se hará con una serie de pasos en la cual se introducirá a distintas alturas el can conteniendo el Cadmio o el grafito dentro de la facilidad de irradiación, esto implicará una introducción de reactividad negativa o

positiva por consiguiente el reactor que originalmente estaba en estado crítico estacionario pasará a un estado subcrítico o hipercrítico. Luego se deberá compensar con barras de control para volver a la potencia inicial.

El procedimiento descrito evita que se deba compensar con barras de control la reactividad de la muestra. Cada vez que se introduce la muestra, la posición de crítico es la misma. El movimiento de barras sólo se realiza para llevar al reactor al mismo nivel de potencia inicial. Este método contrasta con el método de compensación, donde la muestra se introduce de a pasos y se compensa la reactividad extrayendo o introduciendo la barra de control. Con el procedimiento utilizado, se asegura que el flujo neutrónico no sea modificado por la variación de las barras de control del reactor.

En los puntos siguientes se describirá detalladamente cada uno de los pasos seguidos para obtener los valores de reactividad de las muestras.

## 1. Procedimiento para el cadmio

En la Figura 18 (superior) nos muestra el estado del reactor representado por la curva voltaje en función del tiempo, esto equivale aproximadamente a una potencia de 600 watts. Aquí también se ve como el reactor estaba en estado crítico estacionario y cuando se introduce en la facilidad del reflector central el contenedor con cadmio en el tiempo  $t = 1280$  s se hace subcrítico.

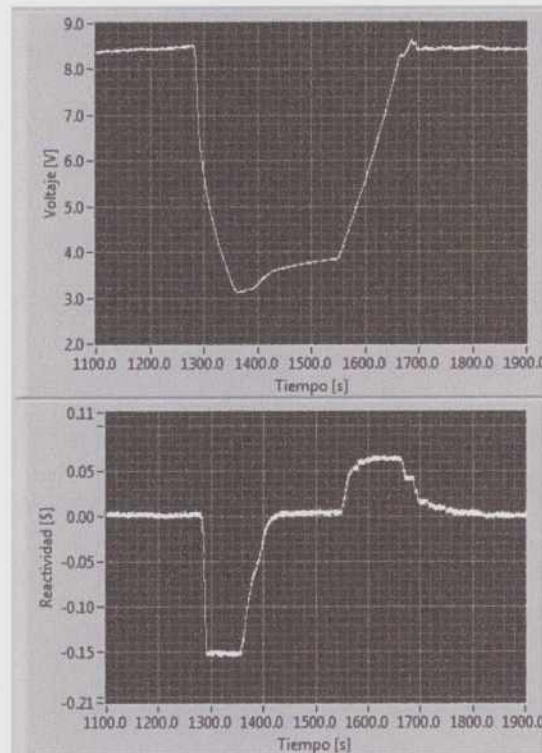


Figura 18: Voltaje y reactividad durante la introducción de la muestra de cadmio

Al retirar al contenedor el reactor tiende a volver a estado crítico pero en un escalón de potencia inferior, pero como en la experiencia siempre se parte del estado inicial considerado ( potencia 600 watts ) los operadores comienzan a extraer barras de control insertando reactividad positiva llevando momentáneamente el reactor a estado hipercrítico para luego estabilizar a la potencia inicial de trabajo.

Paralelamente en la Figura 18 (inferior) se puede ver la curva reactividad en función del tiempo y se nota que al introducir el contenedor con el cadmio se traducirá en una reactividad de  $\beta = -0,15$  pasando según la escala de ordenadas de 0 a  $-0,15$ . En la escala de tiempo se muestra que la medición con el reactímetro se hace entre  $t = 1300$  s y  $t = 1360$  s, luego se extrae totalmente el contenedor.

En la Figura 19 se muestra la reactividad versus tiempo en un paso de la medición, con reactividad nula durante el estado crítico del reactor, reactividad negativa al introducir el contenedor con cadmio, el tiempo necesario para efectuar la medición y por último la compensación mediante barras de control para volver a la potencia inicial.

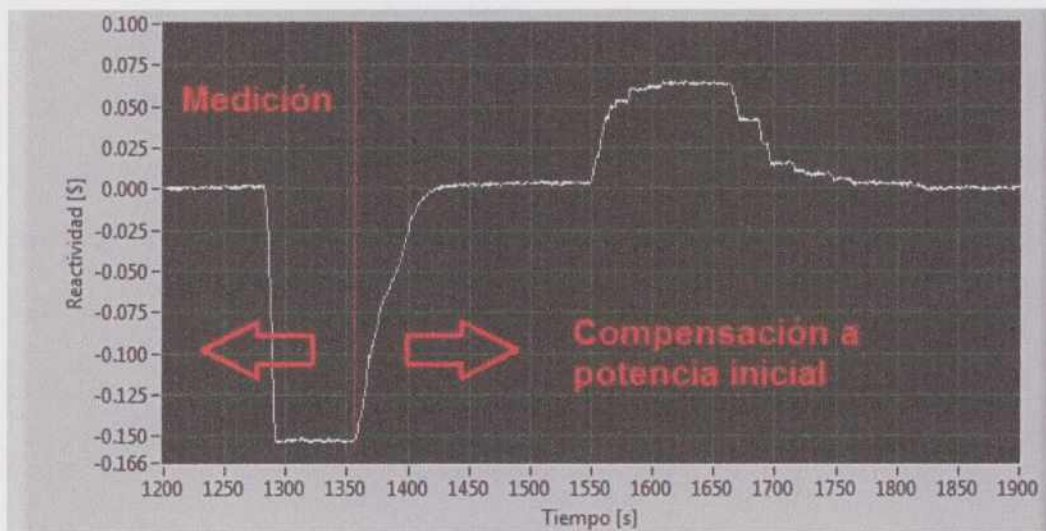


Figura 19: Un paso completo durante la medición de reactividad de la muestra de cadmio. Se distingue el momento de la medición de los movimientos de barras para volver a la potencia inicial.

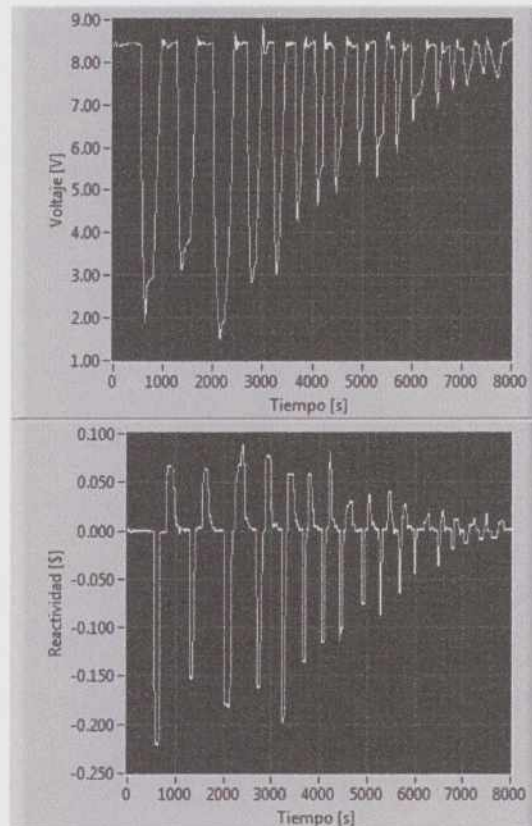


Figura 20: Secuencia completa de voltaje y reactividad durante la medición de la muestra de cadmio.

En la Figura 20 se muestran los gráficos de voltaje vs tiempo y reactividad vs tiempo donde visualizamos todos los pasos realizados en la experiencia con la muestra de cadmio.

Sabiendo que al introducir el contenedor con cadmio la reactividad se hará negativa, podemos ver que las escalas elegidas en ordenadas parten desde un nivel alto (8,4 volts); de esa manera se puede visualizar la forma descendente de la curva de voltaje versus tiempo, es decir que en la parte de operación del reactor se trabaja dentro de la misma década .

## 2. Procedimiento para el grafito

La Figura 21 (superior) nos muestra el estado del reactor representado por la curva Voltaje en función del tiempo. Aquí también se ve como el reactor estaba en estado crítico estacionario y cuando se introduce en la facilidad del reflector central el contenedor con grafito en el tiempo  $t=1530$  s se pasa a un estado hipercrítico.

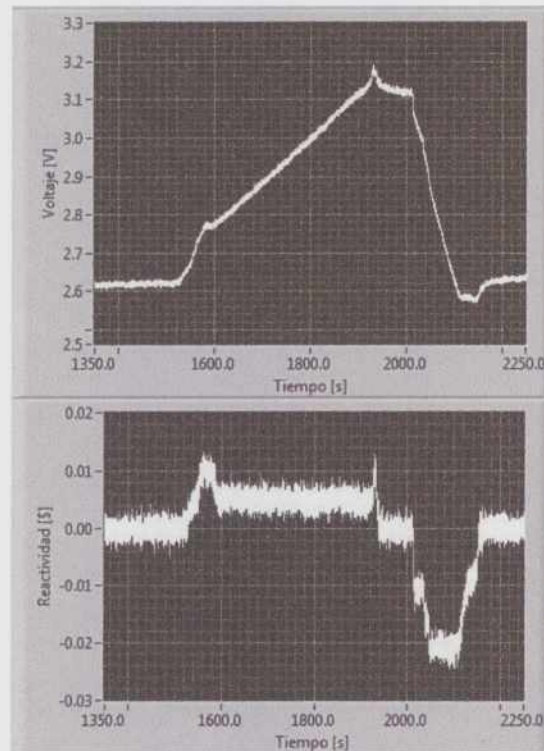


Figura 21: Voltaje y reactividad durante la introducción de la muestra de grafito

Al retirar al contenedor el reactor tiende a volver a estado crítico pero en un escalón superior de potencia. Debido a que siempre se busca partir del estado inicial considerado, los operadores comienzan a bajar barras de control insertando reactividad negativa, llevando momentáneamente el reactor a estado subcrítico para luego estabilizar a la potencia inicial de trabajo.

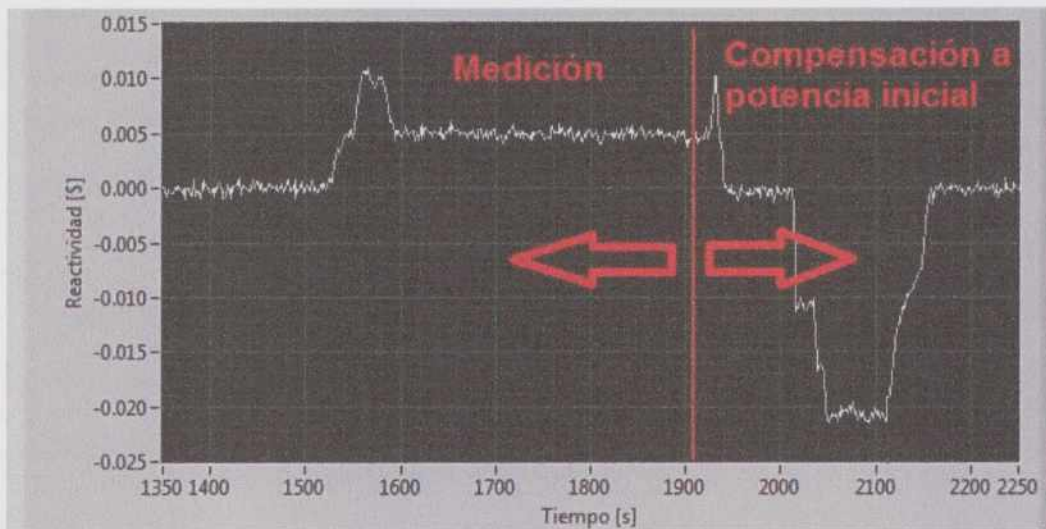


Figura 22: Un paso completo durante la medición de reactividad de la muestra de grafito. Se distingue el momento de la medición de los movimientos de barras para volver a la potencia inicial.

Paralelamente en la Figura 21 (inferior) se puede ver la curva reactividad en función del tiempo y se notará que al introducir el contenedor con el grafito se traducirá en una reactividad positiva de  $\beta=0,005$ . En la escala de tiempo se muestra que la medición con el reactímetro se hace entre  $t=1600$  s y  $t=1920$  s, luego se extrae totalmente el contenedor.

En la Figura 22 se muestra la reactividad versus tiempo a un paso de la medición, con reactividad nula durante el estado crítico del reactor, reactividad positiva al introducir el contenedor con grafito, el tiempo necesario para efectuar la medición y por último la compensación mediante barras de control para volver a la potencia inicial.

En la Figura 23 se muestran dos gráficos voltaje vs tiempo y reactividad vs tiempo donde visualizamos todos los pasos realizados en la experiencia.

Sabiendo que al introducir el contenedor con grafito se introducirá una reactividad positiva, y como se debe trabajar en la misma década para que el reactímetro funcione correctamente, se eligió el estado inicial de voltaje en un nivel bajo (2,6 volts). De esta manera se puede visualizar la forma ascendente de la curva de voltaje versus tiempo.

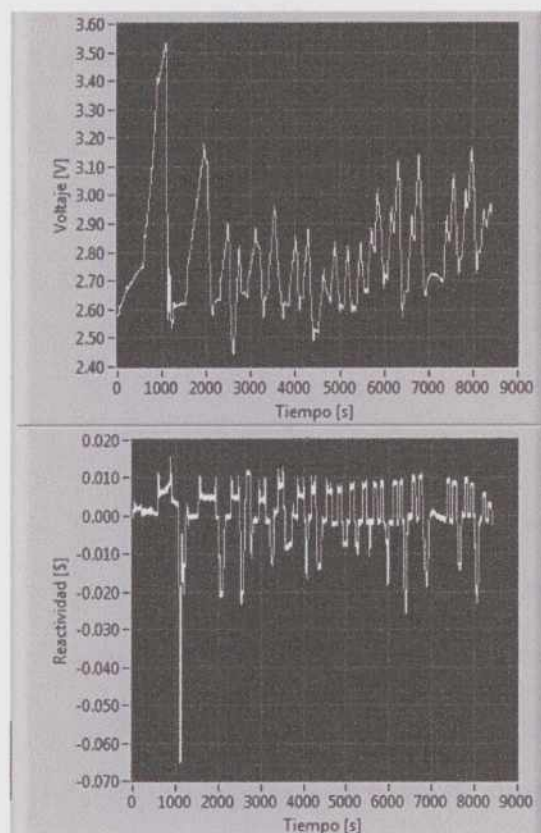


Figura 23: Secuencia completa de voltaje y reactividad durante la medición de la muestra de grafito.

## Capítulo 4

### 1. Procesamiento de datos

En esta sección se describirá brevemente el procedimiento realizado para analizar los datos obtenidos con el reactímetro y del cual se obtuvieron las reactividades en cada paso para ambas muestras.

Si bien el software del reactímetro realiza varias tareas de forma automática, también es posible realizar un reprocesamiento de los datos cuando fuese necesario. Para este trabajo fue necesario reprocesar los datos ya adquiridos para mejorar el nivel de ruido de la señal debido a que en varios de los pasos, la reactividad estimada fue muy pequeña ( $\sim 0.001$ ).

Para tal efecto, el software permite aplicar un *filtro de media móvil*. Se tomaron promedios en bloques de diez o quince puntos, dependiendo del nivel de fluctuación en la reactividad estimada. En la Figura 24 se muestran los resultados de aplicar un filtro de media móvil de 15 puntos durante un paso de estimación de reactividad con la muestra de grafito. Se aprecia a simple vista la notable mejora obtenida en la reactividad medida. Se aprecia en dicho gráfico que de no ser por el post-procesamiento de la señal, el nivel de ruido en la señal de reactividad hubiera dificultado la estimación con un error aceptable.

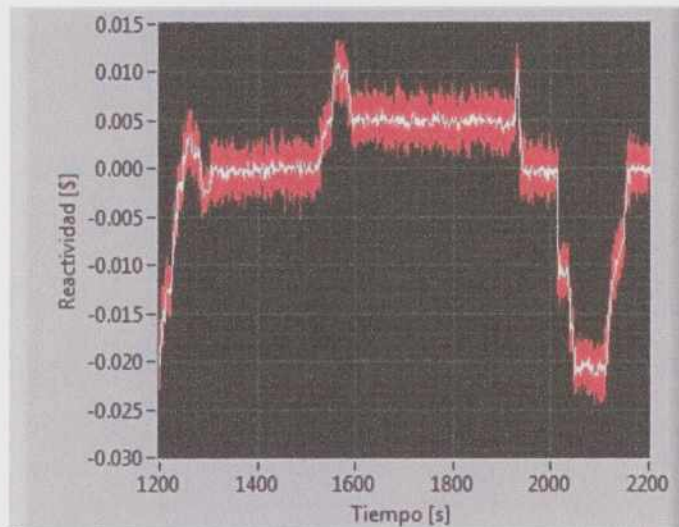


Figura 24: Filtrado de la señal de reactividad obtenida con el reactímetro. En rojo la señal original, y en blanco la señal luego de aplica un filtro de media móvil.

Otro punto que fue necesario tener en cuenta para la estimación de la reactividad fue el estado inicial del cual se partía. De manera idealizada, siempre se tomó que el estado inicial previo a la introducción de la muestra correspondía a un reactor crítico. Sin embargo, muchas veces se observó que el reactor partía de estados ligeramente subcríticos o ligeramente hipercríticos ( $|\beta| \sim 0.0001$ ). Por tal motivo para estimar el valor de reactividad de la muestra en un dado paso, se restó el estado inicial al valor de reactividad final con la muestra ya introducida. En la Figura 25 se muestra esquemáticamente de qué manera se calculó el  $\Delta\beta$  para la inserción de la muestra de cadmio. Ya con la señal filtrada, se tomó un promedio tanto del estado inicial de reactividad (previo a la introducción) y un estado con la muestra en la posición elegida. Ambos valores fueron restados y dicha diferencia es la que se informa en las tablas y figuras en este trabajo.

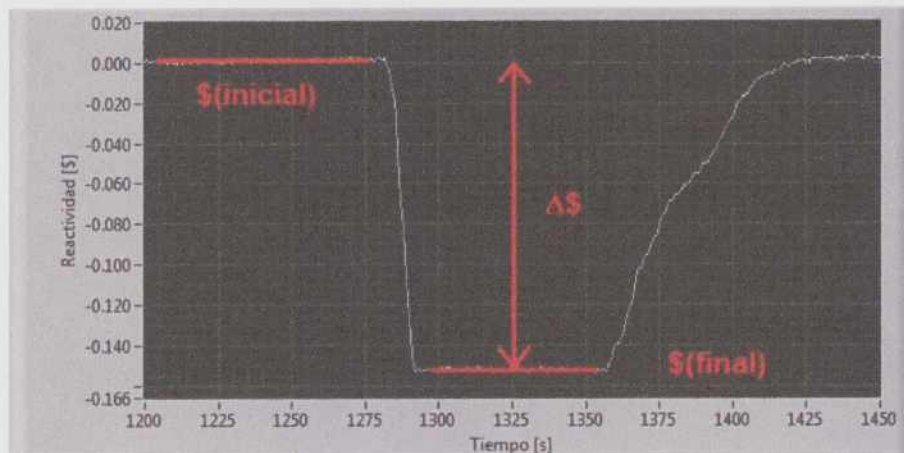


Figura 25: Detalle de cómo fue calculado el valor en reactividad al introducir la muestra de cadmio

En la Figura 26 se muestra el gráfico análogo pero para la reactividad medida durante la introducción de la muestra de grafito. En este caso el efecto de que el estado inicial no fuese exactamente crítico fue de mayor importancia, ya que los valores de reactividad introducidos fueron muy pequeños ( $\beta \sim 0.005$  en el ejemplo mostrado).

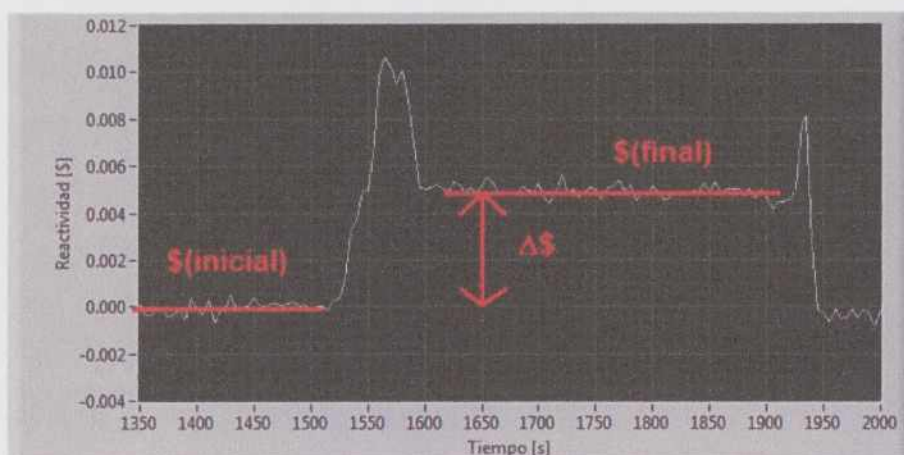


Figura 26: Detalle de cómo se calculó el valor en reactividad al introducir la muestra de grafito.

## 2. Resultados

### 1. Reactividades estimadas para la muestra de cadmio

A continuación, en la Tabla 1, se muestran los resultados obtenidos de reactividad para cada posición de la muestra de cadmio. Las distancias informadas corresponden a la posición de la parte inferior del portamuestras.

Tabla 1: Reactividades estimadas para distintas posiciones de la muestra de cadmio

Distancia [cm]	Reactividad [β]
0.0 ± 0.2	-0.220 ± 0.001
0.8 ± 0.2	-0.198 ± 0.001
1.7 ± 0.2	-0.180 ± 0.001
3.4 ± 0.2	-0.163 ± 0.001
5.0 ± 0.2	-0.153 ± 0.001
7.5 ± 0.2	-0.137 ± 0.001
10.0 ± 0.2	-0.117 ± 0.001
12.5 ± 0.2	-0.100 ± 0.001
13.5 ± 0.2	-0.088 ± 0.001
15.0 ± 0.2	-0.077 ± 0.001
17.5 ± 0.2	-0.064 ± 0.001
20.0 ± 0.2	-0.045 ± 0.001
22.5 ± 0.2	-0.037 ± 0.001
26.0 ± 0.2	-0.019 ± 0.001
28.5 ± 0.2	-0.013 ± 0.001
30.0 ± 0.2	-0.009 ± 0.001
32.5 ± 0.2	-0.006 ± 0.001

Los mismos datos de reactividad en función de la distancia son graficados (en la Figura 27). Puede apreciarse que tal como se había predicho, el valor en reactividad de la muestra es mayor en la parte central del núcleo, coincidiendo con la zona de mayor flujo.

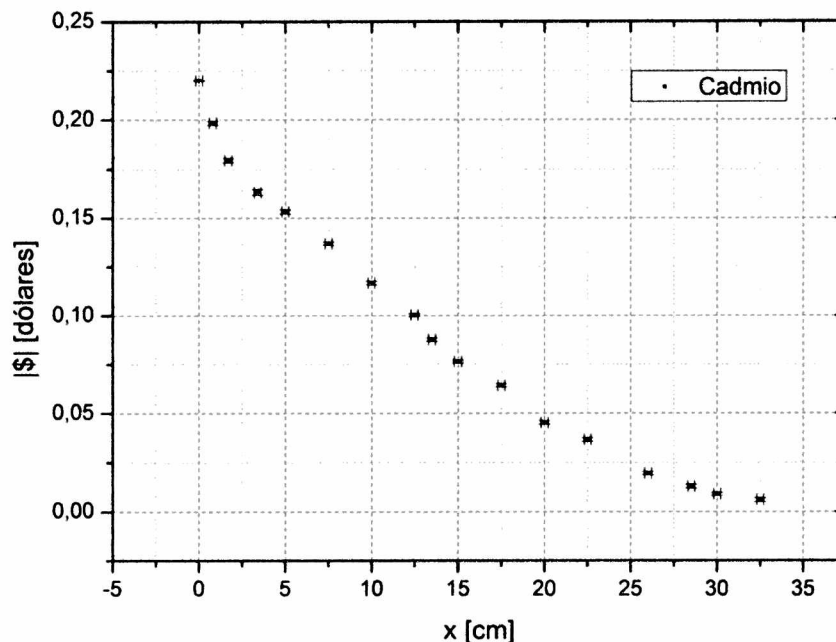


Figura 27: Curva de reactividad (en valor absoluto) en función de la posición de la muestra de cadmio

La forma del perfil de reactividades encontrado discrepa en la primer parte de la curva, a distancias cercanas al plano medio del núcleo. Es de esperar, de acuerdo a mediciones previas de flujo con hojuelas, una forma más suave con derivada nula en  $x=0\text{cm}$ . Una posible causa de esta discrepancia puede deberse a efectos de auto-apatallamiento de la muestra debido a su alto poder absorbente. Para futuras mediciones, se pretende repetir la experiencia con muestras de menor masa.

## 2. Reactividades estimadas para la muestra de cadmio

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos para las distintas posiciones de la muestra de grafito. Como en el caso anterior, la distancia corresponde a la posición de la parte inferior del porta muestras.

Tabla 2: Reactividades estimadas para distintas posiciones de la muestra de grafito

Distancia [cm]	Reactividad [β]
0.0 ± 0.2	0.0062 ± 0.0003
1.0 ± 0.2	0.0059 ± 0.0003
4.0 ± 0.2	0.0060 ± 0.0003
5.0 ± 0.2	0.0067 ± 0.0003
6.0 ± 0.2	0.0065 ± 0.0003
7.0 ± 0.2	0.0077 ± 0.0003
8.0 ± 0.2	0.0085 ± 0.0003
9.0 ± 0.2	0.0090 ± 0.0003
10.0 ± 0.2	0.0097 ± 0.0003
11.0 ± 0.2	0.0102 ± 0.0003
12.0 ± 0.2	0.0105 ± 0.0003
13.0 ± 0.2	0.0106 ± 0.0003
14.0 ± 0.2	0.0112 ± 0.0003
15.0 ± 0.2	0.0112 ± 0.0003
16.0 ± 0.2	0.0110 ± 0.0003
17.0 ± 0.2	0.0117 ± 0.0003
18.0 ± 0.2	0.0109 ± 0.0003
19.0 ± 0.2	0.0104 ± 0.0003
21.0 ± 0.2	0.0102 ± 0.0003
23.0 ± 0.2	0.0085 ± 0.0003
25.0 ± 0.2	0.0071 ± 0.0003
28.0 ± 0.2	0.0043 ± 0.0003

En la Figura 28 se grafican los datos de valores absolutos de reactividad en función de la posición de la muestra.

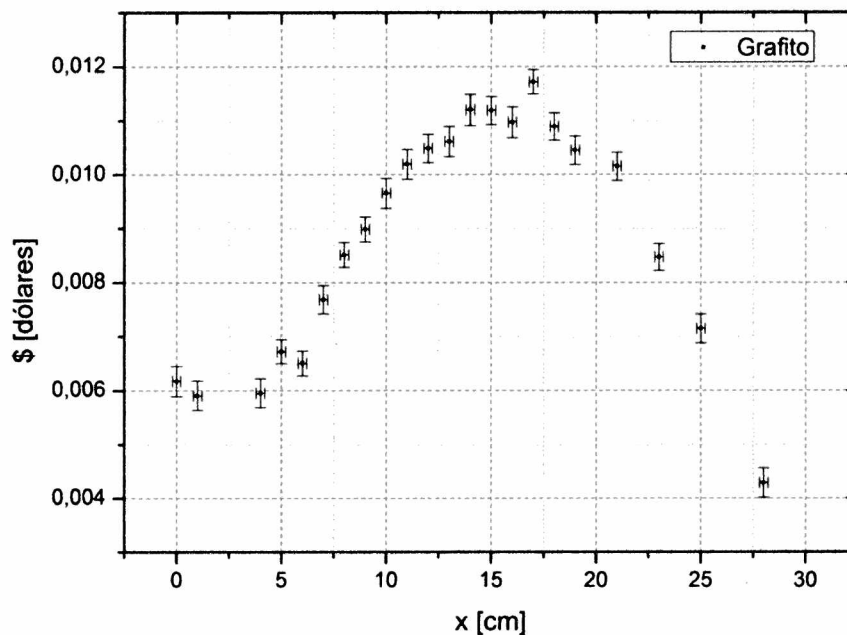


Figura 28: Curva de reactividad (en valor absoluto) en función de la posición de la muestra de grafito

Se observa que la muestra de grafito posee un valor máximo ubicado a una distancia aproximada de  $x=15\text{cm}$  por encima del plano medio del núcleo. El comportamiento del perfil de reactividad obtenido es el esperado, de acuerdo al análisis cualitativo realizado en el Capítulo 2. Sin embargo existen ciertas discrepancias que merecen ser tenidas en cuenta. La diferencia más notable, es que el máximo de reactividad se encuentra en la zona de los combustibles, (que termina alrededor de los 30 cm). Por otro lado, también se observa que el valor de reactividad no se anula en el centro del reactor como lo indica el análisis teórico.



Dan Beninson

Instituto de Tecnología Nuclear

Una conjetura plausible es que el análisis realizado no describa fehacientemente a la compleja geometría en la que se está trabajando. Y más importante aún, que el modelo de un grupo de energía no sea el correcto para trabajar con un material dispersor como el grafito.

### 3. Trabajo a futuro

Además de las nuevas experiencias y análisis propuestos en los puntos anteriores, el análisis realizado de los datos medidos abre la posibilidad de utilizar esta técnica para obtener el perfil de flujo adjunto (conociendo de forma independiente el perfil de flujo neutrónico). Previamente se debe mejorar la forma de posicionar la muestra dentro del reactor para que sea más precisa y reproducible.

Por último, también resultaría de interés investigar el comportamiento de otro tipo de materiales, desde materiales livianos (agua liviana, agua pesada) hasta materiales físis, como ser hojuelas de uranio-235. Con ésta última se estaría perturbando la sección eficaz macroscópica de fisión del reactor.



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## Conclusiones

En el presente trabajo se obtuvieron valores de reactividad de dos muestras ubicadas en distintas posiciones de uno de los canales de irradiación del Reactor RA-1. Con un material absorbente de neutrones térmicos (cadmio) se encontró que el efecto es más pronunciado en las cercanías del plano medio del reactor. Para una muestra de un material dispersor (grafito) se obtuvo, en cambio, que introducía una reactividad positiva siendo su valor máximo a 15 cm por encima del plano medio del núcleo. Estos efectos, de forma cualitativa, fueron explicados con un modelo sencillo a un grupo de energías con teoría de perturbaciones a primer orden. Se encontraron, sin embargo, ciertos efectos que escapan al análisis realizado y que requieren que se efectúen nuevas mediciones junto con un estudio teórico más detallado (dos grupos de energía, geometría cilíndrica, etc).

Estas mediciones, por ser las primeras de su tipo realizadas en el reactor RA-1, abren el camino para investigar los efectos de otro tipo de materiales, y en distintas zonas del reactor (núcleo, reflector externo, etc).



## Referencias

Gomez A. *Métodos de medición en física de reactores nucleares. Cinética y ruido neutrónico*. ITE-06REC-203.

Benhaim A. , Bellino P, Gomez A . *Determinación de la reactividad mediante la cinética inversa para reactores en estado crítico y subcrítico*. XXXIX Reunión Anual de la AATN (2012)

Duderstadt J., Hamilton L. *Nuclear Reactor Analysis* (1976)

Lamarsh J. *Introduction to Nuclear Reactor Theory* . Addison-Wesley. (1966)

*Adjoint Flux Function, Reactor Training Course*. Technical University Dresden. Institute of Power Engineering Training Reactor.

Luna S. *Obtención de un método para estimar el perfil de flujo neutrónico de un reactor nuclear*. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. UNR.

Sánchez F. *Descripción y caracterización de sistema de detectores de neutrones compuestos por cámaras de ionización compensadas CIC-41*. ITE-CNEA-CAB 047/033/07 (2007)

## Anexo A

### 1. Facilidades de irradiación del Reactor RA-1

Se enumeran a continuación las facilidades de irradiación. Cabe señalar que los flujos neutrónicos (aproximados) de cada facilidad, corresponden a una potencia nominal de 40 KW.

- Un Dispositivo de Irradiación en el Reflector Central. Con un Flujo Térmico de  $2 \times 10^{12}$  n/seg.cm<sup>2</sup>. Consta básicamente de un tubo central de aluminio por el cual circula aire y un tubo lateral, también de aluminio, por el que se introducen las muestras, por debajo de ellos, aproximadamente a unos 54 centímetros, se encuentra un tambor con ocho agujeros simétricamente dispuestos, de tal forma que cada uno de ellos puede enfrentar al tubo lateral de aluminio, y por ende a través de él introducirse las muestras.
- Tres Canales Verticales Pasantes en el centro del núcleo, que permiten instalar dispositivos experimentales como por ejemplo un crióstato o loops para ensayos por radiación, etc. Estas facilidades proveen un flujo Rápido de  $1,08 \times 10^{12}$  n/seg.cm<sup>2</sup>.
- Un Canal vertical en el Reflector radial de grafito interior. El flujo térmico en dicho canal es de  $5 \times 10^{11}$  n/seg.cm<sup>2</sup>.

En la Figura A1 se muestran dichas facilidades.



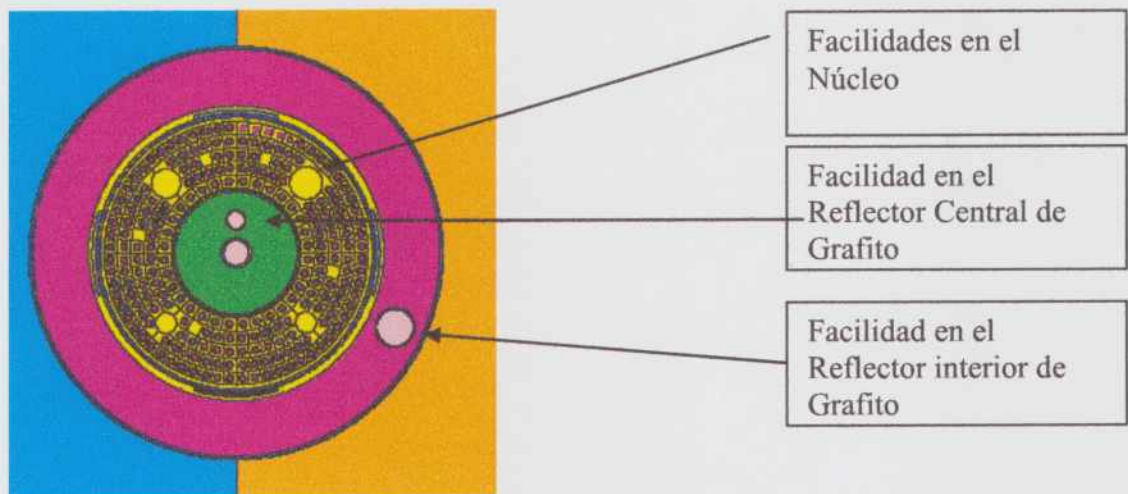


Figura A1: Facilidades en el núcleo y reflectores de Grafito

- Un Canal de Irradiación Lateral que permite el armado de dispositivos para irradiar muestras de mayor volumen. Se trata de un canal horizontal sección rectangular que llega hasta 10 cm del tanque del reactor. En dicho orificio se desplaza una pieza de sección rectangular, de estructura de hierro con hormigón y grafito, en cuyo extremo va colocada la muestra a irradiar. El flujo rápido en la posición de irradiación es  $3 \times 10^{11}$  n/seg.cm<sup>2</sup> (Figura A2).

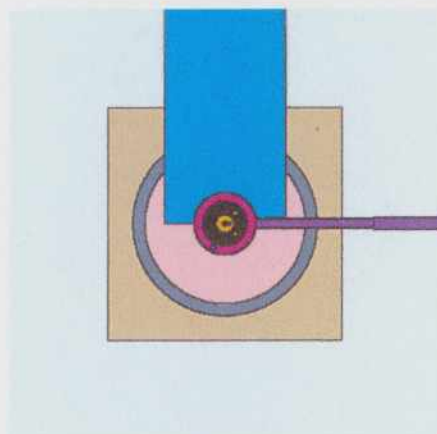


Figura. A2: Canal de entrada de la columna Rápida

- Una Columna Térmica de Grafito que permite irradiar muestras y la instalación de dispositivos para experiencias con neutrones térmicos. Se utiliza un Stringer, que es un bloque de grafito de  $4 \times 10 \text{ cm}^2$  de sección y un largo de 80 cm ubicado en el orificio de la columna. Tiene 17 agujeros verticales que permite alojar el dispositivo a irradiar a distintas distancias del núcleo. El Flujo Térmico es de  $5 \times 10^{10} \text{ n/seg.cm}^2$  (Figura A3).

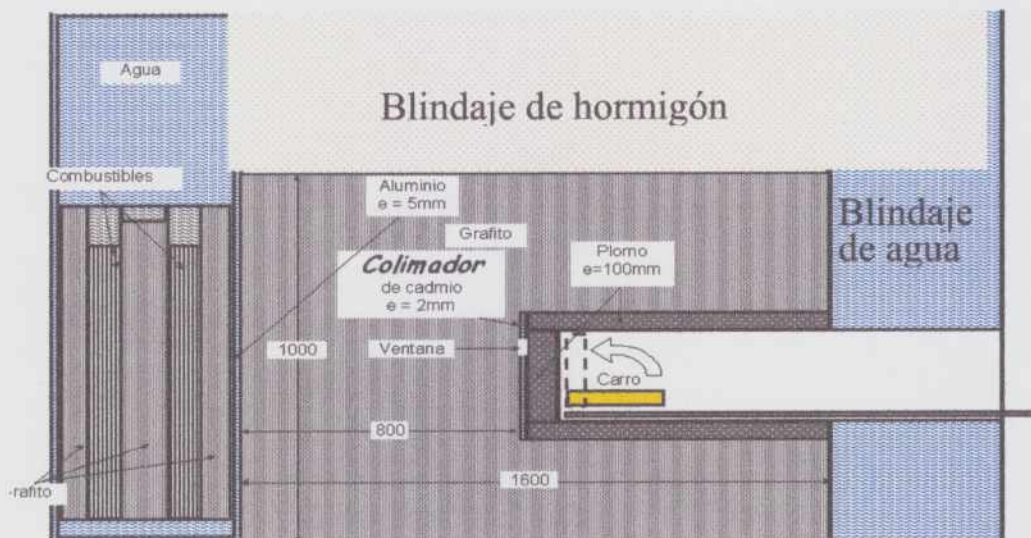


Figura A3: Columna Térmica

## 2. Control del Reactor

El control del reactor se efectúa a través de cuatro barras de cadmio envainadas en acero inoxidable simétricamente distribuidas. Las barras están acopladas mediante electroimanes a los mecanismos de accionamiento ubicados en una estructura metálica sobre el blindaje del reactor.

### 3. Sistema de Refrigeración

El sistema de refrigeración está constituido por un circuito de refrigeración primario básicamente compuesto por una o dos bombas de circulación, dependiendo de la potencia de trabajo, y un intercambiador de calor y un circuito de refrigeración secundario, cuyos componentes principales son una torre de enfriamiento, una bomba de circulación y el lado secundario del intercambiador de calor. Dos torres de desmineralización con resinas aniónicas y catiónicas mantienen la pureza del agua en los valores requeridos (Figura A4).

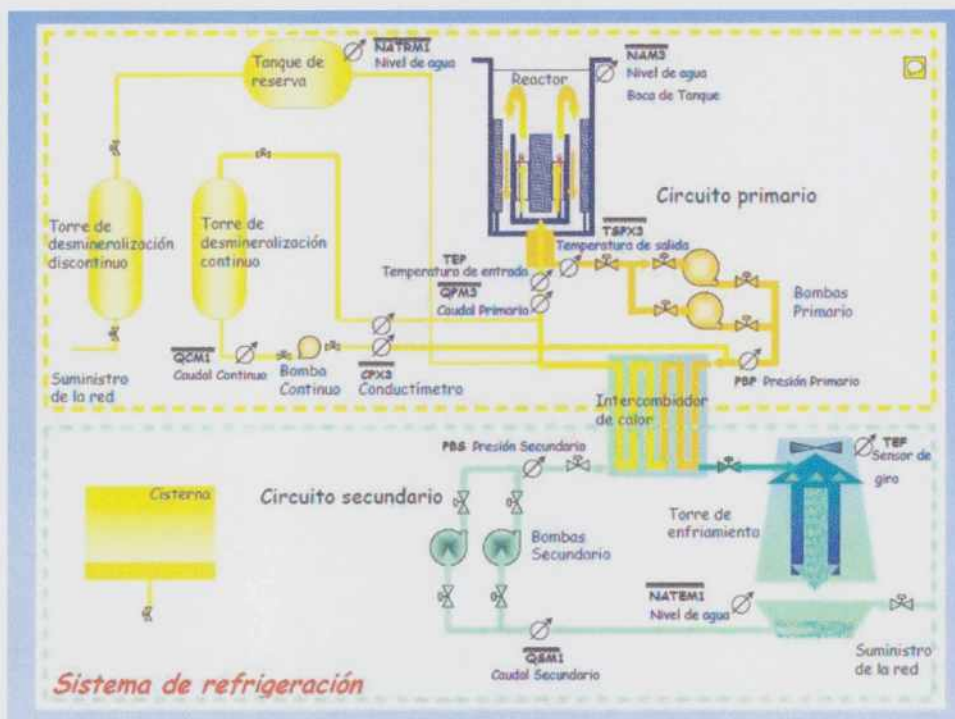


Figura A4: Sistema de refrigeración