

## **REDISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA NUEVA INSTALACIÓN DE NEUTROGRAFÍA DEL RA-6**

Marín, J.<sup>1</sup>, Sánchez, F. A.<sup>1</sup>, Blaumann, H.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Centro Atómico Bariloche, CNEA, Av. Bustillo 9500, 8400 Bariloche, Argentina  
E-mail: jhmarin@cab.cnea.gov.ar*

### **Resumen**

La neutrografía es un tipo de ensayo no destructivo en el que se registra una imagen de la atenuación que sufre un haz colimado de neutrones al atravesar una muestra. Dicha imagen se logra al emplear una placa sensible a neutrones. Las posibles aplicaciones son muy variadas, algunas de ellas incluyen: servicios a industrias, estudios de explosivos, análisis de piezas de patrimonio cultural y estudios de distribución de hidrógeno.

La actual instalación de neutrografía se encuentra en el reactor RA6 del Centro Atómico Bariloche. Debido al cambio de núcleo y al consiguiente aumento de potencia de dicho reactor, ha sido necesario un rediseño de la instalación. En el transcurso del último año se han diseñado y construido las piezas que la constituyen y en abril de 2012 se ha montado la instalación. El sistema implementado es de neutrografías on-line. El área máxima de estudio es de 20 cm x 20 cm. Las imágenes obtenidas son registradas con una cámara CCD cuya resolución es de 2776 x 2074 píxeles y 65536 niveles de gris.

En este trabajo se presentan los primeros pasos de la caracterización de la instalación que incluyen mediciones de flujos neutrónicos y tasas de dosis. Además, para evaluar la funcionalidad, se han tomado imágenes de diferentes objetos como la imagen que se muestra en la Fig 7. Los resultados obtenidos indican el buen desempeño de la instalación y su variado potencial.

## **REDESIGN, CONSTRUCTION AND CHARACTERIZATION OF THE NEW NEUTRON RADIOGRAPHY FACILITY OF THE RA-6**

### **Abstract**

Neutron radiography is a non-destructive test in which it is registered an image of the attenuation experienced by a collimated neutron beam while it passes through a sample. The image is generated by using a neutron-sensitive screen. The applications of this technique are wide, some of them include: services to industries, study of explosives, study of pieces belonging to cultural heritage and studies of the distribution of hydrogen.

The actual neutron radiography facility is placed in the RA-6 reactor at the Centro Atómico Bariloche. Due to the reactor's nucleus change and the subsequent power raise, it has been necessary to redesign the facility. During the last year the pieces that constitute it had been designed and built. In April 2012 the facility has been mounted. The system employed is of on-line neutron radiographies. The maximum area of study is of 20 cm x 20 cm. The images obtained are registered by a CCD camera, whose maximum resolution is of 2776 x 2074 pixels and 65536 gray levels.

In this work the initial steps towards characterization of the facility are presented, these include neutron fluxes and dose rates levels determinations. Also, in order to evaluate the functionality, images of several objects have been taken, as the one shown in Fig. 7. The results obtained reveal the good performance of the facility and its wide potential.

## **1. Introducción**

La radiografía con neutrones o neutrografía es una técnica no destructiva que permite inspeccionar la estructura interna de dispositivos y materiales. Para su obtención se requiere una fuente de neutrones, colimadores que conforman geoméricamente el haz y un dispositivo de detección sensible a neutrones que permita generar una imagen (ver Fig. 1).

Prácticamente desde el origen del RA-6 ha existido una instalación destinada a neutrografía, la misma ha ido evolucionando a la par de las nuevas tecnologías disponibles. La última modificación realizada aprovecha el aumento de potencia del reactor para optimizar las nuevas prestaciones disponibles. Por este motivo, la instalación se ha rediseñado completamente, se han perfeccionado los blindajes y el sistema de adquisición [1, 2].

## **2. Comparación entre neutrografía y radiografía convencional**

La radiografía con neutrones es básicamente similar a la radiografía con rayos X ya que ambas técnicas emplean un haz de radiación que se atenúa al atravesar un objeto, de este modo se obtienen imágenes de detalles macroscópicos del mismo. En el caso de la neutrografía, los rayos X o gamas son reemplazados por un haz de neutrones. Dado que las características de absorción de la materia para los rayos X y los neutrones son muy distintas, las dos técnicas en general se complementan [3].

Una importante ventaja del empleo de neutrones es que con ellos se logra fácilmente la observación radiológica de ciertas combinaciones de materiales debido a las diferencias en la atenuación, lo que sería problemático en el caso de usar rayos X. Por ejemplo, hay materiales que presentan alta atenuación para los neutrones (hidrógeno, litio, boro, cadmio, varias tierras raras). Estos materiales pueden distinguirse con neutrones aun cuando estén combinados con materiales de alto peso atómico como el acero, plomo o bismuto. Por otro lado, las diferencias en la atenuación de neutrones, a menudo se encuentran entre dos materiales vecinos en la tabla periódica, lo que ofrece una ventaja para discriminar entre materiales que tendrían características de atenuación similares en una radiografía de rayos X [3].

Los rayos X interactúan principalmente con los electrones de los átomos. Así, cuanto más electrones tenga un dado átomo (mayor número atómico), será más alta la probabilidad de interacción. Es por eso que los rayos X son buenos para estudiar material biológico (compuesto principalmente de hidrógeno). Los neutrones, en cambio, interactúan con los núcleos atómicos y su atenuación depende de la sección eficaz nuclear del material estudiado. Así, los neutrones pueden atravesar importantes espesores metálicos pero son frenados por pocos centímetros de agua. En la Figura 2 se compara la sensibilidad de las dos técnicas para distintos elementos.

## **3. Elementos que constituyen la instalación**

### ***3.1. Fuente de neutrones***

Los neutrones son extraídos a través del Conducto Pasante Número 1. Este conducto es un tubo de acero inoxidable que apunta radialmente hacia el núcleo. El mismo penetra el blindaje biológico de hormigón armado y el agua de la pileta del reactor hasta

alcanzar la parte posterior del reflector de grafito. El conducto puede inundarse cuando la instalación se encuentra fuera de operación. Existe además un carro de plomo (*shutter*) que puede desplazarse para obstruir el haz y blindar de este modo la radiación gama.

Se han realizado pruebas en la instalación de neutrografía empleando el reactor a potencias de 500 kW y 1 MW.

### ***3.2. Interior del conducto pasante***

En el interior del conducto pasante se coloca un dispositivo que alberga un colimador y un delimitador en compartimentos estancos y que permite inundar el conducto manteniendo secos estos componentes para que no sufran oxidación. En el compartimento más próximo al núcleo se coloca el colimador propiamente dicho, y en el otro compartimento se ubica el delimitador. Un tubo perforado separa los dos componentes dentro del conducto para que los neutrones alcancen el sistema de detección con la geometría y colimación apropiada (ver Fig. 3).

### ***3.3. Colimador y filtros***

El objetivo del colimador es reducir la divergencia angular del haz de neutrones. El grado de colimación está dado por la relación  $L/D$ , donde  $L$  es la distancia a la fuente y  $D$  es el diámetro visible de la fuente desde la muestra. En este caso se ha decidido establecer como parámetro de diseño un  $L/D = 100$ .

La colocación de materiales absorbentes muy cerca de la fuente produce que estos se activen permanentemente, por esta razón se ha preferido utilizar un diseño de colimador doble cónico [4] ubicado a un metro de la fuente.

El cono convergente de entrada mide 200 mm de longitud y está hecho de poliboro (polietileno con 5% de boro). Su función es colimar neutrones térmicos y epitérmicos. Una placa de cadmio con un orificio de 31 mm de radio colima con precisión el haz térmico. Un cono divergente de plomo de 200 mm de largo reduce la componente gama sin afectar la colimación neutrónica. Finalmente, los filtros de zafiro reducen la componente de neutrones epitérmicos y rápidos, con poca perturbación relativa a la componente de neutrones térmicos [4].

### ***3.4. Delimitador***

Para la conformación se emplea una combinación de barreras para blindar neutrones y gamas de modo de quitar toda la radiación que no se encuentre encuadrada hacia la placa. El delimitador está compuesto de poliboro y plomo y su interior tiene forma de pirámide truncada, de manera que se conforma la sección transversal del haz a las dimensiones de la placa centelladora (20 cm x 20 cm).

### ***3.5. Blindajes***

Para que la radiación quede confinada en la instalación de neutrografía se utiliza un *beam catcher*, que permite terminar el recorrido del haz, y un blindaje externo.

El *beam catcher* es un cilindro de hormigón pesado que está montado sobre rieles para permitir su desplazamiento. A partir de simulaciones se ha encontrado que la radiación que impacta sobre el *beam catcher* produce radiación dispersa hacia atrás. Otra fuente de radiación que debe considerarse es la radiación dispersada por las muestras. Para

reducir ambas fuentes, se ha diseñado un blindaje externo que rodea el recorrido del haz fuera del blindaje biológico. El blindaje realizado consiste en una parte interna compuesta de parafina borada y una parte externa hecha de plomo [5].

Para posicionar la muestra se contempló una apertura en el blindaje de 40 cm x 40 cm, ésta puede cerrarse por medio de una puerta escalonada hecha de poliboro y plomo. Como se pretende una instalación de gran versatilidad se ha tenido en cuenta la posibilidad de analizar muestras cuya longitud supere las dimensiones de la placa centelladora (para lo cual se tomarían varias neutrografías desplazando la muestra). Por dicho motivo se han creado dos puertos de acceso removibles de 20 cm x 20 cm en las partes superior e inferior de la instalación. Por último, se han dejado dos orificios con forma de pirámide truncada necesarios para el sistema óptico. Si bien estrictamente se requiere solo uno de ellos, el segundo fue realizado en caso de que la cámara quiera usarse en otra posición.

La forma del blindaje es aproximadamente cúbica y tiene un espesor de 30 cm de parafina borada seguido de una pared de plomo de 2.5 cm de grosor (ver Fig. 4). La puerta y los puertos están compuestos de tres escalones de poliboro cuyo espesor total es de 30 cm y una plancha de plomo de 2.5 cm de grosor. En cuanto al peso de la instalación, las estimaciones indican que estaría cercano a los 2700 kg, valor que se encuentra por debajo de la capacidad máxima del puente grúa y más por debajo aún del límite de peso que soporta el piso del hall del reactor.

Para sostener el blindaje se ha diseñado una mesa de acero que posee seis patas para distribuir el peso. Cada una de ellas tiene un tornillo con el que puede regularse la altura, lo que posibilita corregir la alineación de la instalación.

### ***3.6. Sistema de detección***

Los neutrones transmitidos a través de la muestra inciden sobre una placa centelladora que produce luz visible. La placa centelladora empleada es de ZnS(Ag) con  $^6\text{LiF}$ , mide 20 cm x 20 cm y fue fabricada por Applied Scintillation Technologies. La imagen que se produce en la placa es registrada por una cámara digital sensible a bajos niveles de iluminación. El modelo de la cámara es Penguin 600 CLM de Pixera Corporation, posee una resolución máxima de 2776 x 2074 píxeles y un conversor A/D de 16 bits lo que le permite discriminar 64000 niveles de gris. A la cámara se le monta una lente, en este caso de marca Schneider Kreuznach que tiene un factor  $f$  de 0.95.

El registrado de la imagen se realiza de modo indirecto para evitar que la radiación dañe el sensor CCD de la cámara, para ello se utiliza un sistema de dos espejos cuyas caras reflectoras se hallan por delante del vidrio y de este modo se evitan distorsiones ópticas. Todo el sistema óptico se encuentra dentro una caja oscura para evitar otras fuentes de luz que reduzcan el contraste. La caja oscura posee un blindaje hecho de 5 cm de poliboro y 2.5 cm de plomo para proteger la cámara de la radiación. El almacenamiento de las imágenes obtenidas se realiza con una computadora.

Para adquirir las imágenes hay diferentes opciones que brinda el programa de la cámara digital, las más importantes son: la variación del tiempo de adquisición de cada imagen y la captura de una sucesión de imágenes para promediarlas o sumarlas. El tiempo de adquisición depende de la configuración del programa, típicamente implica unos 20 segundos. Es recomendable adquirir una imagen sin ninguna muestra para posteriormente poder analizar el fondo y eventualmente efectuar una sustracción digital del mismo.

## 4. Mediciones realizadas en la instalación

Se han analizado dos configuraciones para la instalación de neutrografía. La primera en ser implementada, de ahora en más denominada Configuración A, consiste en un filtro de zafiro de longitud total igual a 5 cm. La segunda configuración (Configuración B), incluye un filtro constituido por tres zafiros (longitud total: 15 cm), un recubrimiento de cadmio en el interior del delimitador y un blindaje adicional de plomo que rodea el haz y que se haya ubicado entre el blindaje principal y el *shutter*.

### 4.1. Mediciones de flujo

Las condiciones de operación del reactor cambiaron entre las configuraciones A y B, como resultado, los flujos neutrónicos varían y es necesario caracterizar ambas condiciones.

En el caso de la Configuración A, el reactor fue operado a 1 MW y se lograron medir las componentes térmica, epitérmica y de neutrones rápidos. Bajo la Configuración B, el reactor se operó a 500 kW y se midieron las componentes térmica y epitérmica. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla I. Puede notarse que con el incremento del espesor de filtro, el haz pierde intensidad pero se vuelve más puro dado que se incrementa su componente térmica respecto a la componente epitérmica.

### 4.2. Mediciones de tasas de dosis

Además de las mediciones de flujo, es importante determinar las tasas de dosis en los alrededores de la instalación. Se seleccionaron varios puntos de interés para tomar mediciones, ellos se esquematizan en la Figura 5. Tanto las tasas de dosis gama como las neutrónicas fueron determinadas bajo las dos configuraciones. En ambos casos el reactor operó a 500 kW. Los resultados se muestran en la Tabla II.

En prácticamente todos los puntos estudiados, las tasas de dosis se redujeron marcadamente para la Configuración B. Esta es la razón por la cual esta configuración fue propuesta. Las lecturas tomadas en los puntos 5 y 9 sugieren que en esas posiciones el blindaje debería ser mejorado. Basado en los resultados de los puntos 6M y 10M, podría reemplazarse la barrera de hormigón armado que actualmente rodea la instalación por una barrera más liviana (por ej. una cadena que delimite el área de la instalación) que aliviaría así el piso del hall del reactor y permitiría una visualización directa de la instalación.

Para obtener conclusiones definitivas se requieren más mediciones, entre ellas las correspondientes a la Configuración B bajo una potencia de operación de 1 MW.

## 5. Ejemplos de neutrografías tomadas en el RA-6

La primer neutrografía obtenida en la nueva instalación se muestra en la Figura 6. La imagen fue tomada con un tiempo de exposición de 10 segundos con el reactor operando a 1 MW, bajo la Configuración A. La imagen fue post procesada, se le realizó una sustracción del fondo, un aumento de contraste y se le aplicó un filtro de mediana. En el centro de la imagen se observa la estructura interna de un antiguo reloj de bolsillo. En la izquierda, se estudiaron cuatro tipos de cinta adhesiva, empezando desde arriba: cinta americana (*duct tape*), cinta de enmascarar, cinta aisladora y cinta scotch. Fueron analizadas para determinar cuál era la más adecuada para sostener muestras en futuras

neutrografías. A partir de los resultados obtenidos, las mejores elecciones serían la cinta de enmascarar y la cinta scotch. Finalmente, en la parte inferior de la imagen, se estudiaron dos chips TLD. El chip de la izquierda (cuadrado oscuro) es un TLD-600 compuesto de  $^6\text{LiF}$ , el chip de la derecha (cuadrado gris) es un TLD-700 compuesto de  $^7\text{LiF}$ . Ambos fueron ubicados en un sostén de aluminio. La calidad de la imagen en general es satisfactoria, en particular considerando los cambios de contraste observados para las cintas adhesivas y los dosímetros.

Otra imagen con neutrones tomada en el RA-6 es una imagen clásica en el ámbito de la neutrografía que muchos autores han reproducido en sus instalaciones (ver Fig. 7). En ella se estudió una rosa (que por ser un elemento orgánico tiene alto contenido de hidrógeno), colocada dentro de un recipiente metálico. La imagen mostrada no tiene procesamiento aplicado. Fue obtenida bajo la Configuración A, con una potencia de reactor de 1 MW y un tiempo de adquisición de 9 segundos. Los neutrones atraviesan fácilmente el metal pero son frenados por el alto contenido de hidrógeno de la rosa. En la base puede verse la rosca del recipiente y cerca del eje vertical se distingue una línea que es la costura del mismo.

## 6. Conclusiones

Una nueva instalación de neutrografía se ha desarrollado en el reactor RA-6 del Centro Atómico Bariloche. La instalación permite tomar imágenes neutrónicas de buena calidad con tiempos de exposición menores al minuto. Los primeros resultados indican que tendrá gran utilidad para el estudio de materiales. Actualmente se continúa con la puesta a punto y caracterización de la instalación.

## 7. Referencias

- [1] Caracterización y optimización de la facilidad de radiografía con neutrones on-line del reactor RA-6. Federico Mezio. 2007. Proyecto Final de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro. Disponible en <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/>
- [2] Rediseño de la facilidad de neutrografía del RA-6 y su aplicación a la tecnología del hidrógeno. Darío Pieck. 2009. Proyecto Final de la Carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro. Disponible en <http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/>
- [3] Standard Practices for Thermal Neutron Radiography of Materials. ASTM E748-02.
- [4] F. Sánchez. Diseño conceptual de la facilidad de radiografía neutrónica del RA-6. Informe técnico CNEA-CAB IT 47/012/10.
- [5] F. Sánchez. Comparación de los campos radiantes calculados para la facilidad de neutrografía. Informe técnico CNEA-CAB IT 47/027/10.

## 8. Figuras y tablas

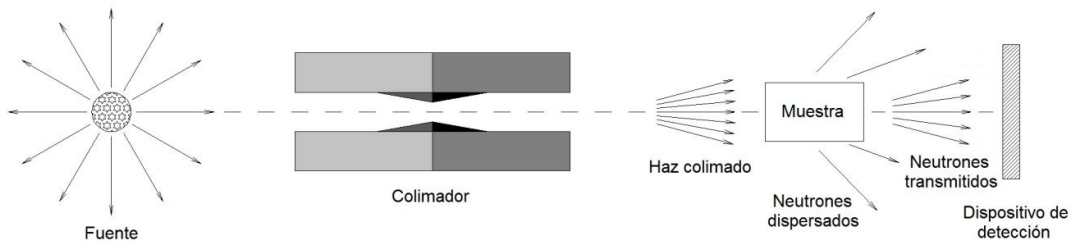


Fig. 1 – Generación de una neutrografía.

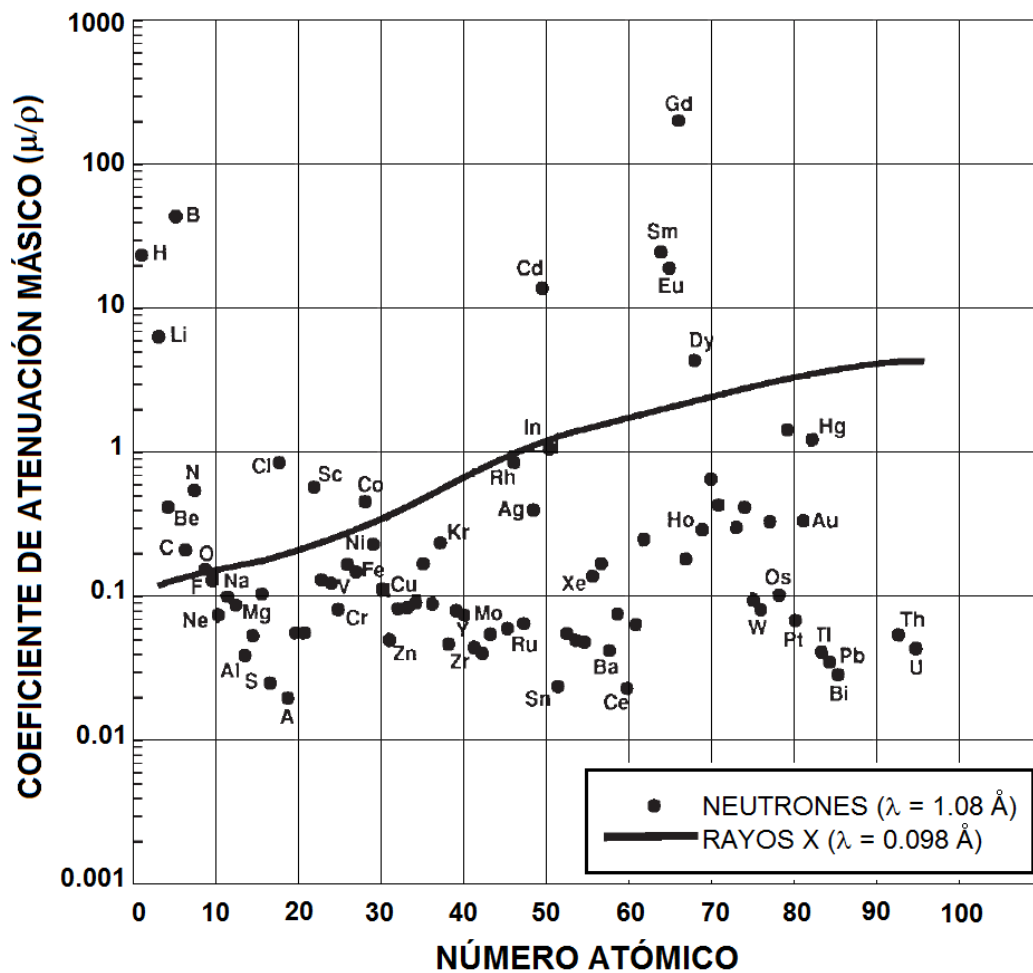


Fig. 2 – Coeficiente de atenuación másico en función del número atómico para diversos elementos. Se comparan los coeficientes de atenuación másicos de neutrones y rayos X.

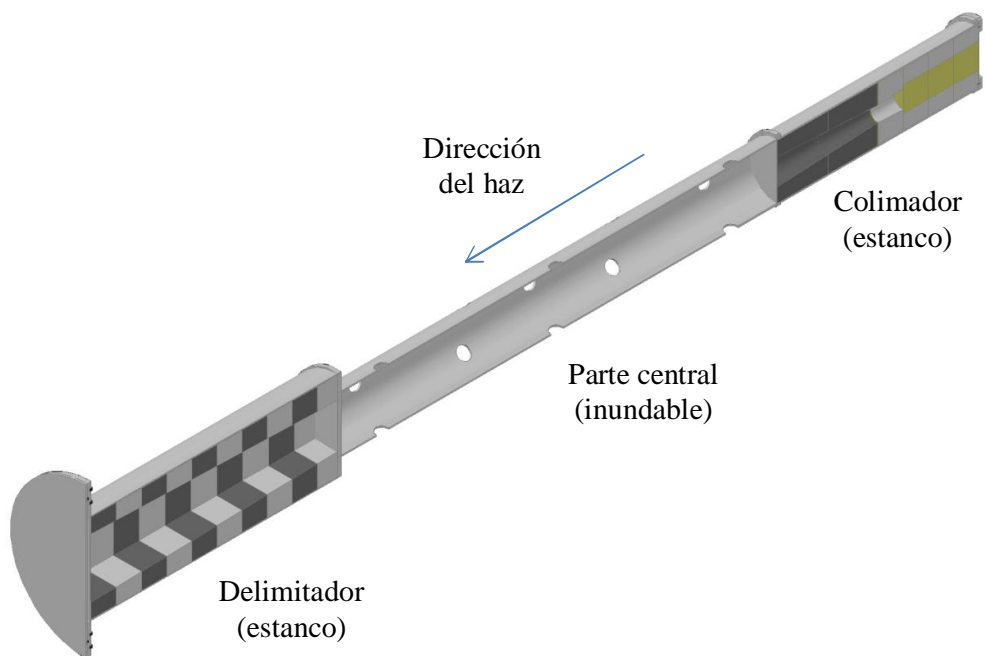


Fig. 3 – Corte del tubo de aluminio que alberga el colimador.

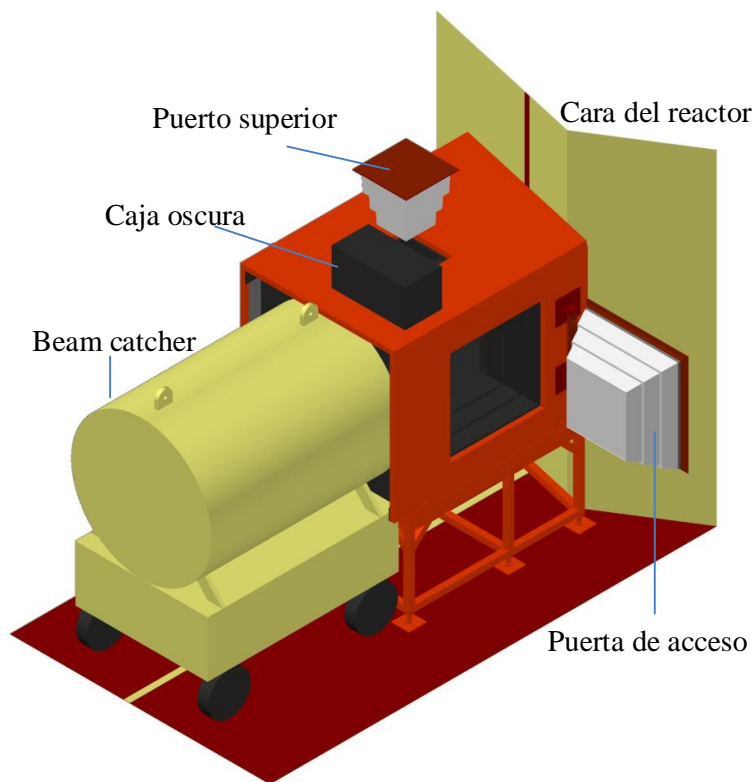


Fig. 4 – Modelo general de la instalación.



TABLA I: Flujos neutrónicos medidos para las dos configuraciones.

	Configuración A	Configuración B
Potencia de Operación	1 MW	500 kW
Neutrones térmicos	$8.40 \times 10^6$ n/cm <sup>2</sup> s	$1.21 \times 10^6$ n/cm <sup>2</sup> s
Neutrones epitérmicos	$1.70 \times 10^5$ n/cm <sup>2</sup> s	$3.18 \times 10^3$ n/cm <sup>2</sup> s
Neutrones rápidos	$2.96 \times 10^6$ n/cm <sup>2</sup> s	-

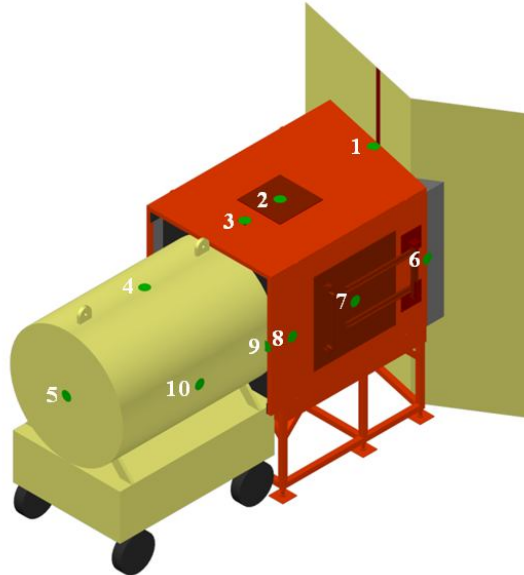


Fig. 5 – Puntos de medición escogidos.

TABLA II: Tasas de dosis para gamas y neutrones a 500 kW.

Punto	Tasa de dosis gama ( $\mu$ Sv/h)		Tasa de dosis neutrónica ( $\mu$ Sv/h)	
	Config A	Config B	Config A	Config B
<b>1</b>	59	27,3		
<b>2</b>	80	66,6		
<b>3</b>	250			
<b>4</b>	176	62,2		
<b>5</b>	560	240	23	7
<b>6</b>	152	26,5	130	38
<b>6M</b>	25,6	25,5	50	8
<b>7</b>	97	73	50	11
<b>8</b>	180	119		
<b>9</b>	526	230	280	44
<b>10</b>	130	40		
<b>10M</b>	23	27		

6M y 10M son puntos de medición tomados a un metro de 6 y 10 respectivamente.

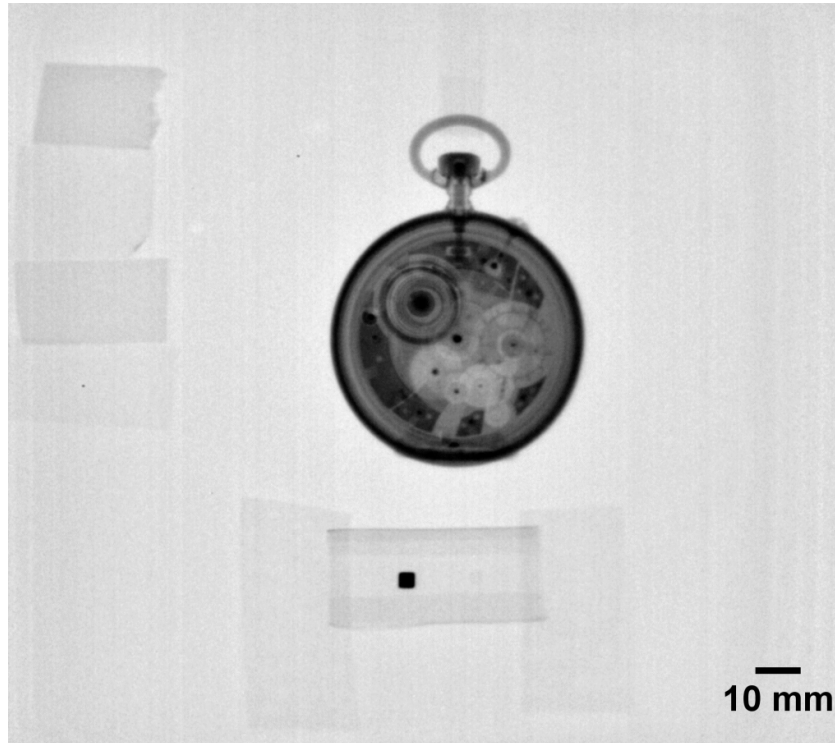


Fig. 6 – Primer neutrografía obtenida en la nueva instalación del RA-6.

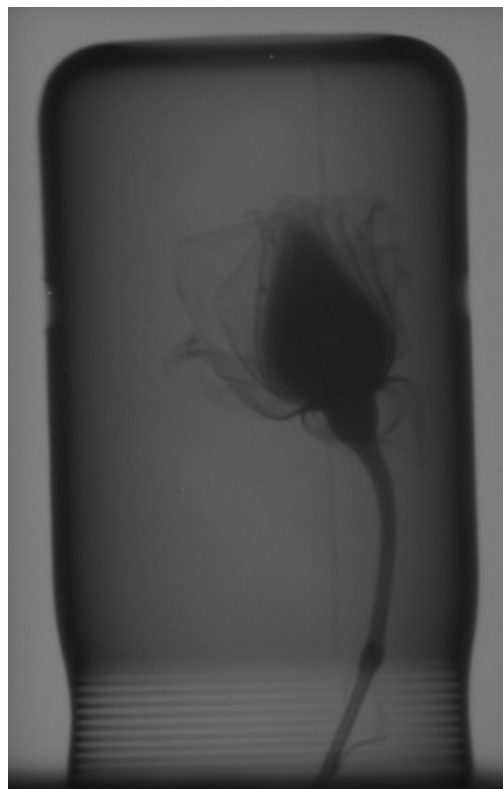


Fig. 7 – Neutrografía de una rosa en un recipiente metálico.