

## **Alineamiento óptico y caracterización del haz neutrónico radial No. 4 del reactor nuclear RP-10**

Alcides López<sup>1,2,\*</sup>, Javier Gago<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dirección de Investigación y Desarrollo, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería. Av. Tupac Amaru No. 210, Lima 25, Perú

### **Resumen**

Se muestra el proceso de alineamiento del eje óptico del dispositivo neutrográfico y el eje óptico del haz de neutrones provenientes del ducto radial número 4 del Reactor Nuclear RP-10 aplicando métodos ópticos, asistidos por la técnica radiográfica que facilita la ubicación del eje óptico del haz de neutrones en el espacio mediante registro fotográfico permitiendo posteriormente el alineamiento del neutrógrafo. En el proceso, la ubicación y orientación de la fuente depende de la colocación de los elementos combustible y del ducto inmerso entre el núcleo y el colimador en la pared del Reactor Nuclear, esta parte del proceso depende del personal de operación del reactor quienes calculan de manera óptima el quemado del combustible y hacen el análisis de la distribución espacial de la radiación. La medición de la potencia y finalmente el ajuste del eje óptico del haz de neutrones con el eje óptico del instrumento son mostrados en este trabajo que permitirá hacer experimentos de neutrografía, difracción de neutrones, espectroscopia de neutrones, óptica de neutrones entre otros.

### **Optical alignment and characterization of the radial neutron beam duct number 4 of de Nuclear Reactor RP-10**

#### **Abstract**

We show the process of optical axis alignment of the neutrography device and the optical axis of the neutron beam from the radial duct number 4 of the RP-10 Nuclear Reactor, using optical methods, assisted by radiography, which facilitates the location of the optical axis of the neutron beam by the photographic recording of the space, allowing the alignment of the neutrography plate later. In the process, the location and orientation of the source depends on the placement of the fuel elements immersed inside the duct and between the core and the collimator in the Nuclear Reactor wall. This part of the process depends on the reactor operating personnel who calculate optimally the fuel burn and perform the analysis of the spatial distribution of radiation. The power measurement and the final adjustment of the optical axis of the neutron beam with the optical axis of the instrument are shown in this paper, which will make possible neutrography experiments, as well as neutron diffraction, neutron spectroscopy and neutron optics among others.

#### **1. Introducción**

Existen sistemas ópticos que funcionan con radiación de neutrones, como son los difractómetros de ángulo doble (configuración Bragg Brentano) o de tiempo de vuelo (TOF), espectrómetros, neutrógrafos, etc. que como cualquier sistema óptico, requieren de una instalación apropiada para que tenga un funcionamiento eficiente, dicha instalación consiste básicamente en el alineamiento óptico, cuyo procedimiento consta de: 1) ubicación de la fuente, 2) orientación de la fuente, 3) análisis de la distribución espacial de la radiación, 4) medición de la potencia y 5) coincidencia del eje óptico del haz de radiación con el eje

óptico del instrumento [1]. Dado las características de la radiación neutrónica producida por el reactor nuclear RP-10 del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), la caracterización óptica del haz de neutrones del ducto No. 4 ha requerido de técnicas radiográficas para la localización espacial del eje del haz neutrónico, seguido de la medición del flujo neutrónico con la debida aplicación de los sistemas de protección y seguridad radiológica. En la parte de las aplicaciones, los difractómetros de neutrones dan información de la estructura cristalina que a diferencia de la difracción de

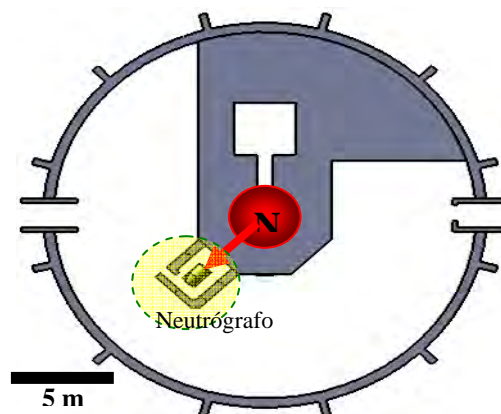
---

\* Correspondencia autor: alopez@ipen.gob.pe

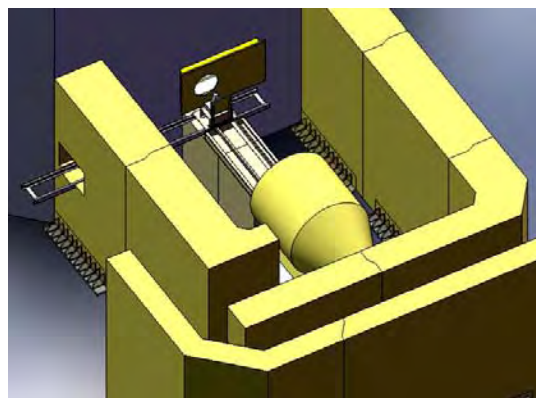
rayos X, dan información adicional de sus propiedades magnéticas, las espectroscopías dan información principalmente de la composición elemental, de otro lado la neutrografía o radiografía neutrónica es una técnica de ensayo no destructivo que permite ver o fotografiar el interior de estructuras sólidas por medio de un haz de neutrones, juega un importante rol en la medicina, biología y ciencia de los materiales aportando importantes aplicaciones en forma de imágenes [1-3]. Los materiales orgánicos o el agua atenúan fuertemente a los neutrones debido a su alto contenido de hidrógeno, mientras que muchas estructuras hechas con aluminio o acero resultan casi transparentes, muestra además una alta contrastación de materiales con similares densidades [1-5].

## 2. Experimental

El reactor nuclear RP-10 del IPEN consta, en su primera parte, de un núcleo **N** sumergido en una piscina conteniendo agua como moderador. El conducto de irradiación número 4 consta de un colimador cónico de bajo ángulo con sus paredes recubiertas de cadmio (Figura 1), una vista en perspectiva del neutrógrafo puede ser apreciada en la Figura 2 donde se muestra en primer plano los muros de protección. El colimador va dentro de la piscina y puede ser desplazado en forma vertical desde su posición normal de descanso, que está a 50 cm a arriba de la posición de irradiación, movimiento que se hace por medios electro-mecánicos (Figura 3). La segunda parte del colimador consta de dos cilindros recubiertos de cadmio cuyo objetivo es absorber los neutrones térmicos no colimados que salen de la base del colimador, al final de dichos cilindros se encuentra un grueso obturador de plomo y cadmio (**C** en la figura 3), que cubre la apertura del conducto y es controlado por un sistema neumático, inmediatamente después de la compuerta se ubica el sistema neutrográfico, tal como lo apreciamos en la figura 4. El blindaje con el exterior del conducto está conformado por paredes de hormigón, formando un recinto cerrado sin techo en cuyo interior se encuentra un atenuador de neutrones **A**, entre este atenuador y el núcleo **N** se encuentran la placa fotográfica y su respectiva placa scintiladora **P**, el objeto a ser neutrografiado **M** y la compuerta **C**.



**Figura 1.** Vista superior en corte del reactor nuclear RP-10 e instalaciones de neutrografía, **N** es el Núcleo.

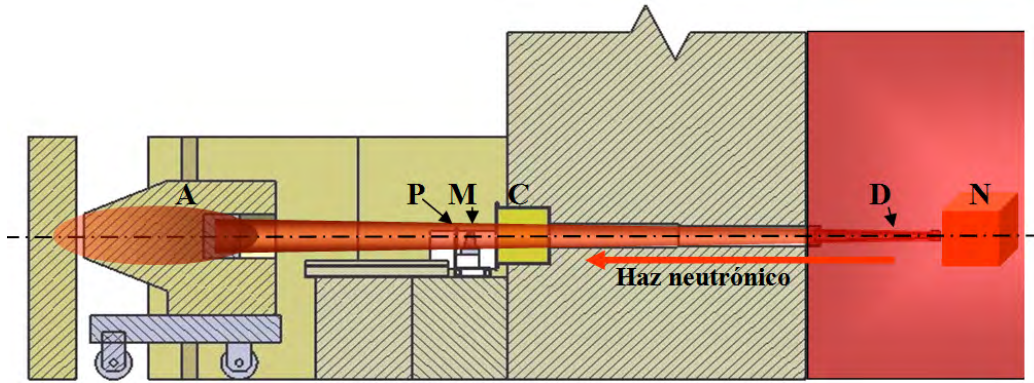


**Figura 2.** Vista panorámica del neutrógrafo asociado al reactor nuclear RP-10, rodeado de sus paredes de protección radiológica.

## 3. Resultados y Discusión

Para el alineamiento óptico del haz de neutrones se ha hecho uso de una guía de alineamiento tubular, tal como se aprecia en la Figura 5, colocada cerca del eje óptico y se han registrado una neutrografía al inicio y otra al final, (Figura 6) con la finalidad de conseguir el paralelismo del rayo neutrónico con el eje del dispositivo neutrográfico.

La guía de alineamiento consiste de un tubo de aluminio de 44 cm de longitud, 21 y 16 mm de diámetro externo e interno respectivamente, en la entrada del haz de neutrones tiene adosado un cilindro de plomo de 50 mm de diámetro exterior, en la salida tiene incrustado un cilindro de plomo de 20 mm de longitud y con un orificio en el eje de 3.5 mm, tal como se puede apreciar en la Figura 5.

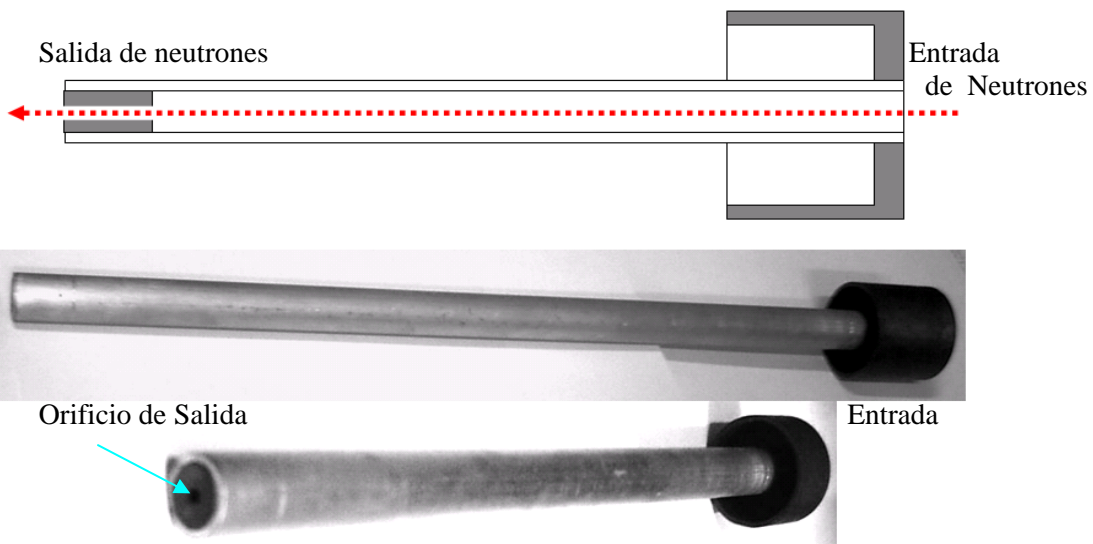


**Figura 3.** Vista esquemática del sistema óptico del neutrógrafo, mostrando el eje óptico y los componentes ópticos principales, Núcleo N, Ducto D, Compuerta C, Muestra M, Placa fotográfica P y Atenuador de neutrones A.

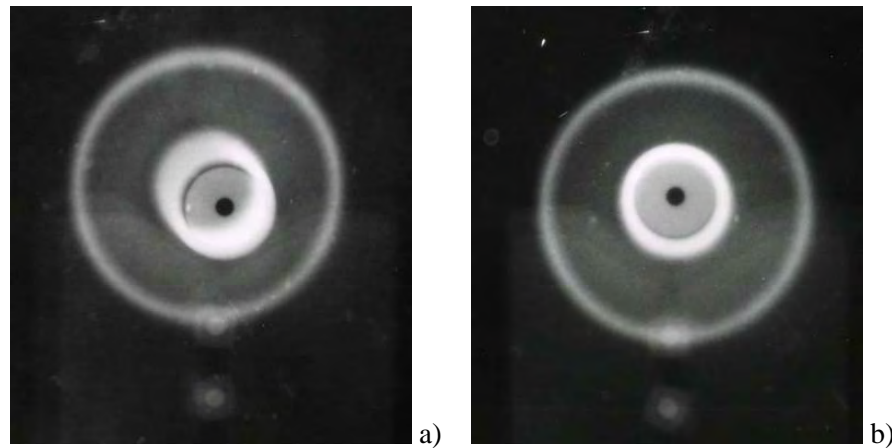


**Figura 4.** Instalación de una cámara de ionización en la salida del haz de neutrones del RP-10 para la correspondiente prueba neutrográfica, delante se aprecia parte del atenuador de neutrones A.

La neutrografía de la proyección de la guía de alineamiento muestra que la salida se encuentra desviada 6 mm hacia abajo y 5 mm hacia la izquierda con respecto al orificio de entrada (Figura 6a), en la segunda neutrografía se ha corregido el desalineamiento notándose que la salida ahora tiene un corrimiento de 1 mm hacia arriba, con lo cual nos encontramos muy próximos del alineamiento aceptable para distintos ensayos, especialmente de óptica de neutrones.



**Figura 5.** Guía de alineamiento tubular del haz neutrónico, el haz va de derecha a izquierda. a) Corte esquemático, b) Vista lateral y c) Vista mostrando la salida del extremo izquierdo.

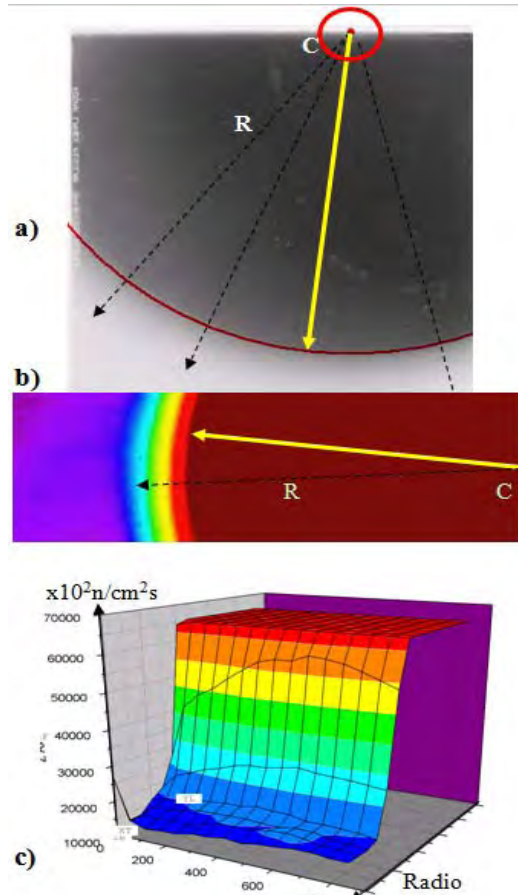


**Figura 6.** Neutrografías de la proyección de la guía de alineamiento, a) Sin alineamiento y b) Con alineamiento.

La caracterización del haz de neutrones de la salida número 4 del reactor RP 10, Figura 4, en donde se puede observar la compuerta de salida de los neutrones (flecha azul), en esta disposición se obtuvieron dos neutrografías en las que se tuvo por conveniente hacerlas fuera del centro, con el fin de estimar la distribución radial del flujo de neutrones a una distancia de 40 cm de la salida del ducto, de manera que también estuviera incluida la zona de penumbra o dispersión, para dicha caracterización se hizo el centrado de los arcos de circunferencia usando la opción de centrado del software “Diffraction”, la Figura 7a corresponde al registro neutrográfico de un sector del haz de neutrones con un flujo aproximado de  $6 \times 10^6 \text{ n/cm}^2\text{s}$ , se aprecia el centro del haz C y flechas radiales, la Figura 7b muestra la distribución del flujo neutrónico de un sector del haz y la Figura 7c presenta el perfil 3D de la distribución del flujo neutrónico del borde del mismo sector del haz, los colores rojo y marrón representan el flujo más elevado mientras que en el borde y hacia fuera encontramos ubicados a los colores verde azul y violeta como los flujos más bajos correspondiente a la zona de penumbra, disminuyendo hasta extinguirse suavemente con una tendencia lineal hasta un 70 % y alcanzando un radio de 14,5 cm, la tercera Zona III corresponde a la penumbra o dispersión alta, abarca desde un radio de 14,5 cm hasta decaer casi completamente con una tendencia lineal hasta un radio de 17 cm, la Tabla 1 resume las características del haz neutrónico.

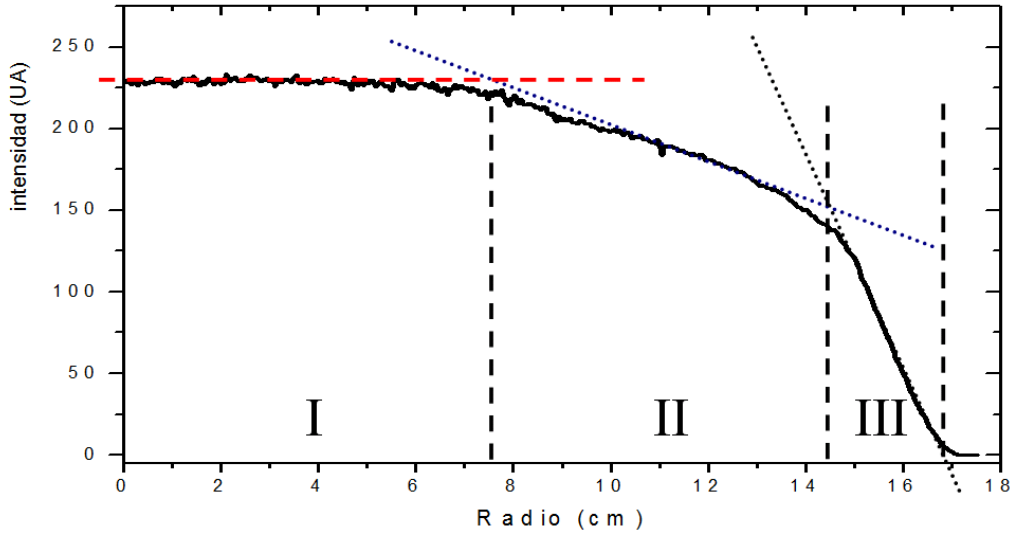
Para la medición del perfil de intensidad radial promedio se aplicó el software ImageJ

cuyo resultado de promediar 5 perfiles radiales obtenidos en la neutrografía se muestra en la Figura 7a, dicho perfil se muestra en la Figura 8, donde se aprecian tres zonas, la Zona I que corresponde a un haz de 7.5 cm de radio de flujo neutrónico muy regular, la Zona II es la zona de dispersión y envuelve a la Zona I decayendo el flujo neutrónico.



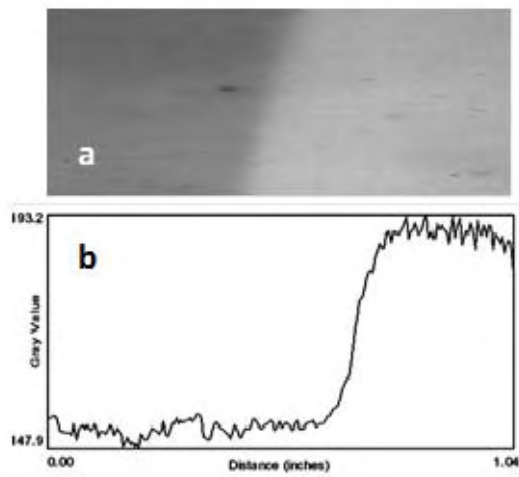
**Figura 7.** a) Neutrografía del haz, b) mapeo del flujo neutrónico de un sector del haz y c) perfil 3D de flujo neutrónico de un sector del haz.





**Figura 8.** Perfil radial promedio de intensidades del haz de neutrones a una distancia de 40 cm de la salida del ducto No. 4 del reactor RP-10 operando a 10 MW.

A fin de evitar efectos de la radiación gamma que frecuentemente acompaña a la radiación neutrónica interfiriendo con las neutrografías, debido a que tienen efectos diferentes con los neutrones se ha procedido a evaluar el grado de adición de señal sobre la de los neutrones. En la Figura 9 se aprecia dos zonas de una neutrografía, la más oscura corresponde a la zona sin filtro de radiación gamma, la más clara ha sido filtrada mediante una plancha de plomo de 12 mm de espesor y la razón de absorción de estos rayos ha resultado ser del 22 %, debiendo considerarse que el restante 78 % corresponde a la radiación neutrónica principalmente.



**Figura 9.** a) Registro fotográfico del haz de neutrones sin y con filtro de rayos gamma y b) Espectro de absorbancia de neutrones y rayos gamma.

**Tabla 1.** Distribución del flujo neutrónico en el haz No. 4 del reactor RP-10 operando a 10 MW.

Zona	Radio de zona (cm)	Flujo neutrónico $10^6 \text{ n/cm}^2\text{s}$	Tendencia
I	0 a 7.5	6	Constante
II	7.5 a 14.5	6 a 4.2	Lineal
III	14.5 a 17	4.2 a 0	Lineal

**4. Conclusiones**

El registro neutrográfico del haz de neutrones ha mostrado ser una gran herramienta para poder alinear un haz de neutrones con el eje de algún dispositivo óptico, que trabaje con neutrones, tales como un neutrógrafo, un difractómetro, un espectrómetro o simplemente un banco óptico. La caracterización del haz de neutrones nos muestra la distribución radial de la intensidad del mismo, en el caso del haz radial No. 4 del reactor RP-10 se observa gran homogeneidad hasta un diámetro de 15 cm, atenuándose ligeramente hasta un diámetro de 29 cm y extinguiéndose completamente a diámetros mayores a 32 cm. La presencia de la radiación gamma que acompaña al haz de neutrones también puede ser filtrado usando una placa de plomo de 12 mm de espesor.

**5. Agradecimiento**

Al Físico Ivan Lovato por la preparación del software Diffraction usado en el centrado del haz neutrografiado.

## 6. Referencias

[1] International Atomic Energy Agency. Neutron Imaging: A Non-destructive tool for materials testing. IAEA-TECDOC-1604. Vienna: IAEA; 2004.

[2] Shaikh AM. Development of neutron and x-ray detectors and neutron radiography at Barc. BARC Newslwttter. 2006 Oct; 273:8-23.

[3] Richards Wade J, Tuttle Michael J, Ulowetz, Kirsten, Mcgee Robert. Real-Time Neutron Radiography - Applications For The Automotive Industry. UC Davis: UCD

McClellan Nuclear Radiation Center. Retrieved from:

<http://www.escholarship.org/uc/item/35t9b89n>. 2003.

[4] Ravello Yuri. Caracterización y puesta a punto de la facilidad de neutrografía del reactor Nuclear RP-10. [Tesis Licenciado en Ciencias, mención Física]. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería; 2001.

[5] Munive Marco. Caracterización en energía de un haz de neutrones térmicos. [Tesis Licenciado en Ciencias, mención Física]. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería; 2000.