

## Distribución del flujo de neutrones térmicos en la zona activa de un reactor de impulsos periódicos

D. Pérez Martín

Unidad Presupuestada para la Construcción  
del Centro de Investigaciones Nucleares  
La Habana, Cuba

### Resumen

*En este trabajo se muestra cómo es posible obtener, utilizando el efecto de bloque superficial de la absorción de los neutrones, impulsos periódicos de neutrones en un reactor de investigación estacionario. Se dan los resultados experimentales logrados en la determinación de la distribución del flujo de neutrones térmicos en la zona activa y el reflector de un conjunto crítico con un modulador de la reactividad.*

### The Thermal Neutron Flux Distribution in the Core of Periodically Pulsed Thermal Reactor

### Abstract

*In this work it is shown how it is possible to obtain, by using the block effect of neutron absorption, periodically pulsed neutrons in a stationary research reactor. The experimental results obtained in determining the thermal neutron flux distribution in the core and the reflector of a critical assembly with a reactivity modulator are presented.*

### INTRODUCCION

Desde el surgimiento de los reactores nucleares en la década del 40, estos fueron también utilizados como fuente de neutrones para múltiples investigaciones, entre ellas la espectrometría neutrónica.

El método experimental más efectivo en la espectrometría neutrónica para obtener haces de neutrones monocromáticos es el de tiempo de vuelo. En los reactores de investigación estacionarios son utilizados los selectores mecánicos para los trabajos experimentales en espectroscopía neutrónica, pero en este caso solo se usan los neutrones generados en el reactor cuando el selector mecánico deja pasar el haz de neutrones y, por tanto, el 99% de ellos no se utiliza en los experimentos, consumiéndose en vano gran parte del precioso combustible nuclear. El desarrollo de este método ha estado dirigido al mejoramiento de las características de los selectores mecánicos, las técnicas de detección y, fundamentalmente, al aumento de la potencia para alcanzar flujos más elevados.

Según la opinión generalizada de muchos especialistas, el flujo de neutrones térmicos logrado en la actualidad en los reactores de investigación estacionarios del orden de  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>.s [1] es su límite, aunque técnicamente es posible aumentarlo hasta  $5 \cdot 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>.s [2]. Pero en este caso, la velocidad de quemado del combustible sería tan elevada que la campaña del reactor se limitaría varias semanas, lo que no es recomendable económicamente.

Por otro lado, el porcentaje de utilización de los neutrones generados en estos reactores es ínfimo al utilizarse el selector mecánico para los experimentos espectrométricos.

Fue por ello que ya desde 1955, D. I. Blojinsev propuso la construcción de un reactor que trabajara solo en los momentos en que el selector mecánico deja pasar el haz de neutrones; quiere esto decir que la mayor parte del tiempo laboraría en régimen subcrítico y que únicamente por un período muy pequeño ( $\sim 10^{-4}$ s) el reactor sería hipercrítico con neutrones instantáneos [1].

Para realizar esta idea, se utilizó el principio de hacer girar parte de la zona activa. De esta forma, solo cuando ambas partes coinciden se produce la hipercriticidad con neutrones instantáneos y un impulso de neutrones. El impulso de neutrones generado de esa manera posee una potencia máxima 4166 veces mayor a la potencia media en un período [3]. Este método usado en los reactores rápidos de impulso, como el IBR, IBR-30 [1], tiene la limitante fundamental para el aumento de la potencia en el desprendimiento de calor que se produce en el rotor del material fisionable. Por ello, en la variante más moderna de estos reactores rápidos de impulsos periódicos (IBR-2) se utilizó el principio de hacer girar el reflector de acero para que no se desprenda calor, como cuando se gira material fisionable, y se elevó la potencia en el máximo del impulso hasta 8300 MW, cifra 332 veces superior a la alcanzada en el IBR-30 [1].

El IBR-30 y el IBR-2 son los únicos reactores rápidos de impulsos periódicos que existen, y trabajan en la actualidad en Dubna.

Hay centenares de reactores rápidos y térmicos que laboran en régimen de impulso, pero son aperiódicos y de una duración del orden de los ms. Teniendo en cuenta que para la espectrometría neutrónica por tiempo de vuelo se necesi-

tan impulsos periódicos de una duración menor de los 0,1 ms, dichos reactores no pueden ser utilizados.

En este trabajo se muestra cómo fue posible lograr por primera vez, con el efecto de bloque superficial de la absorción de los neutrones, que un reactor de investigación estacionario (con neutrones térmicos) labore en régimen de impulsos periódicos. Se describe el sistema por el cual se modula la reactividad y se dan los resultados en la medición de la distribución del flujo de neutrones térmicos en la zona activa del conjunto crítico *Mayak*.

## REACTOR DE IMPULSOS PERIODICOS CON NEUTRONES TERMICOS

En los reactores térmicos, el tiempo de vida de los neutrones instantáneos es elevado ( $10^{-5}\text{s}-10^{-3}\text{s}$ ), si se compara con el de los reactores rápidos ( $10^{-9}\text{s}-10^{-7}\text{s}$ ). Por ello, para obtener un impulso en un reactor térmico que se iguale en duración al que se logra en un reactor rápido, es necesario alcanzar una velocidad de variación de la reactividad que es imposible en la práctica. Utilizando el principio de girar el reflector o parte de la zona activa en un reactor térmico, no es factible obtener impulsos de duración menores de 500 ms [4].

En un reactor térmico se puede usar el efecto de bloque superficial en la absorción de los neutrones en la zona activa, ya que existen materiales con una sección de absorción tan elevada que solo absorben neutrones en la capa superficial. El espesor de esta capa es del orden del recorrido libre medio de absorción  $\lambda_a = 1/\Sigma_a$ , donde  $\Sigma_a$  es la sección macroscópica de absorción. Para el cadmio,  $\lambda_a \approx 0,09$  mm. Esto quiere decir que las dos láminas superpuestas de cadmio de 0,09 mm de espesor cada una, tienen la misma capacidad de absorción que una lámina de 0,18 mm, pero al separarlas la superficie de absorción puede aumentar dos veces.

Este principio se llevó a la práctica construyendo un modulador de la reactividad (MR) en forma de cuatro cilindros concéntricos de diámetros diferentes, como se muestra en la figura 1. Sus características principales aparecen en la tabla 1.

Para optimizar las superficies angulares de los cilindros, que debían estar recubiertos de material absorbente, fueron realizados cálculos con distintos métodos y en diferentes superficies angulares recubiertas. Como resultado de ellos se escogió la variante mostrada en la figura 1.

Los cilindros *a*, *b*, y *c* van unidos por un reductor a un motor eléctrico que los hace girar en diferentes direcciones (*a* y *c* a favor de las manecillas del reloj, *b* en sentido contrario). El cilindro exterior (*d*) se encuentra fijado a la rejilla distanciadora de la zona activa del conjunto.

Estos cilindros están recubiertos a todo lo largo de la zona activa por una capa de cadmio, en un sector de  $80^\circ$  el cilindro *a*, de  $100^\circ$  los cilindros *b* y *c* y de  $120^\circ$  el cilindro *d*. En el momento en que ellos se encuentran superpuestos la absorción de los neutrones es mínima, y cuando forman una circunferencia la absorción es máxima. De esta forma, podemos variar la reactividad del conjunto crítico en

(3-4)  $\beta_{\text{ef}}$  y, por medio de un regulador y un estabilizador, la frecuencia con que se producen los impulsos en un rango de 0 a 100 Hz, aunque por problemas de seguridad los experimentos se realizan en las frecuencias de 6,25 Hz, 12,5 Hz y 25 Hz [5].

El modulador de la reactividad se coloca en el canal central seco de la zona activa del conjunto crítico, que tiene un diámetro de 110 mm. En el espacio interior del cilindro *a* se ubican 7 ELCOS del tipo EK-10 con moderador de cristal orgánico, lo que produce un aumento complementario de los parámetros de los impulsos neutrónicos [5].

## METODOLOGIA DE REALIZACION DE LOS EXPERIMENTOS

Los experimentos para determinar la distribución del flujo de neutrones térmicos en la zona activa y en el reflector del conjunto crítico, prototipo de un reactor de investigación VVR-2, fueron realizados en régimen subcrítico, con una fuente (Pu-Be) de una potencia de  $10^7$  n/s introducida en el centro de la zona activa en dos casos extremos:

1. Cuando todas las partes de los cilindros recubiertas de material absorbente se encuentran formando un sector (superpuestas); en este caso la absorción es mínima.
2. Cuando todas las partes de los cilindros recubiertas de material absorbente se encuentran desplazadas; en este caso cubren toda la superficie y se produce la absorción máxima del sistema.

Las mediciones fueron realizadas con dos contadores del tipo SNM-13. Uno de ellos estaba fijo en la celda 3-4-6, y se utilizó como monitor; el otro (analizador) se colocó, sucesivamente, en las celdas a investigar.

La nomenclatura de las celdas en el conjunto crítico es la siguiente:

Primera cifra: Número del sector en que se encuentra la celda.

Segunda cifra: Número de la fila, comenzando desde el modulador de la reactividad.

Tercera cifra: Número de la celda en la fila, contando en el sentido de las manecillas del reloj.

Las mediciones fueron realizadas a lo largo de los tres radios más característicos de la zona activa:

1. Frente al sector donde se superponen las partes de los cilindros recubiertos de material absorbente (sector 2).
2. Frente al sector opuesto al anterior (sector 5).
3. Frente al sector entre ambos casos extremos, donde las perturbaciones son menores (sector 4).

Además de los 2 canales de medición con contadores SNM-13, fueron utilizados en los experimentos 4 canales con cámaras de ionización del tipo KNA-56, conectadas a dos galvanómetros UI-12 y a dos reactímetros (PIR-2M y PIR-4).

Antes de realizar los experimentos, se desplazaron los elementos combustibles (ELCOS) del radio de investigación, los que fueron colocados en su lugar al terminar aquellos. De esta forma, es menor la perturbación creada por el

detector cuando es introducido en las celdas a investigar sucesivamente.

Para determinar el tiempo muerto de los canales de medición, fueron realizadas varias series experimentales. Las calibraciones de los canales de medición se hicieron antes y después de cada experimento, lo que se tuvo en cuenta al elaborar los resultados experimentales.

En la figura 2 se muestra un esquema de la zona activa. La configuración de esta zona corresponde a los máximos parámetros alcanzados por los impulsos periódicos cuando se gira el modulador de la reactividad en régimen cuasi estacionario, es decir, cuando la potencia media del conjunto crítico en un período de repetición de los impulsos no varía y los parámetros de los impulsos neutrónicos son estables.

La carga de la zona activa se realizó con ELCOS del tipo S-36 en la zona central EK-10 en la periferia. El completamiento de la carga de la zona activa para el régimen cuasi estacionario se efectuó solo con ELCOS EK-10 en la periferia.

### RESULTADOS EXPERIMENTALES

En las figuras 3 y 4 se muestra la distribución del flujo de neutrones térmicos en los casos extremos de absorción máxima y mínima. El valor del flujo se da en unidades relativas, es decir, en dependencia de la variación del flujo en la celda 3-4-6 (monitor) y teniendo en cuenta el tiempo muerto de los canales de medición ( $\tau$ ) y su calibración ( $c$ ).

Como resultado de los experimentos complementarios realizados se determinaron los valores de  $\tau$  y  $c$  siguientes:  $\tau \sim 8,8 \mu s$  y  $c = 1,006$ .

La distribución del flujo de neutrones térmicos en la zona activa y el reflector del conjunto crítico, obtenida como resultado de los experimentos, demostró que la perturbación creada por el modulador de la reactividad se extiende hasta la tercera fila de ELCOS y es menor que la lograda por el modelo de cinética puntual de la zona activa que suponía la extensión de esta perturbación hasta la quinta fila de ELCOS.

La existencia de la zona activa de 3 órganos de trabajo del sistema rápido de avería (BA3) produce también una perturbación del flujo de neutrones, como se ve en la figura 4.

Las barras de avería (A3) no provocan ninguna perturbación, por encontrarse levantadas al realizarse los experimentos.

En la figura 5 aparece la variación de la reactividad que se produce cuando giran las partes de los cilindros recubiertos de material absorbente desde la posición de absorción máxima a la mínima. En este caso (que se muestra en la figura 2), el modulador de la reactividad produce una variación de la reactividad desde  $-0,6 \beta_{ef}$  hasta  $-4,26 \beta_{ef}$  para la configuración.

### CONCLUSIONES

El presente trabajo demuestra:

1. Con un MR basado en el efecto de bloque superficial de la absorción de los neutrones en la zona activa, es posible modular la reactividad con una profundidad de  $(3-4) \beta_{ef}$ . Ello permite el trabajo en régimen de impulsos periódicos de un reactor de investigación estacionario, lo que aumenta considerablemente sus posibilidades experimentales. Esto se ha logrado por primera vez.
2. Podemos variar en este sistema la frecuencia con que se repiten los impulsos neutrónicos y, de esta forma, variar asimismo sus parámetros.
3. Como primera aproximación, puede ser utilizado el modelo de la cinética puntual para determinar algunas características de la zona activa.

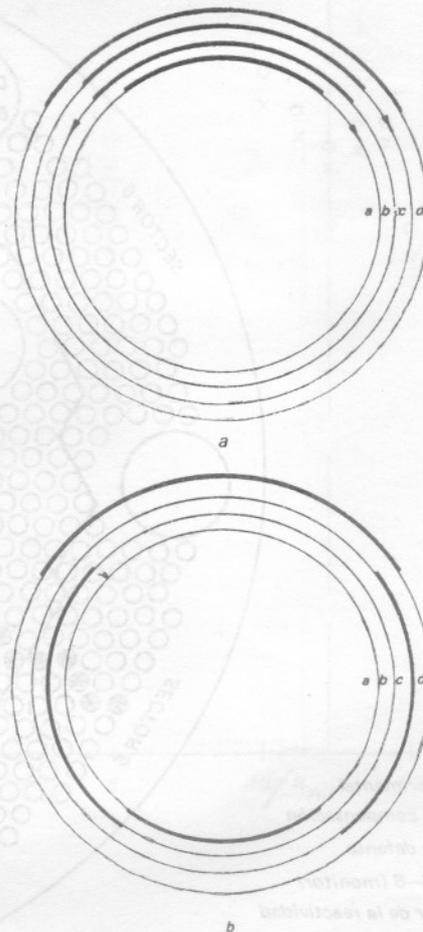


Fig. 1. Esquema del modulador de la reactividad en posición de absorción mínima (a) y máxima (b).

**Tabla 1**  
Características del modulador de la reactividad del conjunto crítico Mayak

Parámetro	Cilindro			
	a	b	c	d
Superficie angular recubierta de material absorbente (grados)	80	100	100	120
Velocidad de giro (unidades relativas)	1	1/2	1/2	0
Sentido de giro (*)	+	-	+	
Diámetro de los cilindros (mm)	70	80	90	100

(\*) + (-) a favor (en contra) de las manecillas del reloj.

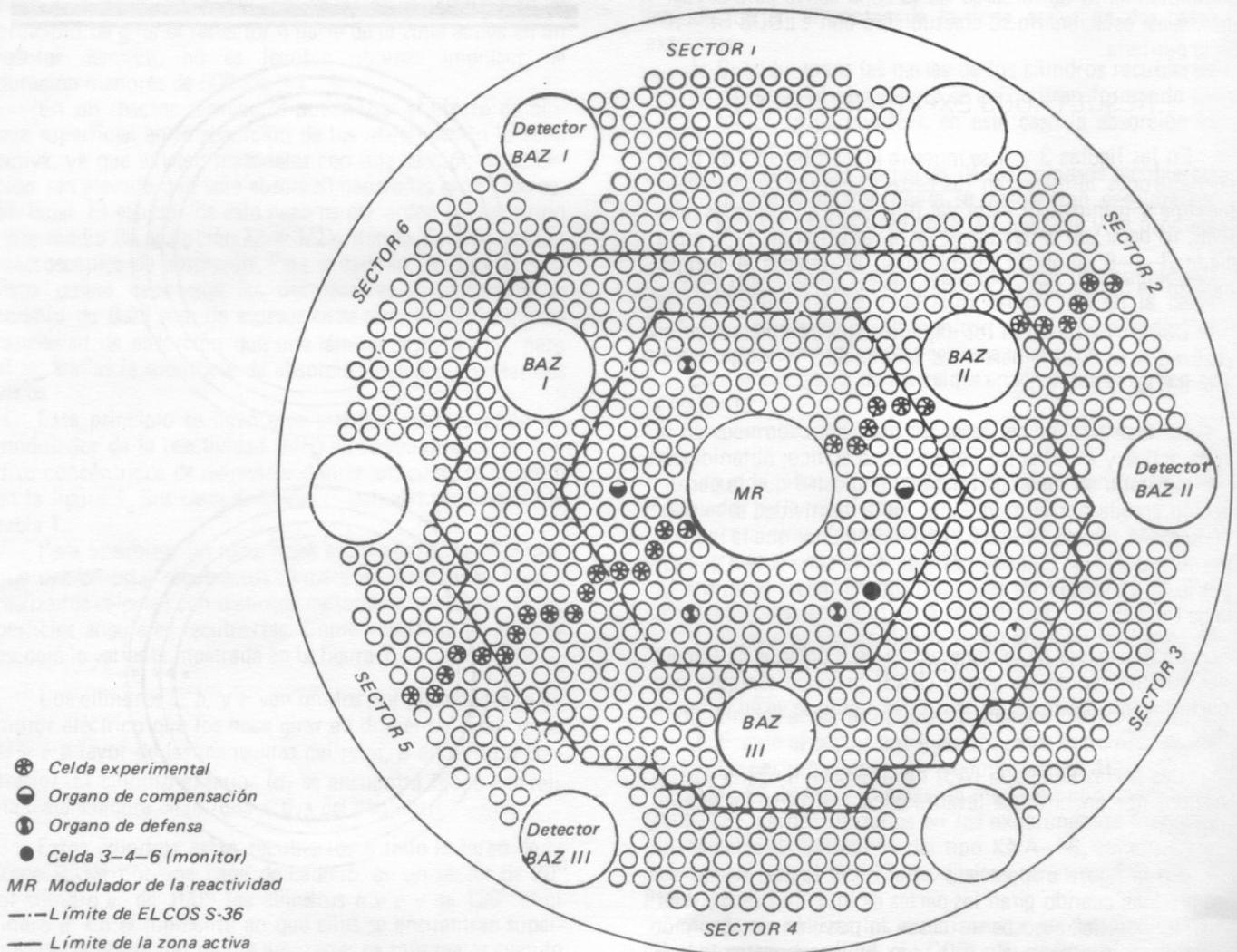


Fig. 2. Esquema de la zona activa del conjunto crítico Mayak.

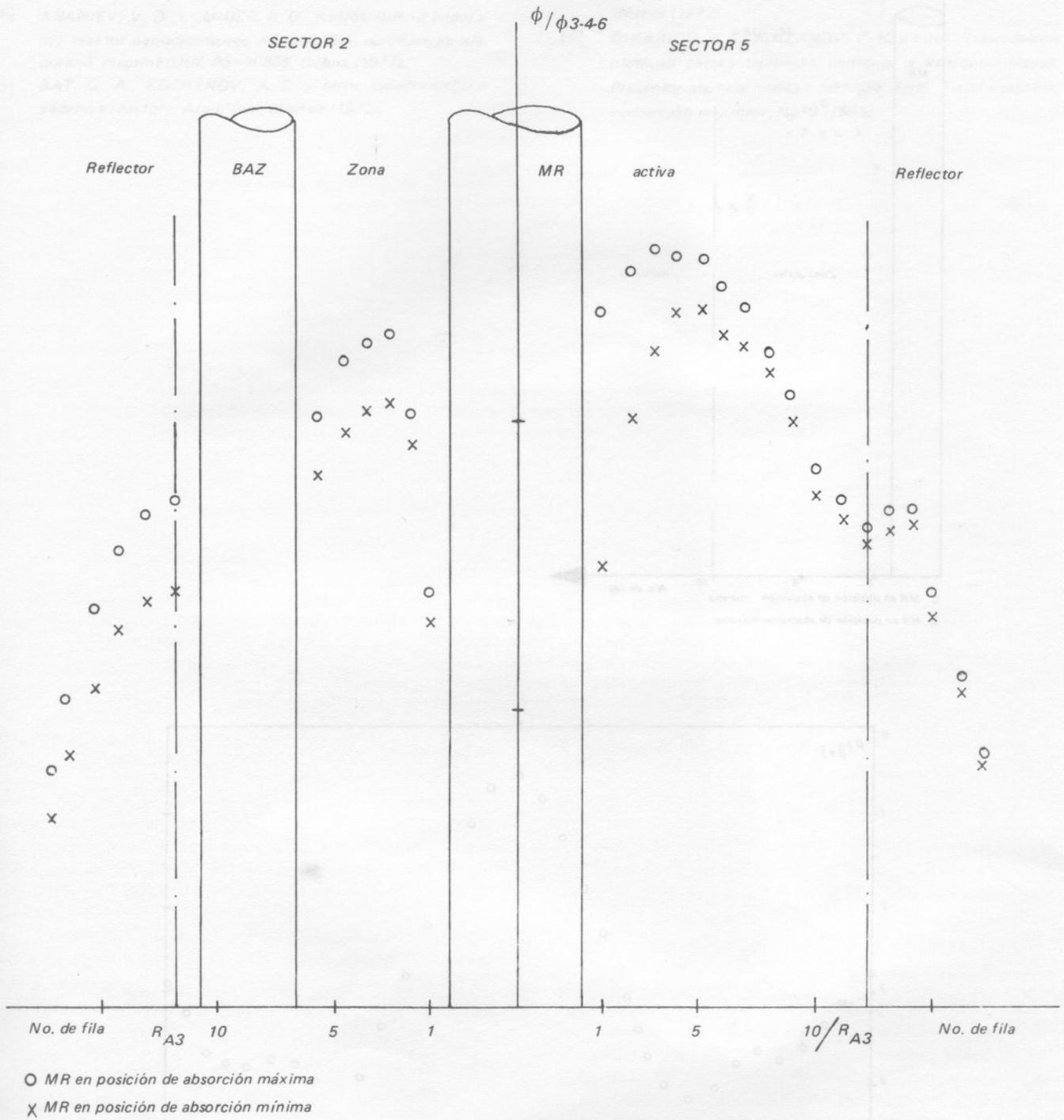


Fig. 3 Distribuidor del flujo de neutrones térmicos con respecto a la celda 3-4-6 (monitor) en los sectores 2 y 5.

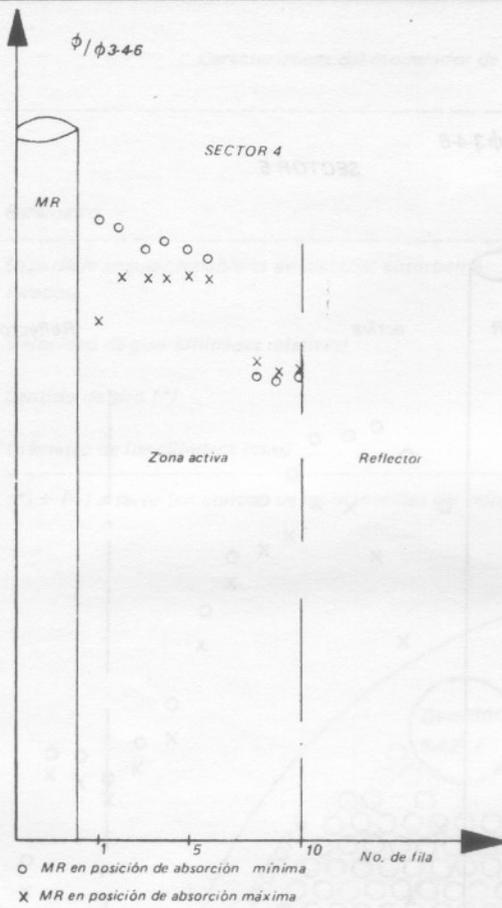


Fig. 4. Distribución del flujo de neutrones térmicos con respecto a la celda 3-4-4 (monitor) en el sector 4.

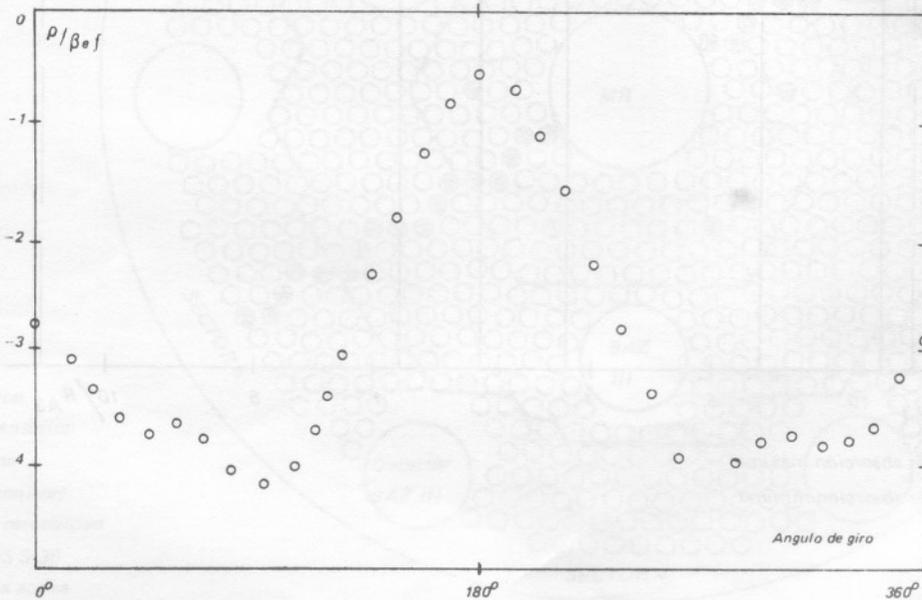


Fig. 5. Dependencia de la reactividad del ángulo de giro de los cilindros del modulador de la reactividad.

BIBLIOGRAFIA

[1] ANANIEV, V. D., LOMIDZE, B. D. y otros, *IBR-2 impul'snyj reaktor periodicheskogo diestviya dliya neitronnykh isledovanij*. Preprint IUIIN, P3-10888, Dubna (1977).

[2] BAT, G. A., KOCHENOV, A. C. y otros, *Issledovatel'skie yadernye reaktory*. Atomizdat, Moskva (1972).

[3] FRANK, I. M., *Prob. Fiz. Ehlem. Chastits At. Yadra*, 2, 4 (1972) 806.

[4] LOMIDZE, B. D., *Impul'snye reaktory*. Znanie, Serie Fiziki, Moskva (1972).

[5] DIKARIOV, V. S., RIAZANOV, V. H. y otros, *Raspredelenie plotnosti patoka teplovykh neitronov v kriticheskiy Mayak*. Problemy atomnoj nauki i tekhniki. Serie Fiziki i tekhniki yadernykh reaktorov, No. 9 (1985).

DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En este artículo se describen los resultados de un estudio experimental de la distribución de la densidad de neutrones térmicos en un reactor de agua pesada de tipo impulsivo. El reactor está diseñado para operar en un régimen de pulsos de neutrones térmicos. Los resultados muestran que la distribución de la densidad de neutrones térmicos en el núcleo del reactor es bastante homogénea, lo que indica un buen diseño del reactor para este tipo de operación. Se comparan los resultados experimentales con los cálculos teóricos realizados con el método de los momentos, obteniendo un buen acuerdo entre ambos. Los resultados también muestran que la distribución de la densidad de neutrones térmicos en el núcleo del reactor es bastante homogénea, lo que indica un buen diseño del reactor para este tipo de operación. Se comparan los resultados experimentales con los cálculos teóricos realizados con el método de los momentos, obteniendo un buen acuerdo entre ambos. Los resultados también muestran que la distribución de la densidad de neutrones térmicos en el núcleo del reactor es bastante homogénea, lo que indica un buen diseño del reactor para este tipo de operación. Se comparan los resultados experimentales con los cálculos teóricos realizados con el método de los momentos, obteniendo un buen acuerdo entre ambos.

INTRODUCTION

The purpose of this paper is to describe the results of an experimental study of the distribution of the density of thermal neutrons in a pulsed neutron reactor. The reactor is designed to operate in a pulsed neutron regime. The results show that the distribution of the density of thermal neutrons in the reactor core is quite homogeneous, which indicates a good design of the reactor for this type of operation. The experimental results are compared with theoretical calculations made with the method of moments, showing a good agreement between the two. The results also show that the distribution of the density of thermal neutrons in the reactor core is quite homogeneous, which indicates a good design of the reactor for this type of operation. The experimental results are compared with theoretical calculations made with the method of moments, showing a good agreement between the two. The results also show that the distribution of the density of thermal neutrons in the reactor core is quite homogeneous, which indicates a good design of the reactor for this type of operation. The experimental results are compared with theoretical calculations made with the method of moments, showing a good agreement between the two.