

## Determinación del exceso de reactividad de una configuración nuclear y su influencia del nivel de potencia

Agustín Zúñiga<sup>1,\*</sup>, José Tapia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Cálculo Análisis y Seguridad, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Av. Canadá 1470, Lima 41, Perú

<sup>2</sup> Escuela de Física, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 4500, Lima 30, Perú

### Resumen

En este trabajo presentamos resultados experimentales donde se observa que la posición de crítico de una determinada configuración nuclear varía con la potencia del reactor (expresada por la lectura de corriente). Así, a la corriente de  $0.6 \times 10^{-11}$  A (1 W) la posición de crítico es  $BC1 = 0.0 \%$  mientras que a  $0.6 \times 10^{-9}$  A (100 W),  $BC1 = 46.5 \%$ . La diferencia es aparente, porque debajo de una corriente de  $10^{-10}$  A, la reactividad no es significativa. Por ello se recomienda que en reactores como el RP-10 que tienen muchos neutrones a nivel de "fondo", el exceso de reactividad debe ser medido en corrientes como,  $0.6 \times 10^{-9}$  A (100 W) no a menores. Finalmente se determinó el exceso de reactividad para la configuración N° 42, que fue 3032 pcm con una incertidumbre menor al 1 %.

### Determination of the excess of reactivity of a nuclear configuration and its influence of the power level

#### Abstract

This work presents experimental results which show that the critical position of a given nuclear configuration changes with the reactor power (expressed by the current measurement). Thus, if the current is  $0.6 \times 10^{-11}$  A (1 W), then the critical position is,  $BC1 = 0.0 \%$  while  $0.6 \times 10^{-9}$  A (100W),  $BC1 = 46.5 \%$ . The difference is apparent because under a current of  $10^{-10}$  A, the reactivity is not significant. Therefore, it is recommended that for reactors like the RP-10 with a lot of neutrons at the "background" level, the excess reactivity must be measured in current as  $0.6 \times 10^{-9}$  A (100 W) not less. Finally, the excess of reactivity for the N° 42 configuration was determined, which was 3032 pcm with uncertainty less than 1 %.

### 1. Introducción

En la operación comercial de un reactor nuclear de investigaciones (RR), los cambios de configuración se realizan constantemente; por ejemplo, para solicitar la licencia de operación del reactor para una nueva configuración la legislación peruana exige la presentación de diversos informes, entre ellos el correspondiente a la puesta a crítico. Los cambios de configuración del núcleo deben ser notificados a la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN), 30 días antes de su ejecución, debiendo presentar la siguiente información: cálculo neutrónico del núcleo anterior (fin de ciclo), cálculo neutrónico del núcleo nuevo (inicio de ciclo). En el plazo de 10 días luego del cambio de configuración del núcleo, se deben remitir a la OTAN los siguientes informes: aproximación a posición de crítico del banco de barras, calibración de las barras de control del núcleo nuevo (inicio de ciclo), entre otros.

[1]. A partir de esa posición también se construyen las curvas del valor de las barras de control en base al cuál se determina, el exceso de reactividad de la configuración y los márgenes de parada, que establecen las condiciones y límites de operación [2], (Tabla 1).

En cuanto al exceso de reactividad de la nueva configuración un valor estimado se conoce por cálculo [3] antes de montar la configuración, por ello es natural que cuando se tiene la configuración los resultados experimentales deban compararse con los de cálculo y esto es un problema si las discrepancias son grandes.

En este trabajo nos focalizamos en la variación de la posición de crítico de las barras y su efecto en la determinación del exceso de reactividad. A nivel de cálculo los resultados son a potencia cero vatios; sin

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

embargo, en la práctica para el caso del reactor RP-10, las mediciones no se realizan a esta potencia. Entonces es importante saber

cómo afecta el nivel de potencia en esta determinación, a fin de comparar con los obtenidos por cálculo.

**Tabla 1.** Especificaciones de control de la reactividad y parada [2].

Criterio base	Especificación	Descripción del criterio base
Nº barras de seguridad compensadoras (BS-C)	BS_C=2	Los mecanismos de control de la reactividad son dispositivos de todo tipo, tales como barras de regulación, barras de control, barras de parada
Nº barras de seguridad no compensadoras (BS-NC)	BS_nC=3	"En el diseño se incorporará como mínimo un sistema de parada automática"
Barras de regulación (BR)	$BR \leq 600 \text{ pcm}$	"En el caso que el diseño prevea el uso de una barra de regulación, el valor en reactividad de la misma no debería superar los 600 pcm"
Margen de antireactividad (MP)	$BR \geq 3000 \text{ pcm}$	"El margen de antireactividad (con todas las barras insertadas debe) ser mayor que 3000 pcm"
Margen de parada sin la barra de seguridad más pesada (MP-1)	$MP-1 \geq 1000 \text{ pcm}$	El margen de parada es la reactividad negativa necesaria para mantener el reactor en estado subcrítico sin límite de tiempo con el dispositivo de control más reactivo retirado del núcleo y todos los experimentos que puedan desplazarse o cambiarse durante el funcionamiento en su situación más reactiva"
Factor de seguridad de reactividad (FSR)	$FSR \geq 1.5$	EL FSR "es la relación entre el valor en reactividad de todas las barras de seguridad y el exceso de reactividad"
Velocidad de extracción de barras de control (VE)	$VE \leq 20 \text{ pcm/s}$	"La tasa máxima de adición de reactividad positiva permitida por el sistema de control de la reactividad o por un experimento deberá especificarse y limitarse a valores justificados"
Diseño con elementos de seguridad inherente de control de reactividad	Coefficientes de reactividad < 0	"Un ejemplo de elemento inherente de seguridad es (...) conseguir coeficientes negativos de reactividad"

## 2. Desarrollo experimental

La configuración nuclear de trabajo, corresponde a la N° 42 [3] del reactor RP-10, que utiliza combustibles de  $U_3O_8$ , enriquecido al 20 % en U-235, tipo MTR, la cual se muestra en la Figura 1. Consta de 24 elementos combustibles normales (NN, A) y 5 de control (NC, AS), fabricados tanto por Nukem (NN, NC) y CNEA (A, AS), respectivamente. El quemado promedio de los combustibles normales es 34.3% (U-235), de los combustibles de control es 26.8 % (U-235) y el quemado promedio total de los combustibles en el núcleo es 33.3 % (U-235). Se dispone de elementos reflectores de grafito (NG) y berilio (NB).

La condición previa al experimento consistió en no tener remanentes del veneno Xe-135, de la operación previa a mediana o alta potencia, por ello la experiencia se realizó

62 horas después de la última operación, que duró 28 horas a 3 megavatios de potencia. En la Tabla 2 y la Figura 2 se presentan las condiciones de operación (corriente) y el tiempo de inicio del experimento después de terminada la operación de producción de radioisótopos (potencia 3 MW).

**Tabla 2.** Corriente de operación y tiempo después de la última operación a potencia.

Hora	I-CM4 (A)	Log I-CM4	Tiempo (horas)
10:58	6.0E-12	-11.2	64.47
11:09	6.0E-11	-10.2	64.65
11:15	6.0E-10	-9.2	64.75
11:29	6.0E-09	-8.2	64.98
11:37	6.0E-08	-7.2	65.12
11:54	9.0E-08	-7.0	65.40
12:44	9.0E-12	-11.0	66.23

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	TN RAB	NG-013	PI-01	NB-007	NG-004	NB-002	PI-02	NG-014	CF	
2	NG-021	NG-030	NN-014	NN-016	NN-020	NN-022	SN-008	NG-017	NG-022	
			57.51	57.17	54.97	52.03	9.66			
3	NG-027	NB-003	NN-012	SC-001	NN-021	SC-005	NN-018	NB-004	NG-002	
			56.89	10.55	51.10	6.92	55.79			
4	NG-023	PI-03	SN-017	NN-026	NN-025	NN-028	SN-023	PI-04	NG-006	
			2.04	38.25	45.30	39.84	2.68			
5	NG-010	NB-009	NN-029	NN-030	PI-05	NN-023	A-007	NB-010	NG-019	
			36.35	35.80		50.49	6.37			
6	NG-015	NB-001	SN-015	NC-007	NN-024	NC-008	NN-027	NB-006	NG-016	
			6.37	37.92	45.05	28.02	44.44			
7	NG-007	NG-028	NN-031	SN-010	NC-006	SN-018	NN-032	NG-020	NG-031	
			33.22	10.21	50.75	6.18	26.63			
8	PI-06	NG-012	NGC-1	NB-005	NG-001	NB-008	NG-025	BCF	PI-07	
9			NG-026	NG-008	NG-029	NG-009	NG-024			

NN, A: EC normal; NC, AS: EC control; PI: pos. irradi.; NG: grafito; NB: berilio

Figura 1. Configuración nuclear N° 42 del reactor RP-10 [3].

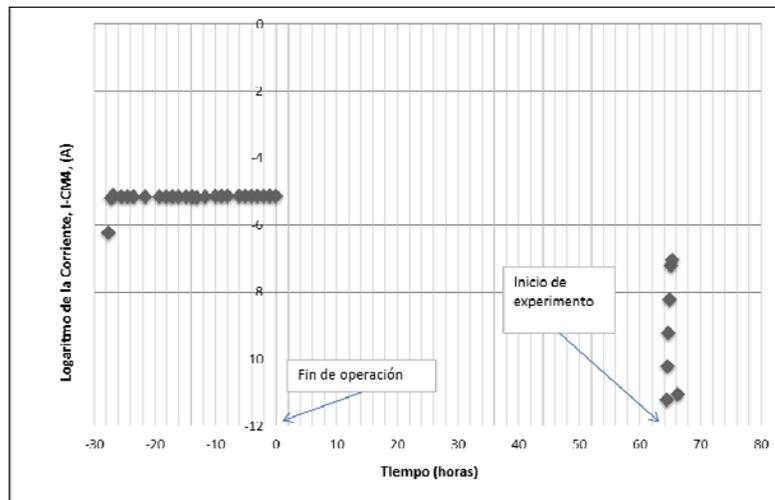


Figura 2. Representación del nivel de corriente y del tiempo transcurrido entre la última operación y el inicio del experimento

La operación comenzó poniendo a crítico el reactor con la misma secuencia de barras a todas las corrientes, en este caso, todas las barras de seguridad al 100 % de extraídas, la barra de control 2 (BC2) al 3.2 % y la barra de control 1 (BC1) fluctuando para establecer el crítico. Se comenzó llevando a crítico a la menor potencia que se establecía por la corriente (1 W), luego se subía una década a hasta 10 kW (kilovatios).

### 3. Resultados

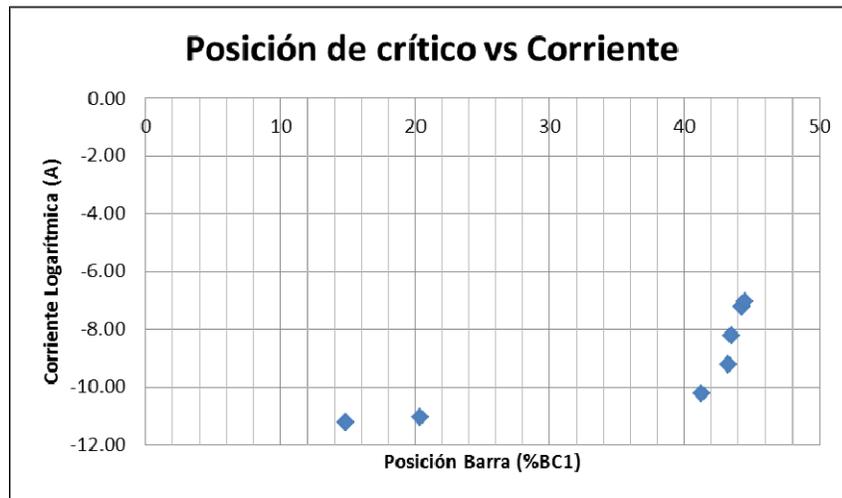
En la Tabla 3 se presentan las mediciones realizadas, donde, I-CM4(A) es la corriente del canal de marcha N° 4, obtenido desde el SAD [4], en amperios. Los %BC1 y %BC2, corresponden a los valores de las posiciones

de barra extraída. Las potencias son estimadas basadas en la curva de calibración que utilizan los operadores. Con fines de representación se incluye el logaritmo decimal de la corriente. La posición de crítico de la configuración corresponde, a las barras de seguridad (BS) totalmente extraídas (100 %), la barra de control BC2 en la posición de 3.2 % que mantuvo fija al igual que la barra de control fino, BCF, en la posición de 55.0 %.

**Tabla 3.** Valor de la posición de crítico con la corriente.

I-CM4 (A)	% BC1	%BC2	Potencia (W)	Log I-CM4
6.0E-12	14.9	3.2	1	-11.2
6.0E-11	41.3	3.2	10	-10.2
6.0E-10	43.3	3.2	100	-9.2
6.0E-09	43.5	3.2	1000	-8.2
6.0E-08	44.3	3.2	10000	-7.2
9.0E-08	44.5	3.2	45000	-7.0
9.0E-12	20.4	3.2	1	-11.0

En la Figura 3 se puede observar que la posición de crítico de la barra de control BC1, es menor para corrientes también menores o potencias bajas. Así si la potencia es de aproximadamente 1 vatio, la posición de barra corresponde a 14.9 %; sin embargo, este valor de posición de barra, sube rápidamente hasta 43.2 %, si la potencia también asciende hasta valores ligeramente por encima de 100 vatios. En ambos casos la temperatura del refrigerante se mantuvo en 36.8 °C.

**Figura 3.** Comportamiento de la posición de crítico con el nivel de corriente (potencia).

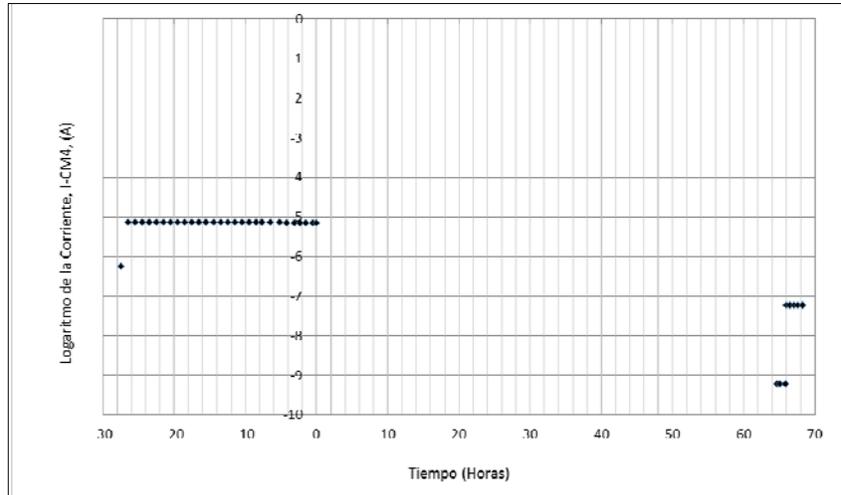
En base a los resultados vistos, después de una semana se decidió medir la diferencia de reactividad entre estos dos estados de nivel crítico, para la corriente correspondiente a 1 W y la correspondiente a 100 W. Para ello volvimos a las condiciones de inicio del experimento similares al anterior (inicio sin venenos). En la Tabla 4 y Figura 4 se presentan la corriente y tiempo de inicio del experimento.

Para medir el valor de la barra de control (BC1), en las dos posiciones diferentes que corresponden a dos corrientes (1 W y 100 W) respectivamente, se operó el reactor a la corriente de  $0.6 \times 10^{-11}$  A (1 W), obteniéndose la posición de crítico, en la configuración de barras siguiente: BS1=BS2= 100 %, BS3= 86.7 %, BC1= 0 % y BC2= 3.3% (los porcentajes son de barra extraída). Luego, se puso a crítico a la corriente de  $0.6 \times 10^{-9}$  a 100 W, resultando la posición de

crítico en las posiciones de barras siguiente: BS1=BS2= 100 %, BS3= 86.7 %, BC1= 46.8 % y BC2= 3.3 %. En ambos casos, la temperatura del refrigerante fue de 36.8 °C. En la Tabla 5 se muestra las condiciones de puesta a crítico.

**Tabla 4.** Corriente de operación y tiempo después de la última operación a alta potencia.

Hora	I-CM4 (A)	Log I-CM4	Tiempo (horas)
11:08	6.0E-10	-9.2	64.6
11:35	6.0E-10	-9.2	65.1
12:23	6.0E-10	-9.2	65.9
12:30	6.0E-08	-7.2	66.0
13:00	6.0E-08	-7.2	66.5
13:30	6.0E-08	-7.2	67.0
14:00	6.0E-08	-7.2	67.5
14:44	6.0E-08	-7.2	68.2



**Figura 4.** Tiempo después de la última operación a potencia, para el experimento de comparación entre 1 W y 100 W.

**Tabla 5.** Posiciones de crítico para dos niveles de corriente (potencias, 1W y 100 W).

I CM4	BS1	BS2	BS3	BC1	BC2	BCF
(A)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
6.0E-12	100	100	86.6	0	3.3	55
6.0E-10	100	100	86.6	46.8	3.3	55

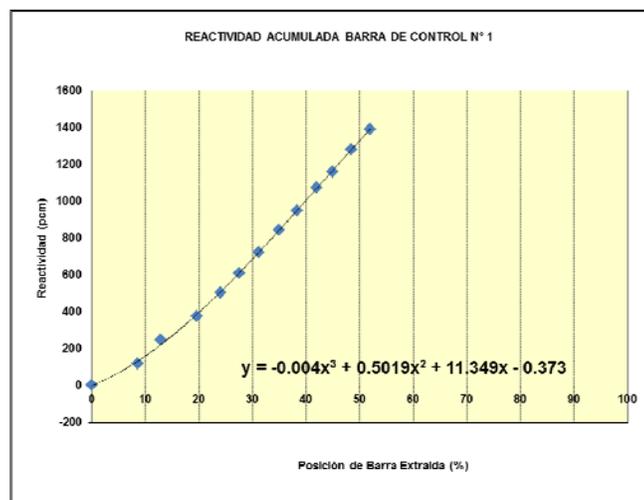
Como se observa la diferencia entre estos dos niveles de corriente (potencia), en reactividad será:

$$\Delta \rho = \rho(0\%) - \rho(46.8\%)$$

Para evaluar esta diferencia en reactividad, levantamos la curva de reactividad entre 0 % extraído y 46.8 % extraído, los resultados

para una potencia de 100W se presentan en la Figura 5, con la ecuación de ajuste polinomial, a partir del cual se determina la diferencia (se usó el beta efectivo igual a 780 pcm).

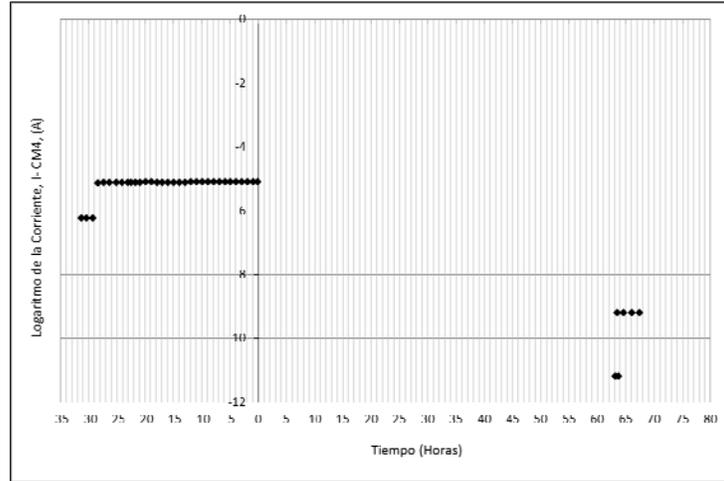
$$\Delta \rho = 1220 \text{ pcm}$$



**Figura 5.** Valor en reactividad de la barra de control, BC1 para el intervalo requerido.

Para estudiar la causa de esta diferencia se programó una siguiente experiencia donde calibraríamos toda la barra BC1 a la potencia de 1 W y luego a la potencia de 100 W de manera separada, pero el mismo día. Para ello mantuvimos las 60 horas después de la última operación a potencia. En la Figura 7 se presenta la corriente y tiempo de inicio del experimento.

Los resultados de la posición de críticos fueron:  $0.6 \times 10^{-11}$  A, (1 W), BS1=BS2=100%, BS3=78.6 %, BC1=0.0 %, BC2=3.3%, BCF=50.0% y para  $0.6 \times 10^{-9}$  A, (100 W), BS1=BS2= 100 %, BS3=78.6 %, BC1=52.10 %, BC2=3.3 %, BCF=50.0 %, tal como se observa en la Tabla 8.



**Figura 6.** Tiempo después de la última operación a potencia.

**Tabla 8.** Posiciones de crítico para dos niveles de corriente (potencias, 1 W y 100 W).

I-CM4(A)	BS1	BS2	BS3	BC1	BC2	BCF
(A)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
$0.6 \times 10^{-11}$	100	100	78.6	0	3.3	50
$0.6 \times 10^{-9}$	100	100	78.6	52.1	3.3	50

Para evaluar la diferencia en reactividad en esas dos posiciones de crítico, tal cual hicimos en el experimento anterior, decidimos volver BC1 a 0.0 % y comenzar a subir hasta 52.1 %, pero esta vez solo a la potencia de 1 W y no a 100 W, como se hizo en la experiencia anterior. Siguiendo el procedimiento para medir la reactividad por el método del período, tratamos de subir desde 0.0 % a una determinada porción de barra; sin embargo, observamos que conforme subíamos a 10 %, 20 %, 30 %, 44% el crecimiento en el período era mínimo, esto era una cuestión inusual, pues se debía esperar un crecimiento apreciable del período para esas porciones de barras subidas, por lo que consideramos que no se podía continuar extrayendo más barra para conseguir período, consecuentemente decidimos concluir el experimento de calibración de la barra BC1 a 1 W, pues se notaba que a la potencia (1 W), la barra no tiene un valor

significativo. Por lo que decidimos pasar a la potencia de 100 W y allí volver a hacer la calibración de la barra BC1, para estimar el valor a 52.1 %. Los resultados de esta medición se presentan en Figura 7.

Con estos datos la comparación en reactividad es,

$$\Delta \rho = 1577 \text{ pcm}$$

Con fines de determinar el exceso en reactividad de la configuración nuclear que estamos trabajando (N42), a valores de corriente superiores o iguales a  $0.6 \times 10^{-9}$  A (100 W) realizamos una nueva experiencia. En esta oportunidad la posición de crítico fue la siguiente: BS1=BS2=BS3=100%, BC1=46.3%, BC2=0.0%, BCF=50.0%. Entonces para conocer el valor de las barras introducidas las calibramos mediante el método del período positivo [6]. Los resultados de estas mediciones se presentan en la

Figuras 8 y 9 para las barras BC1 y BC2, respectivamente.

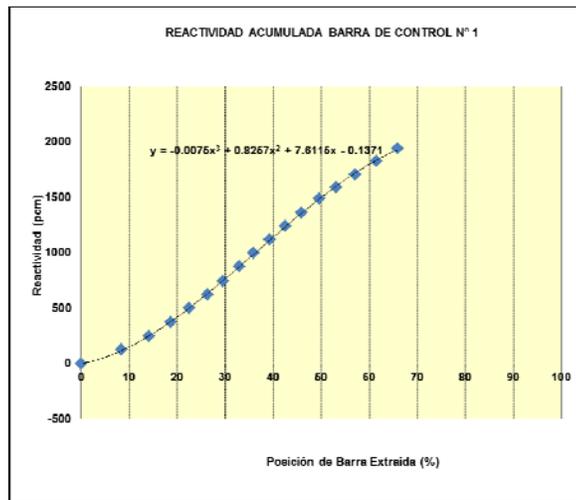


Figura 7. Valor en reactividad de la barra de control, BC1 para 100 W.

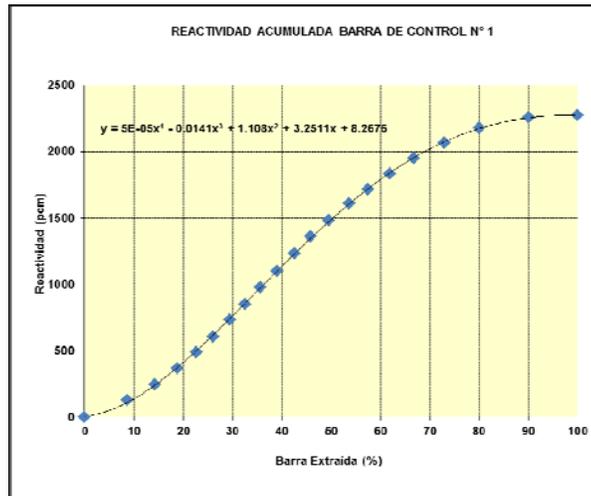


Figura 8. Valor en reactividad de la barra de control, BC1 a 100 W.

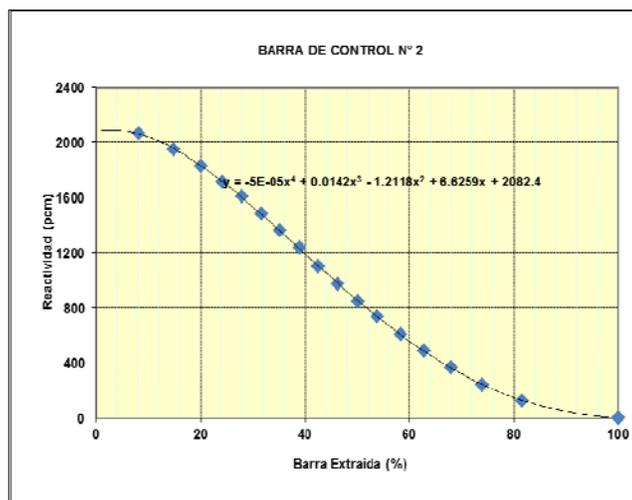


Figura 9. Valor en reactividad de la barra de control, BC2 a 100 W.

A partir de estos resultados y las curvas de ajuste correspondientes determinamos el valor de las barras de control introducidas que definen en exceso:

Exceso de reactividad =  $\rho$  (0%-100%: BC2) +  $\rho$  (100%-46.3%: BC1) = 2082.4 + (2313.4 - 1364.3) = 3032 pcm. Su incertidumbre es menor al 1%.

#### 4. Discusión de resultados

La posición de crítico de las barras control y seguridad para la configuración de estudio dependen de la potencia a la que se realiza la puesta a crítico, se ha visto que la diferencia es drástica, para la potencia de 1 W la posición de crítico fue 14.9 % de BC1, mientras que para 100 W pasó a 43.3 %. Entonces, si utilizamos cualquiera de estas posiciones conjuntamente con las curvas de valor de las barras de control podríamos obtener excesos de reactividad muy diferentes. Con el fin de evaluar esta diferencia, se trató de calibrar toda la barra de BC1 para la potencia de 1 W, pero no se pudo porque no había respuesta a la extracción de barra, debido a la insignificancia del valor de barra a tan baja potencia. Esto obligó a calibrar la barra BC1 a 100 W, y allí sí evaluar el exceso de reactividad.

#### 5. Conclusiones y recomendaciones

Se ha determinado (Figura 3) que el exceso de reactividad, puede quedar afectado grandemente, si se establecen posiciones de crítico a muy baja potencia (del orden de 1 W,  $0.6 \times 10^{-11}$  A), y en base a esta posición determinar la reactividad de la configuración. El resultado sugiere que en el procedimiento de medición de exceso de reactividad [5] se explicita el límite mínimo de potencia (corriente), cuando se evalúe el exceso de reactividad es recomendable 100 W a 200 W ( $0.6 \times 10^{-9}$  A a  $1.6 \times 10^{-9}$  A). La explicación es que aun con el reactor parado (o niveles de potencia muy bajos, como 1 W) hay un

significativo fondo de neutrones aleatorios (debido al quemado promedio considerable de 35 %) [3], por lo que a estos niveles de corriente las barras de control no tienen efecto significativo su valor en reactividad es despreciable.

Así que, con el fin de comparar los resultados experimentales del valor de exceso de reactividad de una determinada configuración nuclear con los de cálculo (potencia "cero") se debe tener en cuenta este hecho, y la comparación debe hacerse a 100 W, pues es la determinación experimental a la más baja potencia con valores reproducibles estadísticamente.

#### 6. Referencias

- [1]. Ley de Regulación del uso de Fuentes de radiación Ionizante. Ley N° 28028 de 26 de junio 2003. Diario Oficial El Peruano, (18-07-2002).
- [2]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de seguridad del RP-10. Límites y condiciones operacionales del RP-10. Capítulo 17. Dirección de Producción. Lima: IPEN; 2014. [Informe interno].
- [3]. Gallardo A. Cálculo Neutrónico del núcleo de inicio N° 42 del RP-10. 2014. [Informe interno].
- [4]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Sistema de adquisición de datos del RP-10. Dirección de Producción. 1993. [Informe interno].
- [5]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Procedimiento de puesta a crítico y determinación de exceso de reactividad del RP-10. Dirección de Producción. 2013. [Informe interno].
- [6]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Procedimiento de medición del valor en reactividad de las barras de control del RP-10. Dirección de Producción. 2013. [Informe interno].