

Efecto de la posición relativa de las barras de control en la calibración en potencia de las cadenas de marcha del reactor nuclear RP-10

Agustín Zúñiga*, Rolando Arrieta

Dirección General de Producción, Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima 41, Perú

Resumen

El seguimiento de los niveles de potencia térmica de un reactor nuclear experimental, como el reactor RP-10, se realiza mediante los niveles de corriente que reportan las cadenas de marcha y su correlación con la potencia. Las curvas de calibración, para cada cadena, van a depender de la distribución de neutrones que observan para la configuración nuclear correspondiente. Una de las maneras de modificar esta configuración es el posicionamiento de las barras de control que puede elegirse según la conveniencia de proveer mayor flujo neutrónico en una determinada posición de irradiación. En este artículo se muestra esta variación, y consecuentemente las curvas de corriente potencia que le corresponden. Hemos elegido dos posiciones relativas de las barras de control (BC1 y BC2), la primera es la que favorece la producción de radioisótopos (PPR) (Caso 1) y la segunda favorece a los usos de activación neutrónica (AAN) (Caso 2). El método empleado se basó en el registro de la corriente (cámara de marcha, M4) mediante el sistema de adquisición (SAD) del reactor y la potencia desde la lectura digital del nitrógeno 16, la cual fue calibrada previamente por balance térmico. Los resultados para la configuración nuclear 30, en la cadena de marcha M4 fueron los siguientes: Caso 1: $I_{M4}(A) = 2.95 \times 10^{-6} \times P(MW) + 1.45 \times 10^{-6}$, $R^2 = 9.99 \times 10^{-1}$, y Caso 2: $I_{M4}(A) = 2.39 \times 10^{-6} \times P(MW) + 5.73 \times 10^{-7}$, $R^2 = 9.97 \times 10^{-1}$. Las dispersiones de los datos son del orden del 10 % para bajas potencias (menores a 2 MW), disminuyendo conforme se eleva la potencia hasta menores al 3 % (para mayores a 3 MW).

Effect of the relative position of the control rods in the power calibration of the running chains of the RP-10 nuclear reactor

Abstract

The monitoring of the thermal power levels of an experimental nuclear reactor, such as the RP-10 reactor is performed by current levels reported by the driving chains and their correlation with the power. The calibration curves for each channel will depend on the neutron distribution observed for the corresponding configuration. One way to modify this configuration is positioning the control rods that can be chosen according to the convenience of providing greater neutron flux in a given irradiation position. This article shows this variation, and consequently the current power curves corresponding thereto. We have chosen two relative positions of the control rods (BC1 and BC2), the first is the one that favors the production of radioisotopes (PPR) (Case 1) and the second favors the use of neutron activation (NAA) (Case 2). The used method was based on the record of the current (up camera, M4) by the acquisition system (SAD) of the reactor and the power from the digital reading of nitrogen 16, which was previously calibrated by thermal balance. The results for the nuclear configuration 30, M4 chain up were: Case 1: $I_{M4}(A) = 2.95 \times 10^{-6} \times P(MW) + 1.45 \times 10^{-6}$, $R^2 = 9.99 \times 10^{-1}$ and Case 2: $I_{M4}(A) = 2.39 \times 10^{-6} \times P(MW) + 5.73 \times 10^{-7}$, $R^2 = 9.97 \times 10^{-1}$. The dispersions of the data are in the order of 10 % for low power (under 2 MW), decreasing as the power rises to under 3 % (for values greater than 3 MW).

1. Introducción

El seguimiento de la evolución de la potencia de un reactor nuclear durante la operación se realiza mediante las cadenas nucleares de detección. Ellas están constituidas por un detector y la electrónica asociada. Los detectores se escogen según el régimen del nivel de potencia al cuál se va a trabajar, usualmente estos regímenes son dos, el de arranque (potencias menores al kilovatio) y

las de marcha (potencias en el orden de megavatios) [1]. En el caso del reactor RP-10 los primeros son cámaras de ionización y los segundos son cámaras de ionización compensadas [2]. Debido a que estos detectores producen corriente, su equivalente en potencia térmica debe ser calibrado por otras técnicas absolutas. La técnica absoluta más empleada para los regímenes de megavatios

* Correspondencia autor: azuniga@ipen.gob.pe

es el balance térmico, mientras que para bajas potencias la activación de monitores metálicos (discos o alambres). En el reactor RP-10 se ha implementado un sistema relativo, basado en la detección del nitrógeno 16, N16 [3], el cual es producido en el agua por la reacción nuclear neutrón-oxígeno. Este sistema puede ser usado como semi-absoluto, después de calibrarlo mediante el balance térmico [4]. Este sistema es el que se va a usar en este estudio para registrar las corrientes mediante un sistema de adquisición de datos (SAD), desde la consola del reactor. Así, las curvas de calibración producidas tienen como referente al sistema-N16, previamente calibrado por balance térmico.

2. Fundamento teórico

2.1 La potencia y su linealidad con la respuesta del detector

Es sabido que la potencia térmica del reactor es directamente proporcional al flujo

$$P(W) = 1.60 \cdot 10^{-13} E_{/R} \frac{N_A M^{235}}{A^{235}} \frac{\sqrt{\pi}}{2} g^{235}(T) \sqrt{\frac{T_0}{T}} \sigma_f^{235} f_D \bar{\phi} (1 + \alpha_{epi} + \alpha_{rap}) \quad (2)$$

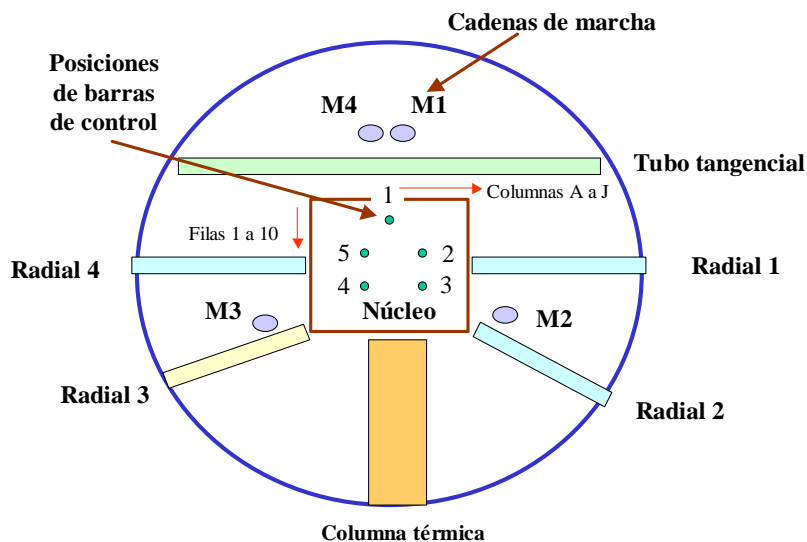


Figura 1. Esquema de ubicación de los detectores en las cadenas nucleares correspondientes (M1, M2, M3, M4) y las barras de seguridad o de control.

La ecuación (2) nos dice que si el valor medio del flujo neutrónico no es modificado, entonces la potencia tampoco. Eso no quita que el flujo neutrónico puede variar en algún punto mientras el promedio no. Entonces, si imaginamos a un detector de neutrones como si fuera un "ojo que ve neutrones" y está ubicado en algún punto, él verá con más

neutrónico térmico promedio que se alcanza en la configuración nuclear establecida. La relación fundamental de la potencia (1) [5].

$$P = \gamma \iint \sigma_f(E) N_{235} \phi(r, E) dE dr \quad (1)$$

Muestra que la potencia (P) es una respuesta integral de todas las fisiones que ocurren en el núcleo. Sin embargo, ese total es proporcional al valor promedio del flujo. Esta aproximación es válida y operacionalmente simple si se conoce la distribución espacial del flujo neutrónico $\phi(r)$. Experimentalmente esta distribución espacial se realiza mediante el método de activación neutrónica de monitores metálicos y mediante la medición de sus actividades térmicas, se puede correlacionar la potencia con el flujo promedio $\bar{\phi}$. La ecuación experimentalmente operativa es la siguiente (2) [5,6]:

sensibilidad la cantidad de neutrones de su entorno, que a su vez está relacionado con el valor promedio (o potencia). Pero si se mantiene fijo el entorno del detector entonces su lectura –de neutrones que se convierte en corriente– será proporcional al flujo promedio y por tanto a la potencia. Esta

correlación es que llamamos como “curva de calibración” del detector (cadena de detección) en esa posición del núcleo. Este concepto es muy importante tenerlo en cuenta, pues permite reconocer que cualquier modificación en la configuración nuclear (elementos combustibles con mayor o menor grado de quemado, cajas de irradiación o movimiento de barras) puede afectarlo. Por eso, los detectores deben estar a una distancia adecuada a fin de ver el comportamiento promedio en lugar del local.

En este trabajo se miden estas curvas para los dos arreglos de barras de seguridad y control más utilizados en la operación rutinaria del RP-10. El primero cuando se tiene que producir radioisótopos (a una potencia de megavatios, Caso 1: PPR) y la otra cuando el reactor opera para análisis por activación neutrónica (a potencias del orden de 100 kilovatios, Caso 2: AAN). En la Figura 1 se presenta un esquema de la ubicación de los 4 detectores que se denominan cadenas de marcha (CM) y la ubicación de las barras de seguridad y control. Para el arreglo de barras en el caso 1 (PPR) las posiciones ocupadas por las barras de control son la 3 y 5, mientras que para el caso 2: AAN, le corresponden las posiciones 2 y 5. También se muestran las otras partes del núcleo del reactor que pueden influenciar en el flujo que llega a cada detector y por tanto su lectura de corriente o curva de linealidad con la potencia. Por tanto, la curva de calibración que se levante debe estar bien especificada: configuración, fecha, materiales altamente absorbentes (barras de control), muestras dentro del núcleo (usualmente las que se emplean en la producción de radioisótopos) y facilidades cercanas al detector, elementos y/o componentes que podrían distorsionar el flujo alrededor de la cámara. Esto no ocurrirá con la potencia, que seguirá siendo el mismo dado que en el balance térmico interesa el caudal y la diferencia de temperatura entre el agua que sale del núcleo con la que ingresa[†]. Para el caso del RP-10 se tiene la relación siguiente, [4]:

$$P(\text{MW}) = 1.16 Q (\text{m}^3/\text{h}) \times \Delta T(^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

Donde, P, es la potencia de operación del reactor leída en la consola. El caudal, Q, es el total considerando los ramales que utilice (definiciones de modos) [2,4].

Cabe mencionar que de todas las cámaras (de ionización compensadas) utilizadas solo una (la cámara denominada 4), está conectada con el control automático desde la consola, y es respecto a ella, la que se referencia como la curva de calibración de operación, las demás curvas de los otros canales no son considerados. La curva de calibración se representa por:

$$I_M (A) \quad \text{vs} \quad P (MW)$$

Donde, I_M : corriente de marcha en amperios (A); P: potencia del reactor en megavatios (MW). En esta relación las mayores incertidumbres para la lectura de la potencia surgirán cuando se produzcan cambios bruscos de potencia y por tanto demoren la estabilización en las lecturas de las corrientes.

2.2 Los detectores

En el reactor RP-10 los detectores de neutrones empleados para el seguimiento de la potencia están relacionados con el nivel del mismo. En el régimen de arranque se utilizan los detectores de cámaras de fisión (cámaras de ionización, CF), que se saturan a valores de potencia del orden de 100 kW [7]. Para potencias superiores al mencionado, en el régimen de convección forzada, se utilizan los detectores de cámaras de ionización compensadas (CIC), estas pueden utilizarse en el rango mayor a 100 kW, su tecnología (compensación) permite eliminar las corrientes debido a la radiación gamma, quedando únicamente la correspondiente a los neutrones. Una visión cualitativa de los detectores en los regímenes de arranque, marcha y región de traslape se observan en la Figura 2, mientras que en la Figura 3 se muestran las lecturas de las corrientes de las cuatro cadenas y del sistema de adquisición.

[†] De manera similar no se verá afectado la curva de calibración del nitrógeno 16, porque se mide fuera del núcleo, de modo que se puede considerar al núcleo como un punto. Por eso, la ventaja de calibrar bien este sistema.

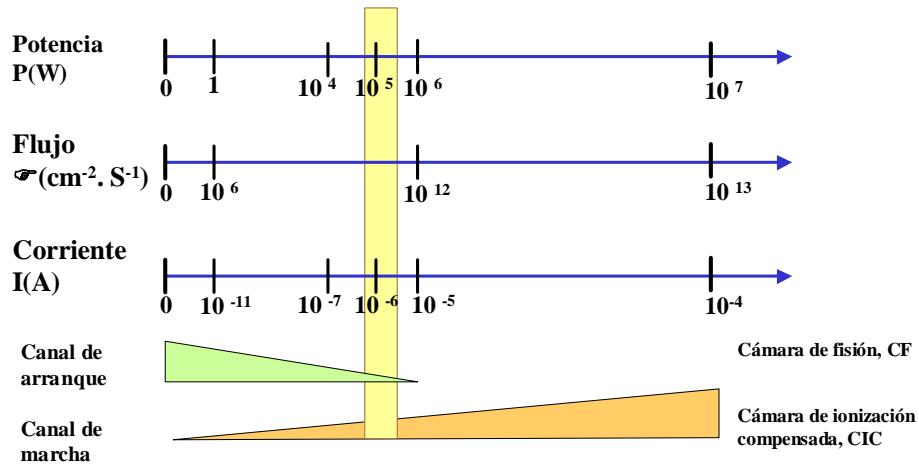


Figura 2. Niveles de potencia y detectores empleados.

Lecturas de Canales de Marcha

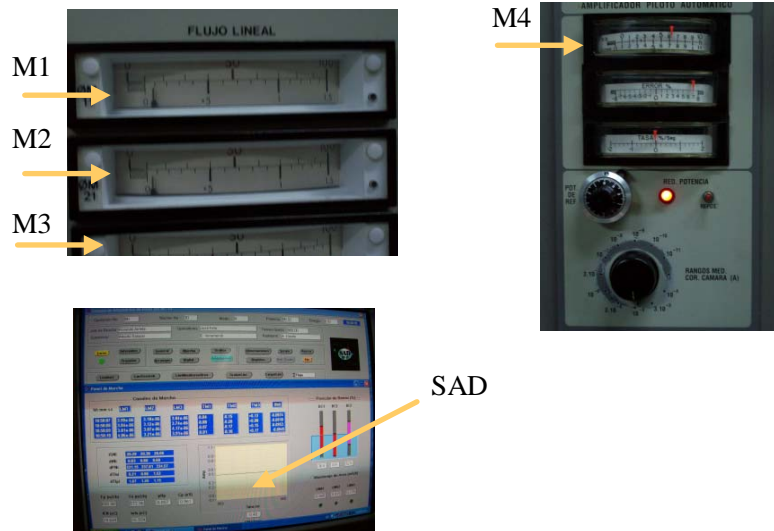


Figura 3. Visualización de las ventanas observadas en la consola desde donde se toman los registros de las lecturas de corriente para las cadenas de marcha (M1, M2, M3, M4), en escala lineal y también los correspondientes al sistema de adquisición (SAD).

2.3 Los modos de operación

Cuanto mayor es el nivel de potencia en que trabaja el reactor, mayor será la exigencia de refrigeración o extracción del calor; por ello, se requerirá incrementar el caudal (circuito primario) y consecuentemente habrá una mayor demanda a las torres de enfriamiento del circuito secundario. En el modo en que se realizó el experimento el sistema primario

tenía un caudal de remoción de 1550 m³/s, el cual considera el uso de los tres ramales de refrigeración y también las tres torres de enfriamiento. Bajo estas condiciones el reactor operará en condiciones seguras. Otros modos de operación se definen de acuerdo al número de ramales o torres de enfriamiento empleadas, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Modos de operación del reactor RP-10 en función al número de bombas del primario y el número de las torres de enfriamiento [4].

	Modos de Operación			
	IV	I	V	VII
Bombas sistema refrigeración primario	0	3	2	1
Bombas sistema refrigeración secundario	0	3	2	1
Intercambiadores de calor	0	3	3	3
Torres de enfriamiento	0	3	3	3

3. Desarrollo experimental

El procedimiento seguido en la experiencia puede desagregarse en los siguientes pasos: 1) Se identifica la configuración nuclear; 2) Se verifica la presencia o no de muestras en las cajas de irradiación en el núcleo; 3) Se verifica las posiciones de las facilidades o dispositivos de irradiación (Figura 1); 4) Se establece el modo de refrigeración; 5) Se establece la secuencia de extracción de barras; 6) Se define el nivel de potencia y se registra su valor; 7) Se deja que se establezca la potencia (puede ser unos 10 minutos como mínimo); 8) Se registra la hora de la estabilización o de la toma de datos; 9) Se registra las lecturas de las cámaras de marcha, M1, M2, M3 y M4; 10) Se registra la lectura del SAD; 11) Se registra las posiciones de barras de control y de control fino; 12) Se incrementa la potencia y se repiten los pasos del (6) al (11) hasta alcanzar la máxima potencia de 10 MW; 13) Se construye la planilla de datos, y 14) Se construye la curva de corriente versus potencia.

Para nuestro trabajo se tomaron en cuenta las siguientes condiciones: Configuración del núcleo N° 30. Modo de refrigeración 1 (tres bombas de refrigeración del primario con las tres torres de enfriamiento en operación). Las posiciones de las facilidades estuvieron en descanso a excepción del radial N °3 (neutrografía), que estuvo en la posición de trabajo. Se ubicaron las muestras para la

producción de radioisótopos en las cajas correspondientes (B4, E5, H4, I9). Se tomó nota de las buenas condiciones de operación de la electrónica nuclear correspondientes a las cámaras.

En cuanto a la ubicación de los detectores y las barras de seguridad o de control (Figura 1) resultaron: Caso 1 (PPR): Posición 1: BS1, posición 2: BS2, posición 3: BC1, posición 4: BC2, posición 5: BS3. Caso 2 (AAN): Posición 1: BS1, posición 2: BC2, posición 3: BS2, posición 4: BC1, posición 5: BS3. En ambos casos se pretendió mantener las mismas posiciones de barra (tanto la completamente incertada cuanto la móvil) durante toda la experiencia. Sin embargo esto último no se pudo porque fue necesario modificar las posiciones de la barra móvil BC1, para compensar el quemado y veneno que se iba generando por los niveles de potencia y los tiempos de operación de la experiencia.

4. Resultados

En las Tablas 2 y 3 se presentan los datos obtenidos en la experiencia tanto para el Caso 1 (PPR) y el Caso 2 (AAN), respectivamente; destacándose la variación de la potencia de subida cuanto de bajada (entre 1 a 10 MW) y las correspondientes lecturas de corriente para los canales de marcha del 1 al 4. Esta lectura se obtuvo desde el sistema de adquisición de la consola (SAD) [8].

Tabla 2. Registro, para el Caso 1 (PPR), de los datos de corriente para las cadenas de marcha (M1, M2, M3, M4) y el SAD y las posiciones de barras.

CALIBRACIÓN EN POTENCIA DE LOS CANALES DE MARCHA DEL RP10								
Configuración:								30
Modo:								1
Facilidad:								Radial 3 (trabajo)
Secuencia:								PPR
Crítico (Hora inicio):								BS1=BS2=BS3=100%, BC1=25.1%, BC2=0.0%, BCF=50.4% (inicio: 12:00 hr)
Crítico (Hora fin):								BS1=BS2=BS3=100%, BC1=36.1%, BC2=0.0%, BCF=51.3% (fin:14:15 hr)
Hora	P (MW)	M1(A)	M2(A)	M3(A)	M4(A)	SAD(A)	BC2(%)	BCF (%)
12:00	1	6.0E-06	3.0E-06	3.0E-06	4.1E-06	4.1E-06	25.1	50.4
12:10	2	9.0E-06	5.0E-06	5.0E-06	7.0E-06	7.1E-06	25.1	52.3
12:20	3	1.2E-05	8.0E-06	9.0E-06	9.9E-06	1.0E-05	25.7	53.3
12:32	4	1.5E-05	9.0E-06	1.0E-05	1.2E-05	1.3E-05	26.7	52.7
12:36	5	1.9E-05	1.0E-05	1.1E-05	1.5E-05	1.5E-05	26.7	56.1
12:44	6	2.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	1.9E-05	1.8E-05	26.7	61.2
12:48	7	2.4E-05	1.2E-05	1.6E-05	2.2E-05	2.1E-05	27.8	58.3
12:52	8	2.8E-05	1.3E-05	1.8E-05	2.5E-05	2.4E-05	28.6	57.1
13:00	9	3.0E-05	1.6E-05	1.9E-05	2.8E-05	2.7E-05	29.7	57.3
13:04	10	3.2E-05	1.8E-05	2.1E-05	3.0E-05	3.0E-05	30.0	60.5
13:10	11	3.6E-05	1.9E-05	2.2E-05	3.3E-05	3.3E-05	31.5	57.6
13:15	12	4.1E-05	2.0E-05	2.8E-05	3.9E-05	3.9E-05	32.2	60.9
13:21	11	3.9E-05	1.9E-05	2.3E-05	3.5E-05	3.4E-05	32.6	61.6
13:25	10	3.5E-05	1.8E-05	2.2E-05	3.2E-05	3.2E-05	33.0	59.8
13:30	9	3.1E-05	1.5E-05	2.0E-05	2.9E-05	2.8E-05	33.1	62.0
13:35	8	2.9E-05	1.4E-05	1.9E-05	2.6E-05	2.6E-05	34.1	57.9
13:41	7	2.5E-05	1.2E-05	1.7E-05	2.4E-05	2.2E-05	34.1	59.3
13:46	6	2.1E-05	1.1E-05	1.3E-05	2.0E-05	1.9E-05	34.1	60.5
13:50	5	1.9E-05	1.0E-05	1.1E-05	1.7E-05	1.6E-05	34.1	60.6
13:55	4	1.6E-05	9.0E-06	1.0E-05	1.4E-05	1.3E-05	34.1	61.7
14:00	3	1.4E-05	9.0E-06	9.0E-06	1.1E-05	1.1E-05	34.1	62.8
14:10	2	1.0E-05	4.0E-06	4.0E-06	6.6E-06	6.7E-06	35.7	51.2
14:15	1	9.0E-06	4.0E-06	4.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	36.1	51.3

Tabla 3. Registro, para el Caso 2 (AAN), de los datos de corriente para las cadenas de marcha (M1, M2, M3, M4) y el SAD y las posiciones de barras.

CALIBRACIÓN EN POTENCIA DE LOS CANALES DE MARCHA DEL RP10								
Configuración:								30
Modo:								1
Facilidad:								Radial 3 (trabajo)
Secuencia:								AAN
Crítico (Hora inicio):								BS1=BS2=BS3=100%, BC1=25.1%, BC2=0.0%, BCF=50.4% (inicio: 12:00 hr)
Crítico (Hora fin):								BS1=BS2=BS3=100%, BC1=36.1%, BC2=0.0%, BCF=51.3% (fin:14:15 hr)
Hora	P (MW)	M1(A)	M2(A)	M3(A)	M4(A)	SAD(A)	BC1(%)	BCF (%)
12:00	1	6.0E-06	4.0E-06	3.0E-06	3.5E-06	3.5E-06	36.6	50.4
12:10	2	8.0E-06	5.0E-06	6.0E-06	4.8E-06	4.9E-06	36.6	52.3
12:20	3	1.0E-05	8.0E-06	9.0E-06	7.2E-06	7.3E-06	36.9	53.3
12:32	4	1.2E-05	1.0E-05	1.1E-05	9.8E-06	9.8E-06	37.3	52.7
12:36	5	1.4E-05	1.1E-05	1.2E-05	1.2E-05	1.1E-05	37.7	56.1
12:44	6	1.7E-05	1.2E-05	1.4E-05	1.5E-05	1.3E-05	38.3	61.2
12:48	7	1.8E-05	1.3E-05	1.6E-05	1.8E-05	1.4E-05	39.1	58.3
12:52	8	2.1E-05	1.7E-05	2.0E-05	1.9E-05	1.8E-05	39.9	57.1
13:00	9	2.3E-05	1.8E-05	2.2E-05	2.2E-05	2.1E-05	40.8	57.3
13:04	10	2.6E-05	1.9E-05	2.3E-05	2.4E-05	2.3E-05	40.8	60.5
13:10	11	2.8E-05	2.1E-05	2.5E-05	2.7E-05	2.5E-05	41.9	57.6
13:15	12	3.1E-05	2.2E-05	2.8E-05	2.9E-05	2.7E-05	42.4	60.9
13:21	11	2.8E-05	2.1E-05	2.6E-05	2.7E-05	2.5E-05	43.0	61.6
13:25	10	2.7E-05	2.0E-05	2.5E-05	2.5E-05	2.3E-05	43.4	59.8
13:30	9	2.4E-05	1.8E-05	2.2E-05	2.3E-05	2.1E-05	43.9	62.0
13:35	8	2.2E-05	1.7E-05	2.0E-05	2.0E-05	1.8E-05	44.3	57.9
13:41	7	1.9E-05	1.5E-05	1.8E-05	1.8E-05	1.6E-05	44.6	59.3
13:46	6	1.8E-05	1.7E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.3E-05	44.9	60.5
13:50	5	1.4E-05	1.1E-05	1.3E-05	1.2E-05	1.2E-05	44.9	60.6
13:55	4	1.2E-05	1.0E-05	1.1E-05	1.0E-05	9.0E-06	45.3	61.7
14:00	3	1.0E-05	8.0E-06	9.0E-06	7.6E-06	7.7E-06	45.6	62.8
14:10	2	8.5E-06	6.0E-06	7.0E-06	6.0E-06	6.0E-06	45.8	51.2
14:15	1	6.0E-06	4.5E-06	4.0E-06	3.3E-06	3.1E-06	36.1	51.3

Para construir las curvas de calibración por cada cámara tomamos el promedio entre las dos lecturas para cada potencia (en la subida y en la bajada). Mientras que para la cámara de marcha N° 4 (M4) tuvimos dos valores más, debido a que consideramos como dos datos adicionales los provenientes del sistema

de adquisición (SAD), toda vez que ella es una lectura digital de las variaciones que se observan en las ventanas analógicas (Figura 3). Los datos de los promedios y sus errores para los valores hasta 10 MW se presentan en las Tablas 4 y 5 para los Casos 1 (PPR) y 2 (AAN), respectivamente.

Tabla 4. Resultados promediados para el Caso 1 (PPR).

Hora	P (MW)	PM1	ERRM1(%)	PM2	ERRM2(%)	PM3	ERRM3(%)	PM4	ERR(%)
12:00	1	7.50E-06	2.83E+01	3.50E-06	2.02E+01	3.50E-06	2.02E+01	5.05E-06	2.66E+01
12:10	2	9.50E-06	7.44E+00	4.50E-06	1.57E+01	4.50E-06	1.57E+01	6.80E-06	4.16E+00
12:20	3	1.30E-05	1.09E+01	8.50E-06	8.32E+00	9.00E-06	0.00E+00	1.05E-05	7.44E+00
12:32	4	1.55E-05	4.56E+00	9.00E-06	0.00E+00	1.00E-05	0.00E+00	1.30E-05	1.09E+01
12:36	5	1.90E-05	0.00E+00	1.00E-05	0.00E+00	1.10E-05	0.00E+00	1.60E-05	8.84E+00
12:44	6	2.10E-05	0.00E+00	1.10E-05	0.00E+00	1.30E-05	0.00E+00	1.95E-05	3.63E+00
12:48	7	2.45E-05	2.89E+00	1.20E-05	0.00E+00	1.65E-05	4.29E+00	2.30E-05	6.15E+00
12:52	8	2.85E-05	2.48E+00	1.35E-05	5.24E+00	1.85E-05	3.82E+00	2.55E-05	2.77E+00
13:00	9	3.05E-05	2.32E+00	1.55E-05	4.56E+00	1.95E-05	3.63E+00	2.85E-05	2.48E+00
13:04	10	3.35E-05	6.33E+00	1.80E-05	0.00E+00	2.15E-05	3.29E+00	3.10E-05	4.56E+00

Tabla 5. Resultados promediados para el Caso 2 (AAN).

Hora	P (MW)	PM1	ERRM1(%)	PM2	ERRM2(%)	PM3	ERRM3(%)	PM4	ERR(%)
12:00	1	6.00E-06	0.00E+00	4.25E-06	8.32E+00	3.50E-06	2.02E+01	3.38E-06	5.24E+00
12:10	2	8.25E-06	4.29E+00	5.50E-06	1.29E+01	6.50E-06	1.09E+01	5.40E-06	1.57E+01
12:20	3	1.00E-05	0.00E+00	8.00E-06	0.00E+00	9.00E-06	0.00E+00	7.40E-06	3.82E+00
12:32	4	1.20E-05	0.00E+00	1.00E-05	0.00E+00	1.10E-05	0.00E+00	9.90E-06	1.43E+00
12:36	5	1.40E-05	0.00E+00	1.10E-05	0.00E+00	1.23E-05	2.89E+00	1.20E-05	0.00E+00
12:44	6	1.73E-05	2.05E+00	1.43E-05	2.23E+01	1.45E-05	4.88E+00	1.50E-05	0.00E+00
12:48	7	1.85E-05	3.82E+00	1.38E-05	7.71E+00	1.70E-05	8.32E+00	1.80E-05	0.00E+00
12:52	8	2.13E-05	1.66E+00	1.68E-05	2.11E+00	2.00E-05	0.00E+00	1.95E-05	3.63E+00
13:00	9	2.35E-05	3.01E+00	1.80E-05	0.00E+00	2.20E-05	0.00E+00	2.25E-05	3.14E+00
13:04	10	2.63E-05	4.04E+00	1.93E-05	5.51E+00	2.35E-05	6.02E+00	2.42E-05	3.81E+00

4.1 Curvas de Calibración

La representación de las Tablas 4 y 5, corriente (I) versus potencia (P), es lo que denominamos las curvas de calibración para

las diferentes cadenas de marcha, se muestran en las Figuras 4 y 6, mientras que las correspondientes a las de marcha M4 en las Figuras 5 y 7, para los casos estudiados: (Caso1: PPR, Caso 2: AAN).

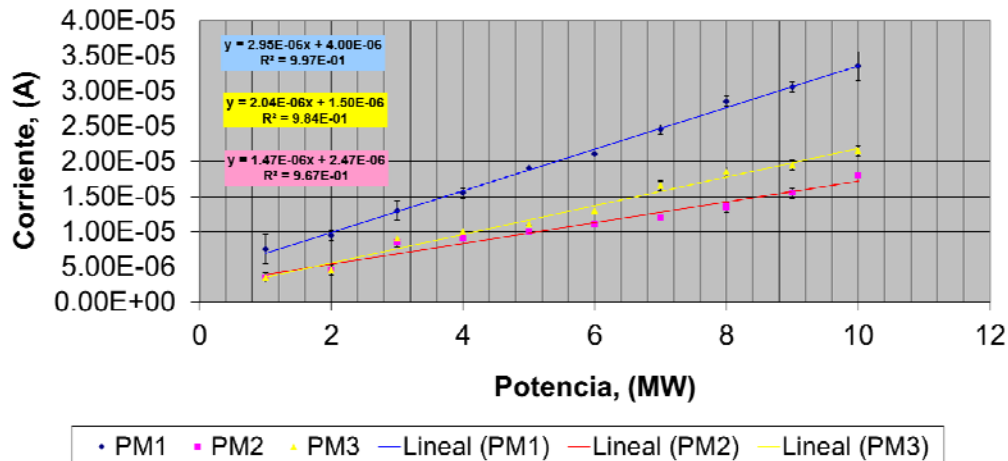


Figura 4. Curvas de calibración de las cadenas de marcha M1, M2, M3 para la configuración nuclear N30, para la configuración de barras de control denominadas PPR (Caso 1).

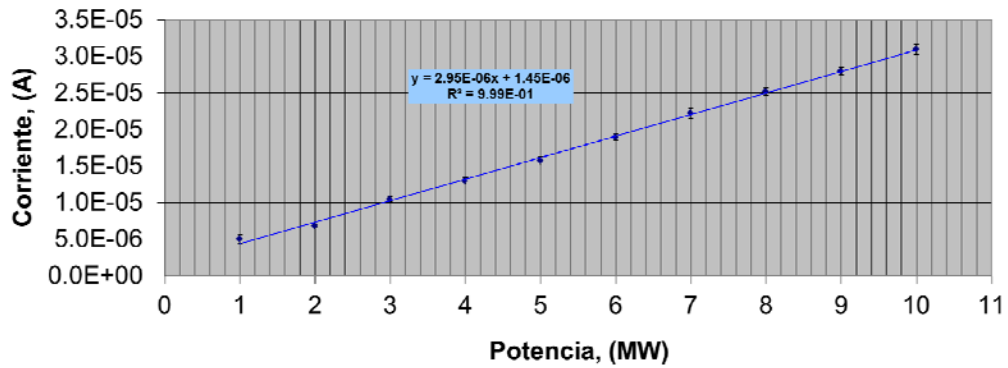


Figura 5. Curvas de calibración de la cadena de marcha M4 para la configuración nuclear N30, y configuración de barras de control denominadas PPR (Caso 1).

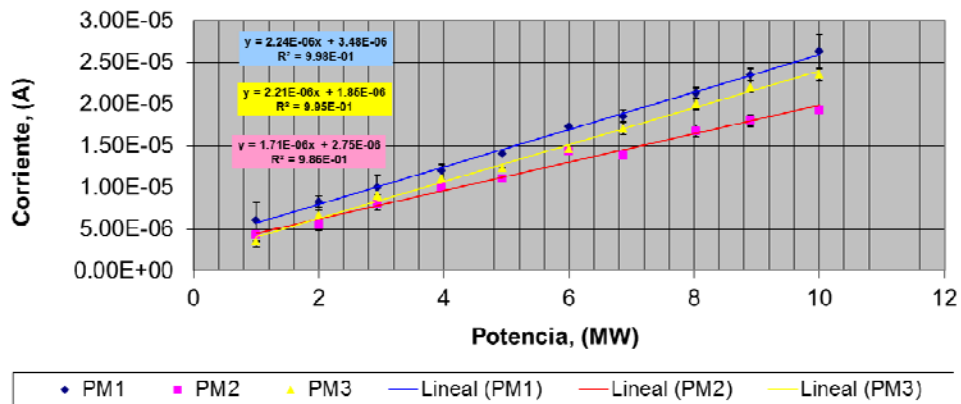


Figura 6. Curvas de calibración de las cadenas de marcha M1, M2, M3 para la configuración nuclear N30, en la configuración de barras de control denominadas AAN (Caso 2).

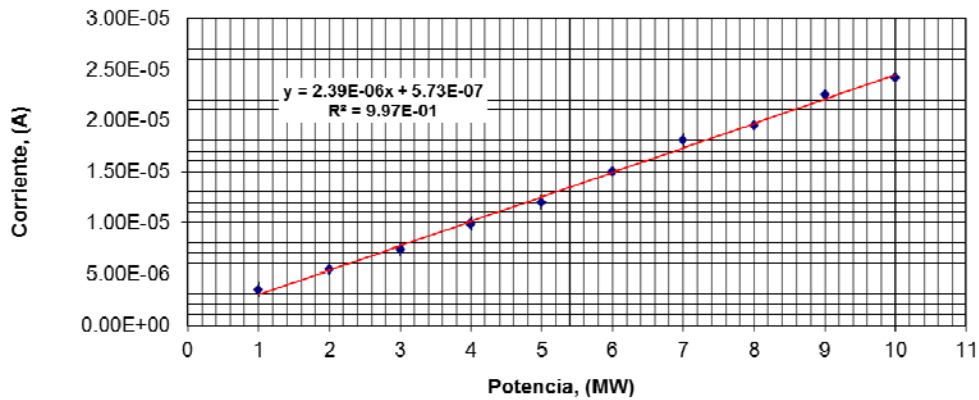


Figura 7. Curvas de calibración de la cadena de marcha M4 para la configuración nuclear N° 30 y configuración de barras de control denominadas AAN (Caso 2).

Las ecuaciones de las rectas correspondientes a las cadenas de marcha para los casos son los siguientes: Caso 1 (PPR):

Cadena de marcha M1:

$$I_{M1}(A) = 2.95 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 4.00 \times 10^{-6}, \\ R^2 = 9.97 \times 10^{-1}$$

Cadena de marcha M2:

$$I_{M2}(A) = 1.47 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 2.47 \times 10^{-6}, \\ R^2 = 9.67 \times 10^{-1}$$

Cadena de marcha M3:

$$I_{M3}(A) = 2.04 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 1.50 \times 10^{-6}, \\ R^2 = 9.96 \times 10^{-1}$$

Cadena de marcha M4:

$$I_{M4}(A) = 2.95 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 1.45 \times 10^{-6}, \\ R^2 = 9.99 \times 10^{-1}$$

Las dispersiones de los datos son del orden del 10 % para bajas potencias (menores a 2 MW), disminuyendo conforme se eleva la potencia se puede observar 3 % para potencias superiores a 5 MW y 1 % a 10 MW.

4.2 Caso 2 (AAN):

Las dispersiones de los datos son del orden del 10 % para bajas potencias (menores a 2 MW), disminuyendo conforme se eleva la potencia se puede observar 3% para potencias superiores a 5 MW y 1 % a 10 MW.

Cadena de marcha M1:

$$I_{M1}(A) = 2.24 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 3.48 \times 10^{-6}, \\ R^2 = 9.99 \times 10^{-1}$$

Cadena de marcha M2:

$$I_{M2}(A) = 1.71 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 2.75 \times 10^{-6}, \\ R^2 = 9.86 \times 10^{-1}$$

Cadena de marcha M3:

$$I_{M3}(A) = 2.21 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 1.85 \times 10^{-6}, \\ R^2 = 9.95 \times 10^{-1}$$

Cadena de marcha M4:

$$I_{M4}(A) = 2.39 \times 10^{-6} \times P(\text{MW}) + 5.73 \times 10^{-7}, \\ R^2 = 9.97 \times 10^{-1}$$

5. Discusión de resultados

Las variaciones de los resultados (error de la media) incrementa cuando las potencias son menores, alcanzando hasta 17 %, y esto

debido a que es difícil la estabilización en la lectura de las temperaturas.

Con el fin de hacer reproducible la curva de calibración obtenida se debe repetir el mismo juego de barras de control, las mismas condiciones de las facilidades y el modo de refrigeración (para el artículo se utilizaron tres bombas).

Debido a que el tiempo de la experiencia dura 4 horas (es muy prolongado frente a las necesidades de uso comercial), tomamos los datos para la subida en potencia (de 1 a 10 MW) y luego para el descenso (de 10 a 1 MW) y con un número de mediciones reducido. Con el fin de mejorar la precisión se recomienda hacer más mediciones y emplear más tiempo en la estabilización de las potencias, sobre todo cuando son menores a los 3 MW.

No se ha considerado incertidumbres en la variable potencia, debido a que tomamos como dato la lectura proveniente de la ventana digital del nitrógeno 16, su lectura respecto a la potencia real (método de balance térmico) no se discute en este informe.

Se ha asumido que todos los dispositivos electrónicos de las cadenas correspondientes están en las condiciones de operatividad normales.

6. Conclusiones

Se ha establecido un método práctico y operativamente simple, que permite determinar las curvas de calibración en potencia del reactor, para el caso de dos configuraciones de barras de control usuales en la explotación comercial del reactor RP-10, denominados arreglo PPR (Producción de radioisótopos) y arreglo AAN (Activación neutrónica).

El método se basa en la lectura de potencia provista por el sistema de medición del nitrógeno 16 y la corriente de los canales de marcha mostrados en el sistema de adquisición del reactor (SAD). Se hace notar que estas curvas tienen valides mientras no se hagan modificaciones fuertes cerca a los detectores, tales como cambios de elementos combustibles con grados de quemado muy diferentes, por lo que se recomienda realizar nuevas mediciones si se cambia de

configuración del núcleo. El acceso a estas curvas de calibración facilita la inspección por parte de la autoridad regulatoria nacional, y también la comunicación con el usuario del reactor, pues ellos sabrán a qué corriente (potencia) se ha irradiado su muestra.

A fin de disminuir las incertidumbres presentadas en las lecturas de las corrientes se debe incrementar el tiempo de estabilización por cada cambio de potencia, es recomendable 30 minutos. También es recomendable remedir las curvas de calibración cada 4 meses a fin de dar cuenta de la variación del grado de quemado de los elementos combustibles y las barras de control.

7. Referencias

- [1]. Glasstone S, Sesonske A. Ingeniería de reactores nucleares. Barcelona: Editorial Reverté; 1975.
- [2]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de Seguridad. Capítulo 15. Departamento de Operación. Lima: IPEN. 1996. [Informe interno].
- [3]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Instalación del sistema de nitrógeno 16 en el RP-10. Departamento de Operación. Departamento de Operación. Lima: IPEN. 1996. [Informe interno]. 2008.
- [4]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Calibración por balance térmico configuración nuclear N° 30. Departamento de Cálculo Análisis y Seguridad. Lima: IPEN. 1996. [Informe interno]. 2013.
- [5]. Lamarsh J. Introduction to nuclear reactor theory. New York: Jhon Wiley; 1975.
- [6]. Zúñiga A, Lamas J, Cerrón E, Huapaya I. Medición del factor de pico y la potencia neutrónica de un reactor nuclear. Informe Científico Tecnológico. 2007; 7: 111-118.
- [7]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Informe de Seguridad. Capítulo 17. Departamento de Mantenimiento Lima: IPEN. 1996. [Informe interno].
- [8]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Laboratorio de Física Experimental de Reactores. Cuaderno. Lima: IPEN. 2013. [Informe interno].