

# Medición del tiempo de máximo veneno en una parada intempestiva del reactor nuclear RP-10

Agustín Zuñiga [azuniga@ipen.gob.pe](mailto:azuniga@ipen.gob.pe)

Instituto Peruano de Energía Nuclear. Departamento de Cálculo Análisis y Seguridad  
Av. Canadá 1470, Lima-41, Perú.

## Resumen

Muchos parámetros de un reactor nuclear son conocidos únicamente por cálculo, sin embargo es posible que algunos sean medidos mediante adecuados experimentos. Tal es el caso de la evolución de los venenos después de una parada intempestiva del reactor. Se sabe que el tiempo muerto del reactor puede ser perjudicial en la operación comercial del mismo, cuando algún evento produce repentinamente su parada. En este trabajo presentamos una manera simple de medir el tiempo muerto, tiempo de máxima concentración de venenos, la máxima reactividad negativa insertada y el exceso de reactividad de núcleo completamente envenenado para las condiciones de parada súbita cuando el reactor se halla operando a plena potencia (10 MW:  $0.3 \times 10^{-4}$  A) durante 5.30 horas, se simuló la parada dejando al reactor a una potencia de 100 W:  $0.3 \times 10^{-9}$  A. Los resultados obtenidos fueron: tiempo de máxima concentración 11 horas con 17 minutos; máxima reactividad negativa insertada -4.62 dólares; exceso de reactividad del núcleo en máximo envenenamiento 0.19 dólares. El experimento duró 70 horas. Para las condiciones de operación establecidas la parada no lo saca de servicio.

## Abstract

Many parameters in research reactors are known only by calculation; however it is possible to know some of them experimentally. This is the case with the evolution of xenon, after a suddenly stopping. It is well known that the dead time of the reactor could interrupt, a routinely commercial operation, if some event begins the scram. In this work we present a simple determination of the time of maximum concentration of poison and the excess of reactivity that allow the operation to continue. The method is based on recording the critical position of rods while the evolution of poisons. The results obtained are: the time of maximum poisons is 11h17min after shutdown and maximum reactivity of the poisons is -4.62 dollars. The reactor was operating during 5h28min in full power, 10 MW. These results show that for the operational condition of burnup and the operation time the suddenly stopped don't go out the service.

**Palabra clave:** veneno xenón, operación de reactores de investigación, física de reactores.

## 1 Introducción

Durante la operación rutinaria de un reactor de investigación y producción de radioisótopos como el RP-10, la variación en reactividad del sistema se da por el consumo del combustible y también por la producción de productos de fisión altamente absorbentes de neutrones, los más importantes son el Xenón-135 y el Samario-149, que presentan secciones transversales de absorción del orden de  $10^6$  barns, en comparación con 10 barns del U-238, o de 585 barns del U-235. Por lo que si su presencia es demasiado grande puede impedir la operatividad del reactor. La peor situación ocurriría si se produce una parada intempestiva,

durante la irradiación de blancos para la producción de radioisótopos, digamos que de las 10 horas de producción, preestablecida, la parada ocurre en la séptima hora por algún evento, cuya reparación toma 7 horas.

Las preguntas que se plantea el operador son, ¿estará en condiciones de volver a poner a crítico el reactor de manera inmediata? Si no fuera posible, entonces, ¿cuánto tiempo tardará en recuperar operatividad? Se sabe que la causa para esta indisponibilidad se debe a la acumulación de los venenos, por lo que el explotador requiere conocer la curva de evolución del veneno luego de una parada súbita.

Usualmente las respuestas no son conocidas, para su sistema, porque asume que no habrá paradas intempestivas o las estimaciones de cálculo son suficientes.

Para mantener la disponibilidad permanente del sistema, es necesario conocer la respuesta del sistema, adicionalmente a los resultados teóricos disponibles. En el presente trabajo se propone un método experimental simple, que permite dar respuesta a las interrogantes señaladas.

## 2 Fundamento Teórico

### 2.1 Cambios de reactividad

El estado de un reactor nuclear inicialmente crítico puede tornarse subcrítico o supercrítico si sus propiedades cambian, conduciendo a que su factor de multiplicación se haga diferente de uno. Estos cambios suelen ocurrir por diversas razones, entre las más importantes están: movimiento de barras de control, quemado del combustible, producción de isótopos, cambios en temperatura, cambios ambientales y accidentes.

Nuestro interés corresponde a la presencia de productos de fisión, fuertemente absorbentes de neutrones, llamados, venenos, que al tener altísimas secciones transversales de absorción pueden ser determinantes en la mantención del estado crítico y operación rutinaria del reactor.

Dado que estas secciones transversales de absorción decrecen con el aumento de la energía del neutrón, estos venenos son de mayor interés en los reactores térmicos.

Para ver los efectos sobre la reactividad de estos venenos, es suficiente utilizar el modelo de reactor homogéneo y puntual, donde el efecto neto es básicamente sobre el factor de utilización térmica,  $f$ . Con lo que la reactividad debido a la presencia del veneno en un reactor inicialmente crítico ( $\rho = 0$ ), resulta:

$$\rho = - \frac{\Sigma_{aP} / \Sigma_f}{\nu p \epsilon} \quad (1)$$

Donde:

$\Sigma_f$ : sección transversal macroscópica térmica promedio de fisión del combustible.

$\Sigma_{aP}$ : sección transversal macroscópica térmica promedio de absorción del veneno.

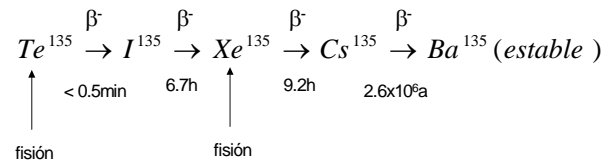
$\nu$ : número de neutrones producidos en una fisión.

$p$ : probabilidad de escape a la resonancia.

$\epsilon$ : probabilidad de fisión rápida.

### 2.2 La producción de Xenón

El producto de fisión, considerado veneno, más importante producido en el reactor es el Xe-135 (xenón), con una sección transversal a 2200 m/s, de  $2.7 \times 10^6$  barns. Este isótopo se acumula por el proceso de decaimiento del I-135 (yodo) y por la producción directa de la fisión del U235. Mientras que el I-135 no se forma directamente de la fisión sino por el decaimiento del producto de fisión Te135 (teluro).



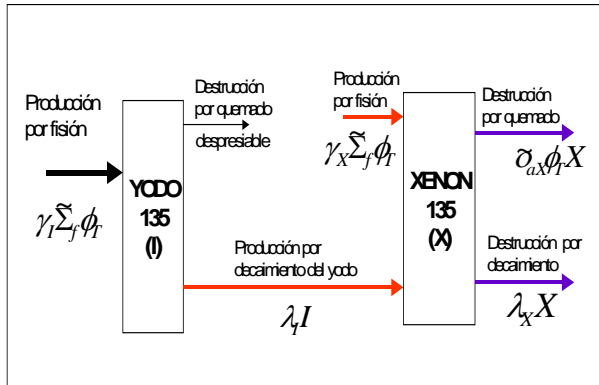
Considerando que el Te-135 decae muy rápidamente a I-135, es factible asumir que el I-135 es producido directamente desde la fisión. Los rendimientos para el I-135 y Xe-135, son 0.061 y 0.003 respectivamente. Las constantes de decaimiento correspondientes a estos isótopos son  $2.87 \times 10^{-5}$  s y  $2.09 \times 10^{-5}$  s.

Identificando estos procesos de producción y destrucción, las ecuaciones diferenciales de balance de los números de núcleos por unidad de volumen producidos durante la operación del reactor, son

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \Sigma_f \phi_T - \lambda_I I$$

$$\frac{dX}{dt} = \lambda_I I + \gamma_X \Sigma_f \phi_T - \lambda_X X - \sigma_{aX} \phi_T X$$

Donde  $I, X$  son átomos /  $\text{cm}^3$ ,  $\gamma_I, \gamma_X$  son los rendimientos desde la fisión. Las secciones transversales microscópicas y macroscópicas son promediadas y térmicas, evaluadas a las temperaturas de neutrón apropiadas. Esquemáticamente este balance se presenta en la figura 1.



**Figura 1.** Esquema de acumulación del Xenón durante la operación del reactor.

### 2.3 La evolución del Xenón después de una parada intempestiva

Aun cuando los venenos principales son el Xenón-135 y el Samario-149, la importancia del primero es notorio para los tiempos de operación y de parada del presente trabajo, por lo que tratar cualitativamente la descripción del veneno como si fuera solo el Xenón es suficientemente válido, cosa que no lo sería cuando se realicen cuantificaciones teóricas.

La evolución del Xe luego de una parada tiene tres etapas principales: durante la operación; durante la parada y después de reposición del crítico.

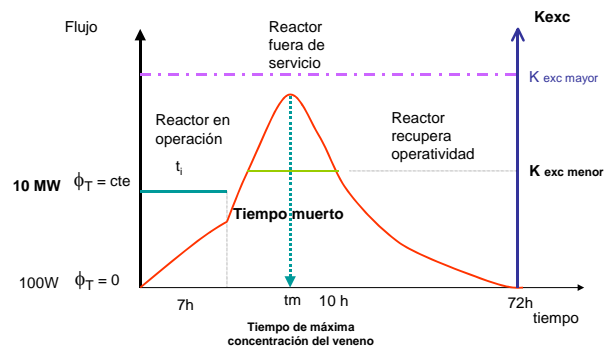
En la primera se asume la operación a una potencia constante (flujo neutrónico térmico constante), digamos plena potencia (PP), durante el tiempo,  $t_i$ . La segunda sección se inicia con la parada imprevista. Durante esta sección el reactor puede permanecer fuera de servicio si su exceso de reactividad es menor que la producida por el veneno. La tercera sección se da cuando el efecto del veneno es superado por la reactividad disponible y se retoma la operatividad del sistema.

Si el reactor para, entonces la producción del Xe-135 por fisión cesa, sin embargo este isótopo continúa produciéndose debido al decaimiento del I-135 presente en el sistema. Por ello la concentración de Xe incrementa inmediatamente a la parada, pero después desaparece por su propio decaimiento.

Si en el momento de la parada la concentración de yodo fue,  $I_0$ , la cantidad en un tiempo  $t$  posterior vendrá dada por la ecuación de decaimiento exponencial  $I_0 e^{-\lambda t}$ , así la solución en la ecuación diferencial, para el Xe resulta en la expresión siguiente:

$$X(t) = X_0 e^{-\lambda_X t} + \frac{\lambda_I I_0}{\lambda_I - \lambda_X} (e^{-\lambda_X t} - e^{-\lambda_I t})$$

De manera cualitativa en la figura 2, se observa el comportamiento durante la operación rutinaria,  $t_i$ , la acumulación del Xe con los procesos de producción y destrucción completos.



**Figura 2.** Evolución del veneno luego de una parada intempestiva, si el reactor queda fuera de servicio hay un tiempo muerto, cuando la reactividad negativa del veneno es menor que el exceso de reactividad disponible se recupera operatividad

Durante la parada intempestiva el Xe acumula por decaimiento del I, y cese de quemado del Xe, este crecimiento alcanza un máximo en el tiempo denominado de máxima concentración del veneno,  $t_{max}$

Si el reactor no tiene el exceso de reactividad suficiente para vencer la reactividad negativa

introducida por el veneno, el reactor no puede ser reestablecido, quedando fuera de servicio, el tiempo que dura esta situación es el tiempo muerto. Sin embargo; si el exceso de reactividad es mayor no se presentará la región fuera de servicio.

#### 2.4 Reactividad por Xenón

Conforme evolucione la concentración de Xenón, la reactividad negativa insertada al sistema también irá creciendo, para la evolución del Xenón,  $X(t)$ , según la ecuación (1)

$$\rho(t) = -\frac{1}{\beta - \Sigma_f} \frac{\sigma_{ax}}{\Sigma_f} [X_0 e^{-\lambda_x t} + \frac{\lambda_t I_0}{\lambda_t - \lambda_x} (e^{-\lambda_x t} - e^{-\lambda_t t})]$$

### 3 Desarrollo Experimental

Los principales pasos para la realización del experimento fueron:

Definición de la configuración del núcleo;  
Características de la operación del reactor a

plena potencia; Definición del instante de inicio de la parada del reactor; Extracción de toda portamuestras o blancos irradiados; Enfriamiento del reactor hasta la temperatura ambiente; Puesta a crítico a potencia de 100 W; Registro de posición de crítico cada 15 minutos; Registro de la operación en el SAD; Identificación del tiempo de máximo envenenamiento; Continuar registrando la posición de crítico cada 60 minutos; Aseguramiento que no hay veneno; Calibración de barras de control; Determinación de exceso de reactividad del núcleo envenenado; Determinación de exceso de reactividad del núcleo limpio y Determinación de la reactividad de máximo envenenamiento.

No es necesario instrumental adicional al que se dispone en la consola para la realización de las mediciones.

El núcleo cuando se realizó la experiencia tenía, 227 días después del inicio de la configuración N° 28 (figura 3), para una carta de quemado que se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3.** Distribución de quemado de los elementos combustibles normales (NN) y de control (NC) en la configuración 28, para el 21-03-2007. Las posiciones se refieren a la columna y fila correspondiente en la grilla (C2: columna C y fila 2).

Posición	Quemado	Posición	Quemado	Posición	Quemado
C2 NN28	10.04	C4 NN06	45.10	C6 NN23	18.04
D2 NN24	18.92	D4 NN15	53.42	D6 NC06	22.09
E2 NN22	22.84	E4 NN08	52.30	E6 NN19	39.23
F2 NN25	17.27	F4 NN07	40.71	F6 NC01	28.32
G2 NN29	8.66	G4 NN17	40.81	G6 NN26	14.20
C3 NN20	31.65	C5 NN11	46.10	C7 NN31	1.28
D3 NC04	55.43	D5 NN16	49.93	D7 NN13	44.96
E3 NN14	48.49	F5 NN12	48.10	E7 NC07	6.76
F3 NC03	58.69	G5 NN21	26.87	F7 NN05	37.34
G3 NN27	16.35			G7 NN30	4.89

(\*) En esta configuración se registra un quemado mínimo = 1.277 %; quemado máximo = 58.691 %; quemado medio (CCN) = 30.729 %; quemado medio (CCC) = 34.259 %; quemado medio total = 31.206 %; masa U-235 = 5345.290 g y masa consumida = 2424.710 g (Ref. 3).

La operación rutinaria del reactor RP-10 para la producción de radioisótopos es de 5.5 horas a plena potencia, para el caso del experimento la corriente de marcha fue de  $4, 0.28 \times 10^{-4}$  A, equivalente a 10 MW de potencia, la operación se inició a las 09:00 horas, terminando a las

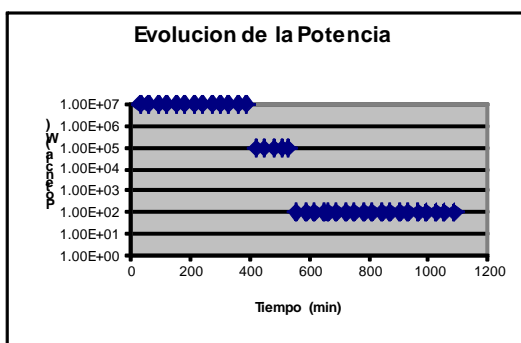
14:28, con lo que el tiempo de operación correspondió a 5 horas con 28 minutos.

El reactor inicia repentinamente la parada, a las 14 horas con 28 minutos (14h28m), cae hasta la potencia de 100 KW, correspondiendo a una corriente de cámara de  $0.2 \times 10^{-6}$  A, la operación a este nivel duró 2h6m. Este paso no

previsto inicialmente, dejó la interrogante de cuando con certeza se inició la parada.

Para evitar cualquier modificación de la reactividad por efectos distintos al veneno se enfrió el agua del reactor hasta las temperaturas de 20 °C, mediante las dos bombas para la circulación de agua, esto se alcanzó luego de dos horas, dejándose el sistema en condiciones de iniciar la lectura de las posiciones de crítico.

Después de 2h6min, el reactor se lleva a 100W correspondiendo a la corriente de cámara  $0.3 \times 10^{-9}$  A, si se considera a este nivel como el inicio de la parada, la hora de inicio a tomarse en cuenta será las 16 horas con 34 minutos. La toma de datos se inició a las 18h50min y se concluyó al día siguiente a las 15h30min. La evolución de estas etapas se registra en la figura 4.



**Figura 4.** Registro de la evolución de la potencia del reactor durante la operación de determinación del tiempo de máxima concentración. Se presentan tres niveles 10 MW durante 5.5 horas, 100KW durante 2.1 horas y 100W hasta el fin de la experiencia.

### 3.1 Registro de posición de crítico cada 15 minutos

Cuando una de las barras de control alcanzó el 100% y la otra el 0% se inició la medición, registrando las posiciones de crítico con la barra que inicia de 0%, esta precaución se tomó con el fin de hacer todos los registros con una sola barra. Tomando un paso de 15 minutos, nos aseguramos de obtener una buena resolución en la identificación del pico.

### 3.2 Identificación del tiempo de máximo envenenamiento

En base al seguimiento de las posiciones de crítico de forma lenta el sistema disminuía la velocidad de crecimiento del veneno. Esto se reflejaba en el número de puntos que se tomaba por cada periodo de 15 minutos en los primeros 20% solo un punto, en la siguiente década 30% dos puntos, ídem para la década de 40%; tres puntos para la década de 50% y 60%; cinco puntos para la década de 70%; diez puntos para la década de 80%; luego un punto en la década de 90% donde se alcanza el pico. Para el descenso el decaimiento es más lento, como que se tomaron dieciséis puntos para la década de 80%.

Después de alcanzado el punto máximo, los registros se hicieron cada 60 minutos hasta las 15h30min del día siguiente.

### 3.3 Aseguramiento que no hay veneno

Para la determinación del exceso de reactividad del núcleo limpio, ausente de venenos se esperó 60 horas, cuando la posición de crítico nos indicó la ausencia de todo veneno.

### 3.4 Calibración de barras de control

Con la seguridad que no hay venenos, se llevó el reactor a 500 W  $1.5 \times 10^{-9}$  A, y se calibraron, las barras de control, mediante el método de período positivo asintótico. La compensación se realizó con la barra completamente opuesta a fin de minimizar el apantallamiento entre barras. Las mediciones se hicieron con tres lecturas de tiempo de doblaje, considerando períodos del orden de 50 segundos. Las calibraciones se realizaron en dos días, el tiempo por cada es de aproximadamente 6 horas.

### 3.5 Determinación de exceso de reactividad del núcleo envenenado

Conocida la posición de crítico en el pico de la evolución del veneno, y la posición de crítico para el núcleo limpio, y utilizando el valor en reactividad de las barras de control, se determina este valor que corresponde a cuanto reactividad positiva dispone el núcleo cuando hay presencia de veneno. Dado que conocemos

la posición de las barras de control conforme aumenta la concentración de veneno y la reactividad correspondiente, se puede determinar la curva de reactividad por veneno para el intervalo de medición trabajada.

### 3.6 Determinación de exceso de reactividad del núcleo limpio

Asegurada la ausencia de veneno se conoce la posición de crítico del sistema y dado que se conoce el valor de las barras de control, se determina el exceso de reactividad del núcleo limpio.

### 3.7 Determinación de la reactividad de máximo envenenamiento

Conocida la posición de crítico para el pico de veneno, y el valor de las barras de control la reactividad correspondiente a la máxima concentración es directa.

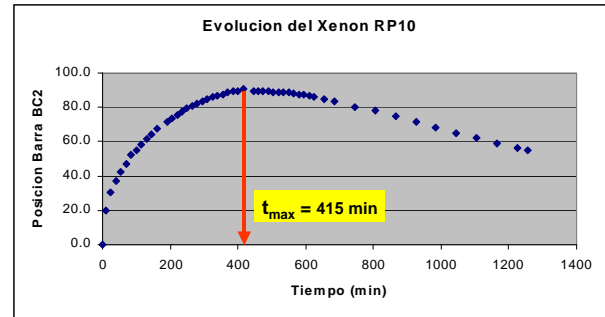
## 4 Resultados

### 4.1 Posición de crítico al inicio de la medición

Como se mencionó en la parte del procedimiento experimental el inicio se dio cuando la posición de la barra de control, que se empleó en el seguimiento, alcanzó el 0.0% de extraída. La posición de crítico al inicio de la medición resultó: BS1=BS2=BS3=BCF=100%, BC1=100% y BC2=0.0%.

### 4.2 Seguimiento del veneno

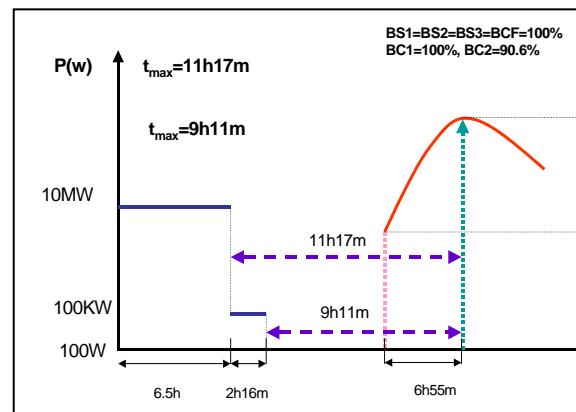
En la tabla 1 se presenta los registros de la posición de crítico cada 15 y 60 minutos. Los resultados de este seguimiento se grafican en la figura 5.



**Figura 5.** El veneno después de la parada crece hasta alcanzar un máximo el tiempo marcado, 415 minutos corresponde al inicio de las mediciones y no al inicio de la parada.

### 4.3 Tiempo de máxima concentración

Considerando el inicio de la parada y el tiempo relativo de máxima concentración del veneno resultaron los tiempos de 11 horas y 17 minutos correspondiendo al inicio del fin de operación a 10MW (14h28min), mientras que 9 horas y 11 minutos correspondiendo al inicio de 100W. Considerando la potencia y tiempo de operación a 100kW, el tiempo de máximo veneno estará más próximo a 11 horas. Esta determinación se representa cualitativamente en la figura 6.



**Figura 6.** Esquema de la identificación del tiempo de máxima concentración con referencia a la bajada de 10 MW, 11horas y 17 minutos, mientras que si la referencia es la bajada de 100KW el tiempo es 9 horas con 11 minutos.

**Tabla 1.** Registro de evolución de los venenos mediante la posición de las barras de control a intervalos fijos de tiempo. Se señalan las posiciones de crítico del núcleo al inicio y fin del experimento.

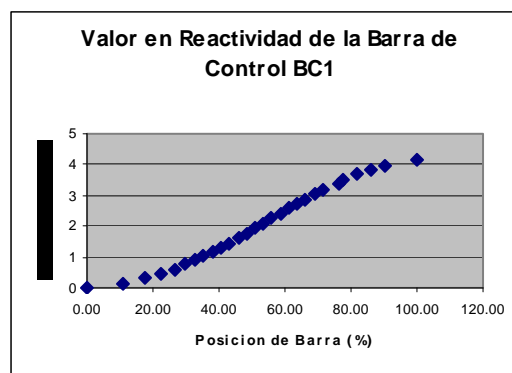
Posicion crítico inicio:  
BS1=BS2=BS3=BCF=100%  
BC1=100%, BC2=0.0%

Posicion crítico fin:  
BS1=BS2=BS3=BCF=100%  
BC1=100%, BC2=54.7%

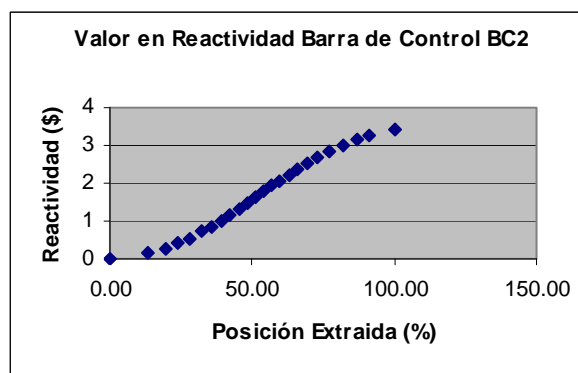
Hora de registro	N° registro	Intervalo (min)	Tiempo (min)	Posicion BC2 (% ext)
06:50:00 p.m.	1	0	0	0.0
	2	11	11	19.8
	3	14	25	30.3
	4	15	40	36.9
	5	15	55	42.6
	6	15	70	46.9
	7	15	85	52.4
	8	15	100	55.0
	9	15	115	58.5
	10	15	130	61.4
	11	15	145	64.4
	12	17	162	67.7
	13	28	190	71.4
	14	15	205	73.6
	15	15	220	75.8
	16	15	235	77.6
	17	15	250	79.3
	18	15	265	80.7
	19	15	280	81.8
	20	15	295	83.5
	21	15	310	84.7
	22	15	325	85.8
	23	15	340	86.8
	24	15	355	87.5
	25	15	370	88.5
	26	15	385	89.2
	27	15	400	89.7
	28	15	415	90.6
	29	30	445	89.3
	30	15	460	89.3
	31	15	475	89.3
	32	15	490	89.3
	33	15	505	89.0
	34	15	520	89.0
	35	15	535	88.9
	36	15	550	88.5
	37	15	565	88.1
	38	15	580	87.3
	39	15	595	87.2
	40	15	610	86.6
	41	15	625	86.1
	42	30	655	84.8
	43	30	685	83.5
	44	60	745	80.0
	45	60	805	77.9
	46	60	865	74.8
	47	60	925	71.6
	48	60	985	68.1
	49	60	1045	65.0
	50	60	1105	62.0
	51	60	1165	59.1
	52	60	1225	56.2
03:30:00 p.m.	53	30	1255	54.7

#### 4.4 Reactividad del veneno

Para determinar reactividades se calibraron las barras de control (BC1 y BC2) en las condiciones de núcleo limpio, por el método del periodo positivo asintótico, las mediciones se presentan en la tabla 2 (Anexo) a partir del cual se construyen las curvas de calibración que se muestran en las figuras 7 y 8.



**Figura 7.** Curva de reactividad de la barra de control BC1 para la configuración de núcleo 28 obtenida por el método de periodo positivo asintótico. Su valor total es de 4.15 dólares.



**Figura 8.** Curva de reactividad de la barra de control BC2 para la configuración de núcleo 28 obtenida por el método de periodo positivo asintótico. Su valor total es de 3.37 dólares

#### 4.5 Exceso de reactividad del núcleo al máximo envenenamiento

El máximo veneno se da para la posición de crítico de BS1=BS2=BS3=BCF=100%, BC1=100% y BC2=90.6% con el resto de barras completamente extraídas. Para

determinar cuánto es la reactividad positiva del núcleo hacemos la lectura desde la barra de control BC2 y corresponde a 0.14 dólares.

#### 4.6 Exceso de reactividad del núcleo limpio

El exceso de reactividad del núcleo limpio se obtiene, en base a la posición de crítico para la condición del núcleo sin veneno:  $BS1=BS2=BS3=BCF=100\%$ ,  $BC1=64.5\%$  y  $BC2=0.0\%$  a partir de las curvas de calibración obtenidas y sus correspondientes valores para las posiciones extraídas de 64.5% en BC1 y 0.0% en BC2, se obtiene 4.76 dólares.

#### 4.7 Reactividad negativa de máximo veneno

Con los valores anteriores la reactividad negativa del veneno en su máxima concentración resulta en -4.62 dólares.

## 5 Conclusiones

Se ha podido demostrar que con el experimento propuesto es posible obtener algunos parámetros referentes al envenenamiento del reactor posterior a una parada intempestiva del RP10, cuando se hallaba operando de manera rutinaria comercialmente.

El reactor para las condiciones de operación expuestas en el trabajo en caso hubiera una parada súbita no sale de servicio en ningún momento porque, la reactividad positiva es suficiente para vencer la reactividad del veneno acumulado.

Los resultados obtenidos experimentalmente pueden ser utilizados para confrontar la validez de diversos modelos referidos a los venenos e indirectamente con otros parámetros, por ejemplo las secciones transversales promedio del núcleo y los valores de flujo medio del núcleo cuando se produjo la parada. Este último parámetro, como se sabe, experimentalmente es muy dificultoso su medición. En un trabajo posterior se presentarán estos resultados.

En cuanto a los cuidados a tener en el procedimiento experimental se restringe a evitar cualquier influencia externa en la variación de reactividad principalmente por

temperatura, por lo que el enfriamiento es fundamental.

Igualmente, se recomienda tomar la precaución que los portamuestras de producción de radioisótopos sean retirados de la grilla del núcleo, en el momento de la parada.

El procedimiento expuesto puede servir para hacer rutinario la medición de las reactividades por envenenamiento de los núcleos y como evolucionan desde el inicio de ciclo hasta el fin del ciclo.

Las mediciones pueden servir para contrastar los modelos del núcleo que disponen los grupos de cálculo. Y determinar otros parámetros de difícil medición como es el flujo neutrónico promedio a plena potencia. Este trabajo se encuentra dentro de la línea de investigación de cinética de reactores.

## 6 Agradecimientos

Al personal del Departamento de Operación del RP-10 en las personas de Rolando Arrieta, Agustín Urcia, José Félix, Roberto Giol, Emilio Veramendi y Alejandro Zapata. Igualmente, a los integrantes del Departamento de Cálculo en las personas de José Castro y Mariano Vela y al alumno Luis Sánchez por su apoyo en la realización del experimento que duró aproximadamente 70 horas continuas.

## 7 Referencias

- [1] Lamarsh JR. Introduction to Nuclear Reactor Theory. New York: Addison Wesley; 1965.
- [2] Glasstone S, Edlund MC. The Elements of Nuclear Reactor Theory. New Jersey: Van Nostrand; 1952.
- [3] Gallardo A. Cálculo de Quemado. Comunicación personal.
- [4] Meghreblian RV, Holmes DK. Reactor Analysis. New York; McGrawHill; 1960.
- [5] USAEC. Reactor Physics Constants. Report ANL-5800 2nd ed. 1963.
- [6] Keepin GR. Physics of Nuclear Kinetics. Massachusetts: Adison Wesley; 1965.



- [7] Weinberg AM, Wigner EP. *The Physical Theory of Neutron Chain Reactors*. Chicago: University of Chicago Press; 1958.
- [8] Lin C, Lin J. Control of Spatial Xenon Oscillations in Pressurized Water Reactors via the Kalman Filter. *Nucl. Sci. Eng.* 1994; 118: 260.
- [9] Song JS, Cho NZ, Lee BH, See SQ. Analytic Initialization of Nonequilibrium Iodine and Xenon Distributions for Core Transient Simulation. *Nucl. Technol.* 1966; 116: 137.
- [10] Song JS, Cho NZ. Two-Group, Flux-Coupled Xenon Oscillation Model with an Equation System of Axial Difference Parameters. *Nucl. Technol.* 1977; 119:105.
- [11] Seong SH, Lee UC, Kim SH, Jang JW. Application of Neural Networks to Analyze Load-Follow Operation in a Pressurized Water Reactor. *Nucl. Technol.* 1999; 128: 276.
- [12] Chernick J, Lellouche G, Wollman W. The Effect of Temperature on Xenon Instability. *Nucl. Sci. Eng.* 1961; 10: 120.
- [13] Wang SJ, Lin MS. Xenon Dynamics and Related Parameters in the Taiwan Research Reactor. *Nucl. Technol.* 1991; 95: 156.
- [14] Lewins JD, Wilson PH. Gross Xenon Stability. *Nucl. Technol.* 1977; 117: 15.
- [15] Wang P, Aldemir T. Real-Time Xenon Estimation in Nuclear Power Plants. *Trans. Am. Nucl. Soc.* 1999; 81: 154.
- [16] Jin HL, Gadioli M, Wang P, Aldemir T, Miller DW, Talnagi JW. Validation of a Point Reactor Model for Global Xenon Estimation. ICONE-8, paper no. 8098, American Society of Mechanical Engineers, 2000.
- [17] Marseguerra M, Zio E. Genetic Algorithms for Estimating Effective Parameters in a Lumped Reactor Model for Reactivity Predictions. *Nucl. Sci. Eng.* 2001; 139: 96.

**ANEXO:**

**Tabla 2.** Resultados de la calibración de las barras de control, BC2 y BC1, para la configuración de núcleo 28 obtenida por el método de período positivo asintótico.

**VALOR EN REACTIVIDAD DE LA BARRA DE CONTROL BC1**

Posición de crítico: BS1=BS2=BC2=100%, BS3=73.4%, BC1=0.0%

Potencia: 500 W [1.5 x 10E(-9) A]

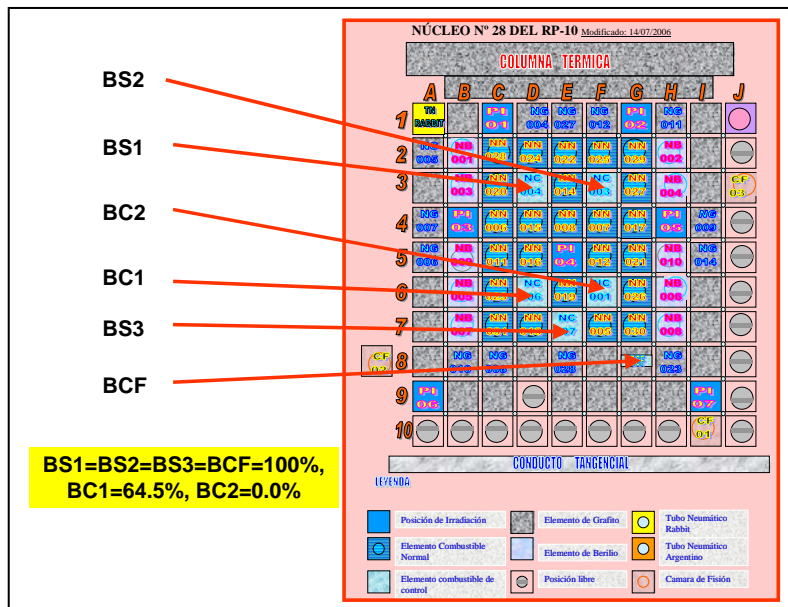
Hora inicio: 09:15

Hora inicio: 15:15

Barra compesador: BS2

Barra calibrada: BC1

Barra Extrac (%)	Barra Compen (%)	t1 (s)	t2 (s)	t3 (s)	Tiempo doblaje t2x (s)	Error (s)	Periodo, T (s)	Error Periodo (%)	React Diferenc (\$)	React Integral (\$)	Error react (\$)
0.00	100.00								0	0	
11.00	91.60	40.31	41.13	42.07	41.17	0.51	59.4	1.2	0.14	0.14	0.00
17.80	84.50	31.41	32.10	31.84	31.78	0.20	45.9	0.6	0.17	0.31	0.00
22.50	79.10	36.98	36.88	38.03	37.30	0.37	53.8	1.0	0.15	0.46	0.00
26.60	74.70	36.49	38.48	37.88	37.62	0.59	54.3	1.6	0.15	0.61	0.01
29.70	70.70	42.70	44.88	43.10	43.56	0.67	62.8	1.5	0.14	0.75	0.01
32.90	67.20	41.27	42.48	41.15	41.63	0.42	60.1	1.0	0.14	0.89	0.01
35.40	63.80	43.53	42.27	43.12	42.97	0.37	62.0	0.9	0.14	1.02	0.01
37.90	60.50	41.97	42.36	43.82	42.72	0.56	61.6	1.3	0.14	1.16	0.02
40.40	57.30	40.78	41.24	41.94	41.32	0.34	59.6	0.8	0.14	1.30	0.01
43.10	53.50	37.84	35.69	36.82	36.78	0.62	53.1	1.7	0.15	1.46	0.02
45.80	50.00	37.18	36.85	38.10	37.38	0.37	53.9	1.0	0.15	1.61	0.02
48.30	46.50	37.29	37.08	37.29	37.22	0.07	53.7	0.2	0.15	1.76	0.00
50.90	42.90	32.07	33.14	33.40	32.87	0.41	47.4	1.2	0.17	1.92	0.02
53.30	39.10	34.55	34.60	35.02	34.72	0.15	50.1	0.4	0.16	2.08	0.01
55.90	34.90	30.93	32.00	29.00	30.64	0.88	44.2	2.9	0.17	2.26	0.06
58.60	30.20	29.98	31.65	32.60	31.41	0.77	45.3	2.4	0.17	2.43	0.06
61.20	25.30	39.38	35.62	35.73	36.91	1.24	53.2	3.3	0.15	2.58	0.09
63.50	19.70	38.41	39.95	39.84	39.40	0.50	56.8	1.3	0.15	2.73	0.03
66.20	11.50	35.22	36.12	35.44	35.59	0.27	51.4	0.8	0.16	2.88	0.02
69.00	0.00	34.10	34.64	34.64	34.46	0.18	49.7	0.5	0.16	3.04	0.02
71.40	71.80	44.65	45.50	46.66	45.60	0.58	65.8	1.3	0.13	3.17	0.04
76.60	63.70	29.67	29.27	30.00	29.65	0.21	42.8	0.7	0.18	3.35	0.02
77.80	59.80	36.86	36.02	35.38	36.09	0.43	52.1	1.2	0.16	3.51	0.04
81.70	55.90	31.49	32.80	32.12	32.14	0.38	46.4	1.2	0.17	3.67	0.04
86.10	51.80	30.62	30.96	31.33	30.97	0.21	44.7	0.7	0.17	3.85	0.03
90.60	48.50	45.92	44.87	45.86	45.55	0.34	65.7	0.7	0.13	3.98	0.03
100.00	43.80	28.29	28.10	27.54	27.98	0.23	40.4	0.8	0.18	4.16	0.03



**Figura 3.** Configuración del núcleo del experimento, la peculiaridad del mismo es que se encontraba al fin de ciclo (6 meses de trabajo). Se identifican las posiciones de las barras de control, de seguridad y la posición de crítico para núcleo limpio.