

Desarrollo de un dispositivo electrónico para el cálculo de reactividad en el reactor nuclear RP-10

Juan Suica^{1,*}, Pablo Mendoza², Gianfranco Huaccho²

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Av. Universitaria /Calle Germán Amezaga 375, Lima 1, Perú

² Instituto Peruano de Energía Nuclear, Dirección de Investigación y Desarrollo, Av. José Sacco s/n, Lima 6, Perú

Resumen

Se ha desarrollado un dispositivo electrónico para el cálculo de reactividad en el reactor nuclear RP-10, mediante el método de cinética inversa obteniéndose resultados comparables con un margen de error $\pm 10\%$ respecto al método del período. En el presente artículo se describen las ventajas del método implementado en la operatividad del reactor RP-10.

Palabras claves: Reactividad; Cinética nuclear, Método de cinética inversa

Development of an electronic device for the calculation of the reactivity in the RP-10 nuclear reactor

Abstract

An electronic device has been developed for the calculation of reactivity in the RP-10 nuclear reactor using the inverse kinetic method, obtaining comparable results in a margin of error $\pm 10\%$ respect to the period method. In this article the advantages of the method implemented in the operation of the RP-10 reactor are described.

Keywords: Reactivity; Nuclear kinetic, Inverse kinetic method

1. Introducción

Uno de los parámetros más importantes en la física de reactores es la reactividad, cuyo valor nos indica el estado de criticidad del reactor, información de vital importancia para las experiencias como para la operación del reactor. Dicho parámetro se define matemáticamente en términos del factor de multiplicación efectivo (K_{eff}) [1,2] como se expresa en la ecuación siguiente.

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (1)$$

La reactividad puede calcularse con métodos estáticos como el método del período o dinámicos como el método de Rod Drop usados en el reactor RP-10 [3]. Un método alternativo es el método de cinética inversa que permite deducir el valor de reactividad a partir de la evolución instantánea de la población de neutrones.

Este último método se muestra como el más útil desde la perspectiva del operador, debido a que brinda un valor numérico de reactividad en tiempo real, a diferencia del procedimiento convencional consistente en ver los

indicadores analógicos y la gráfica de la evolución de la población de neutrones. Adicionalmente este método fue probado en trabajos anteriores [4], mostrando resultados consistentes con los reportados mediante los métodos tradicionalmente usados en el reactor RP-10.

Para determinar la reactividad mediante el método de cinética inversa es necesario establecer un algoritmo numérico aplicado a una señal proporcional al flujo de neutrones del reactor, que se consigue con una cámara de ionización compensada (CIC). Este arreglo es de una relativa fácil implementación empleando microcontroladores, que poseen módulos conversores y que permiten digitalizar señales analógicas. Actualmente, muchos modelos poseen capacidad de cálculo para usarse en procesamiento de señales, lo que posibilita obtener un dispositivo práctico y fácil de instalar en la consola de control del reactor RP-10.

En el presente trabajo se muestra la metodología empleada para el cálculo de

* Correspondencia autor: juan_suicah@icloud.com

reactividad por el método de cinética inversa y el desarrollo de un dispositivo basado en un microcontrolador para calcular la reactividad, mostrándose los resultados de las pruebas realizadas y su comparación con los métodos empleados actualmente.

2. Descripción del método de cinética inversa

El comportamiento temporal del reactor está caracterizado por las ecuaciones de cinética puntual [2]. Con el método de cinética inversa se busca expresar las ecuaciones de cinética puntual de tal forma que la reactividad sea una función de la población neutrónica [5]:

$$\rho = 1 + \frac{\Lambda^*}{n(t)} \left(\frac{dn(t)}{dt} - \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) \right) \quad (2)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{b_i}{\Lambda^*} N(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (3)$$

Dónde:

- $n(t)$: población neutrónica.
- ρ : reactividad expresada en dólares.
- Λ^* : tiempo entre generaciones normalizado a la constante β del núcleo.
- $c_i(t)$: concentración de precursores del grupo i.
- λ_i : constante de decaimiento del grupo i.
- b_i : fracción de producción de precursores en el grupo i.

Considerando valores discretos para la variable temporal $t=k \cdot h$, donde h es un valor muy pequeño expresado en milisegundos, k es un valor entero no negativo y N un conjunto de valores discretos: $N_0, N_1, N_2 \dots N_k$; proporcionales a $n(t)$.

De la definición anterior podemos obtener un sistema discreto recursivo para el cálculo de la reactividad ρ_k correspondiente al intervalo de tiempo $\{t_{k-1}, t_k\}$.

$$\rho_k = 1 + \frac{\Lambda^*}{h} \left(1 - \frac{N^{k-1}}{N^k} \right) - \Lambda^* \sum_{i=1}^6 \lambda_i \frac{C_i^k}{N^k} \quad (4)$$

$$C_i^k = \frac{C_i^{k-1} + b_i h N^k / \Lambda^*}{1 + \lambda_i h} \quad (5)$$

La discretización del término derivativo de la ecuación (3) se realizó pasando a diferencias como se observa en las ecuaciones (6) y (7), obteniéndose el (5).

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{N^k - N^{k-1}}{h} \quad (6)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{C^k - C^{k-1}}{h} \quad (7)$$

El sistema conformado por las ecuaciones (4) y (5) es una aproximación aceptable para un valor de h menor o igual a 100 ms según se observó de las pruebas realizadas.

3. Desarrollo experimental

3.1 Implementación del reactímetro

Para el desarrollo del dispositivo planteado se utilizó parte de la instrumentación del sistema de ruido neutrónico con que cuenta el Laboratorio de Física de Reactores (LABFER), específicamente una cámara de ionización compensada (CIC) y un amplificador lineal de ganancia variable. En la Figura 1 se muestra un diagrama del sistema implementado.

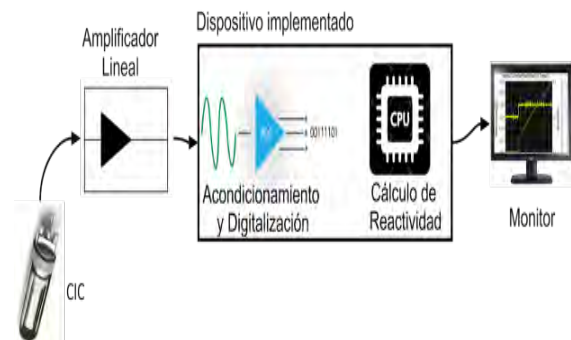


Figura 1. Sistema implementado para la medición de reactividad.

Una CIC es una cámara de ionización integradora, que se alimenta con voltaje constante y cuando la radiación es lo suficientemente intensa para producir ionización en el interior de la cámara, los iones son guiados por el campo eléctrico hacia los electrodos y aparece una corriente la cual puede ser medida directamente [2,6]. La CIC se conecta a un amplificador de corriente para amplificar la señal que esta genere.

Esta señal es acondicionada antes de pasar a la etapa de digitalización. En la Figura 2 se muestra el diagrama de la etapa de acondicionamiento.

El amplificador de ganancia unitaria funciona como buffer y proporciona un efecto de aislamiento entre el filtro pasa bajo y la etapa anterior. El filtro pasa bajo elimina componentes no deseados y el limitador de voltaje limita los valores de voltaje que llegan hasta el ADC

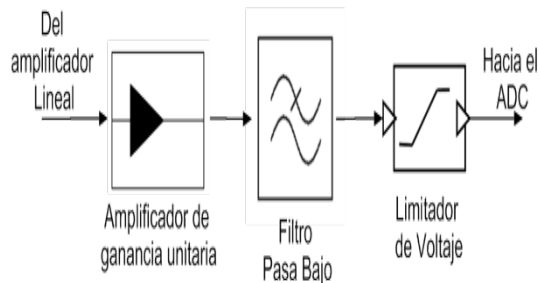


Figura 2. Esquema de la etapa de acondicionamiento implementada.

El bloque más importante de la etapa de acondicionamiento es el filtro pasa bajo, el cual se diseñó teniendo en cuenta la característica de la señal de interés y las acopladas que alteran la señal original.

La configuración usada es el filtro activo Sallen-Key pasa bajas. El uso de este circuito es por su tolerancia a la precisión de los componentes y la sencillez en su implementación, obteniéndose una pendiente de caída de mayor rapidez que la que se obtendría con filtros pasivos [7].

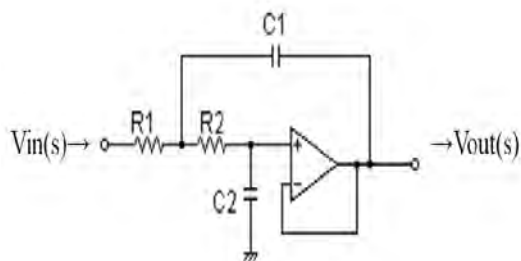


Figura 3. Filtro Sallen-Key implementado.

La señal de interés es relativamente lenta, su evolución puede seguirse visualmente en un monitor, el componente en frecuencia que se acopla y altera es la de 60 Hz. Teniendo en cuenta este criterio se eligieron los componentes para el filtro que permita obtener una frecuencia de corte de 34 Hz [8]. La función de transferencia del filtro se muestra en (6).

$$G(s) = \frac{45913.7}{s^2 + 303s + 45913.7} \quad (6)$$

La tarea de digitalización y el cálculo de reactividad las realiza el microcontrolador AT91SAM3X8E, que está montado en la tarjeta Arduino Due. Entre las características más resaltantes de este microcontrolador y que lo hacen adecuado para este desarrollo son [9]:

- Procesador ARM Cortex M3 de 32bits.
- Frecuencia máxima de trabajo 84 MHz.
- Periférico conversor análogo digital (ADC) de 12 bits.
- Periféricos de comunicación serial.
- Memoria flash para programa hasta 512 kB.

La placa de circuito impreso (PCB) implementada está compuesta adicionalmente por otros bloques funcionales que permiten su funcionamiento a partir de una alimentación simple de 5V a 12V. Estos bloques constan básicamente de inversores, reguladores y elevadores de voltaje, Figura 4.

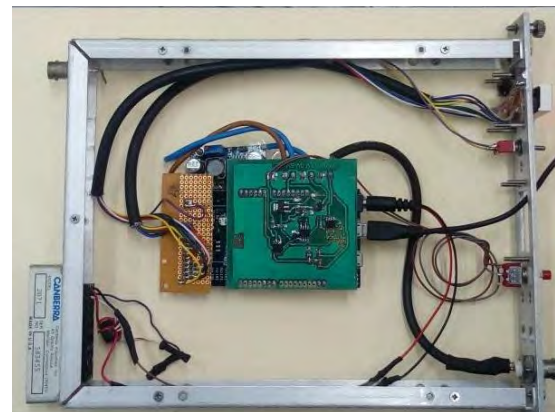


Figura 4. Módulo electrónico implementado montado en porta módulos tipo NIM.

3.2 Cálculo de reactividad

La señal obtenida por la CIC después de su acondicionamiento y digitalización es utilizada para calcular la reactividad. En la Figura 5 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo implementado. El resultado se puede mostrar a través de dos interfaces diferentes; la primera a través de un display numérico mostrando el valor promedio de reactividad en un segundo, y la segunda a través de una interfaz gráfica donde el microcontrolador envía los datos por USB. Para este proyecto también se desarrolló una interfaz con el software LabWindows que permite visualizar y guardar los datos recibidos.

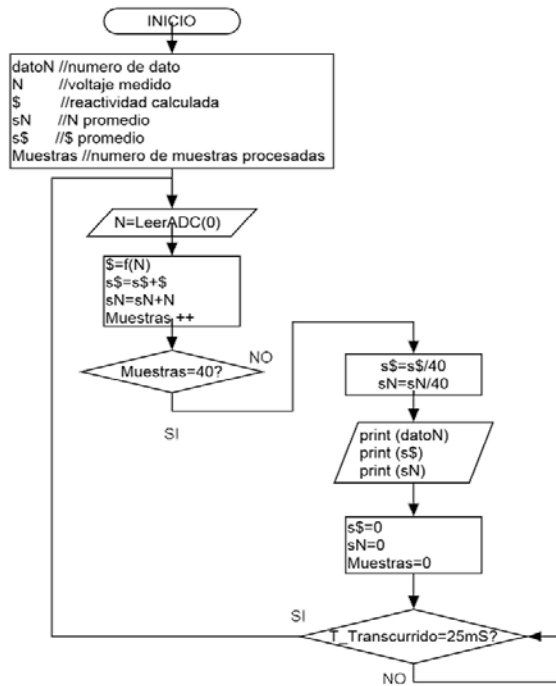


Figura 5. Algoritmo implementado en el Microcontrolador AT91SAM3X8E del Arduino.

3.3 Procedimiento para cálculo de reactividad con el método de cinética inversa en el reactor RP-10

Antes de iniciar con el procedimiento se debe colocar la CIC en una posición cercana al núcleo del reactor, luego:

- Establecer la condición inicial llevando al reactor a crítico y esperar a que el reactímetro tienda a cero.
- Con el reactor en estado crítico se inserta reactividad positiva. El reactímetro indica la evolución de reactividad en tiempo real.
- Se observa el gráfico o el display numérico. Cuando el valor de reactividad tiende a un valor fijo se tendrá el mejor valor de reactividad estimado.

3.4 Simulación

Antes de las pruebas reales se realizaron simulaciones, con ese fin se generó los datos de corriente correspondientes a una inserción de reactividad de 100 pcm equivalente a 0.15 dólares aproximadamente.

A partir de los datos simulados se generó una señal de voltaje con la ayuda de un DAC, la salida se conectó a la entrada de la etapa de acondicionamiento.

La Figura 6 muestra la interfaz implementada para recoger la información que envía el reactímetro por puerto serial, en ella se

observa la rápida convergencia hacia un valor de 0.152\$, muy cercano al simulado lo que permite validar el método implementado.

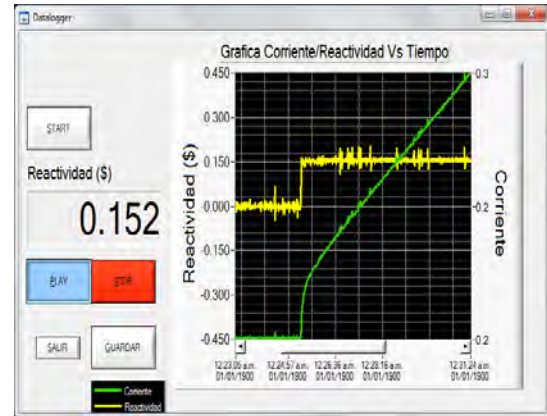


Figura 6. Simulación de una inserción de reactividad de 0.15 dólares.

4. Resultados

Se realizó la calibración de la barra de control BC1 con el método del período, según el procedimiento de determinación de exceso de reactividad [3,10] registrando en paralelo la reactividad instantánea con el método de cinética inversa. Los datos obtenidos los podemos apreciar en la Tabla 2.

Tabla 1. Condiciones de operación para la experiencia de calibración de la barra de control BC1.

| | | | |
|----------|----------|---------------|------|
| Núcleo | 44 | | |
| ICM4: | 5.00E-10 | Potencia (W): | 20 |
| BS1 (%): | 100 | BCF (%): | 50 |
| BS2 (%): | 100 | BC1 (%): | 40 |
| BS3 (%): | 57.2 | BC2 (%): | 62.3 |

Tabla 2. Reactividad calculada para cada tramo de barra extraído.

| | Métodos usados | | | |
|------|------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
| | Cinética inversa | | Período | |
| BC1 | Reactividad | Reactividad acumulada | Reactividad | Reactividad acumulada |
| (%) | (\$) | (\$) | (\$) | (\$) |
| 40 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 44.9 | 0.109 | 0.109 | 0.121 | 0.121 |
| 50.6 | 0.118 | 0.227 | 0.126 | 0.248 |
| 57.2 | 0.113 | 0.340 | 0.122 | 0.370 |
| 66.2 | 0.129 | 0.469 | 0.138 | 0.508 |
| 77.4 | 0.106 | 0.575 | 0.115 | 0.623 |
| 100 | 0.036 | 0.611 | 0.040 | 0.663 |

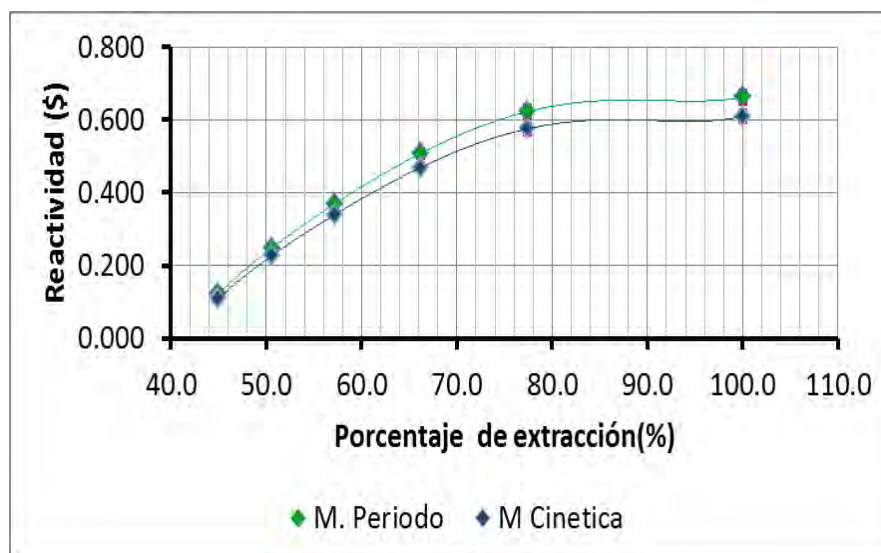


Figura 7. Gráfica reactividad versus tramo de barra extraído.

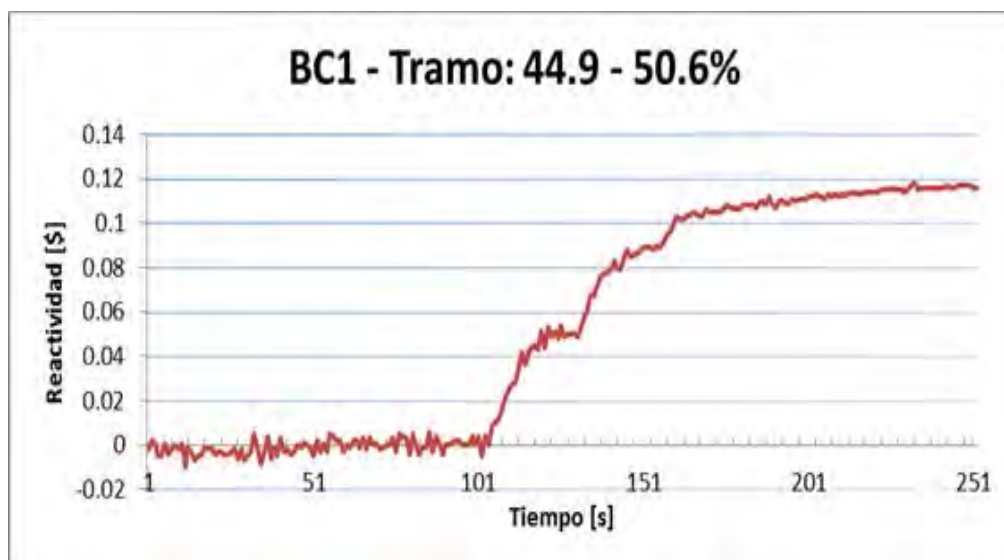


Figura 8. Evolución temporal de la reactividad para la extracción del tramo de barra 44.9 % a 50.6 %.

5. Discusión

El método propuesto de calibración de barras implica que la corriente en las cámaras de ionización compensada, de donde procede la señal de medición, es proporcional a la población neutrónica en cada instante.

En la Tabla 2 se observa que los resultados obtenidos por ambos métodos son comparables con una diferencia relativa menor al 10 %. En la Figura 7 se muestra un comportamiento similar de ambos métodos en función del porcentaje de extracción lo que para fines prácticos indica una viabilidad en la aplicación del método propuesto.

El método de cinética propuesto puede ser muy sensible a cambios sutiles en las condiciones de operación del reactor (temperatura, por ejemplo) gracias a los dispositivos electrónicos incorporados que permiten identificar eventos muy puntuales en el tiempo como la inserción de espadas en los elementos combustibles.

En la Figura 8 se muestra la evolución de la reactividad para una inserción de reactividad positiva permitiendo seguir, en tiempo real, el estado del núcleo del reactor.

El dispositivo implementado es de suma utilidad para el operador, pues dispondrá de una herramienta capaz de “ver” el valor

instantáneo o la evolución de la reactividad en tiempo real anticipándose al control del mismo, siendo de mucha utilidad en experimentos donde se requiere una irradiación a potencia constante.

6. Conclusiones

Los valores de reactividad para la barra de control BC1 son consistentes con los valores obtenidos por el método usualmente empleado, con una diferencia no mayor al 10 %, existiendo una relación proporcional entre ambos.

La sensibilidad del método nos permitirá observar efectos de realimentación de reactividad no perceptibles con los demás métodos.

7. Agradecimientos

Al personal de operaciones del reactor RP-10 del IPEN, en especial al Lic. Edgar Ovalle. Al MSc. Rubén Bruna del Área de Cálculo. Al CONCYTEC por su apoyo financiero en la realización del presente artículo a través de la ejecución del Convenio de Gestión N° 024-2013.

8. Referencias

[1]. Huaccho G. Implementación de un software para el cálculo de reactividad en el reactor RP-10. Instituto Peruano de Energía Nuclear, Dirección de Investigación y

Desarrollo. [Informe interno].

[2]. Glasstone S. Ingeniería de reactores nucleares. México, Reverté, 1990.

[3]. Zúñiga A. Métodos experimentales de medición de reactividad. Informe Nuclear. 1983; Tomo II, 1:42-54.

[4]. Castro J, Zapata M, Bruna R. Validación del programa FERCIN para la calibración de las barras de control del reactor RP-10. Informe Científico Tecnológico. 2004; 4:87-92.

[5]. Santos J, Caballero C, Palacios J. Determinación experimental de la reactividad empleando la cinética inversa: Fundamentos teóricos del código CININV. Revista Cubana de Física. 1996; 14:61-66.

[6]. Knoll G. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons, 1999.

[7]. Floyd T. Dispositivos electrónicos. México: Pearson Educación, 2008.

[8]. Karki J. Active low pass filter design. Texas Instruments.2002. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/sloa049b/sloa049b.pdf>.

[9] Perea F. Arduino essentials. Birmingham, UK: Packt Publishing; 2015.

[10]. Instituto Peruano de Energía Nuclear. Calibración de barras de control al inicio del núcleo 45 y determinación del exceso de reactividad. Dirección de Producción [Informe interno].