

## Cálculo de la Reactividad para Seguridad en Reactores Nucleares

*Daniel Suescún Díaz<sup>(1)</sup> y Oziel Rojas Ávila<sup>(2)</sup>*

*<sup>(1)</sup>Universidad Surcolombiana, Av. Pastrana Borrero – Carrera 1, Neiva, Colombia*

*<sup>(2)</sup>Universidad Popular Autónoma de Puebla, 17 Sur 901, Puebla, México*

*daniel.suescun@usco.edu.co; ozie.rojas@upaep.mx*

### **Resumen**

La medición de la reactividad es una función del tiempo y su cálculo resulta de la variación en la potencia nuclear a partir de la ecuación inversa de la cinética puntual. Tal ecuación es integro diferencial, en donde el término de la integral conserva el histórico de la potencia y la parte diferencial está directamente relacionada con el período del reactor. En la práctica, en una planta nuclear, se requieren de sensores que registren las señales. Por ejemplo el movimiento de las barras de control que originan las fluctuaciones de la potencia nuclear en el tiempo, genera comúnmente señales con ruido, evento que dificulta la estimación de la reactividad. Así es necesario y muy útil construir medidores de reactividad digital en tiempo real, esto permite operar con mayor seguridad un reactor. El cálculo de la reactividad se lleva a cabo empleando la cinética puntual en especial la concentración de precursores de neutrones retrasados. En este trabajo se presenta una nueva forma para reducir las fluctuaciones en el cálculo de la reactividad, por la alta precisión se plantea la generalización del predictor y corrector del método de Adams-Bashforth-Moulton (ABM) de orden 4 para resolver numéricamente las ecuaciones de la cinética puntual para el cálculo de la reactividad, sin usar el histórico de la potencia, debido a la naturaleza que poseen las ecuaciones de la cinética puntual, se utilizan los modificadores de los diferentes predictores para aumentar la precisión en la aproximación obtenida acompañado del filtro conocido como Savitzky-Golay (SG), permiten reducir las fluctuaciones de la reactividad. Es conocido que el filtro SG suaviza y no atenúa la potencia nuclear sin importar su forma, este garantiza disminuir grados de ruido de hasta  $\sigma = 0.01$ , con un paso de tiempo de cálculo de  $\sigma = 0.01$ , s. Esta formulación emplea una aproximación polinómica de Gram, con un grado  $d = 2$ , para calcular los coeficientes de convolución mediante una fórmula analítica que se implementa computacionalmente y evita problemas de mal condicionamiento, ocasionados por la inversión de un sistema lineal. Además en este artículo expone un método híbrido que permite simular el ruido aleatorio Gaussiano, el cual se distribuye alrededor de la potencia media y se reduce las fluctuaciones de la reactividad. Los resultados muestran mejores valores en la máxima diferencia y en los errores absolutos promedio de la reactividad en comparación con lo reportado en la literatura.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando se genera una reacción en cadena por fisión nuclear, se puede categorizar a los neutrones producidos en tres tipos según su origen: Neutrones de origen externo, neutrones instantáneos y neutrones retrasados. Es por la existencia de estos neutrones que es posible operar o controlar un reactor ya que aumentan considerablemente el periodo del reactor.

Durante la operación y el control del reactor es necesario un sistema de medición que permita obtener la reactividad, con el fin no solo de alcanzar el nivel de potencia de operación segura y eficiente, si no también garantizar la seguridad de la planta.

Para el cálculo de la reactividad son varios los autores Shimazu [1], Hoogenboom [2], Binney [3], Ansari [4], Tamura [5], Suescún [6-12], que han realizado diferentes trabajos y principalmente se basan en la discretización del término relacionado con la integral de la ecuación del método inverso, que se conoce como histórico de la potencia.

En la literatura se ha tratado el problema de fluctuaciones de la potencia nuclear por parte del trabajo realizado por Shimazu [1] en donde se expone el filtro Pasa Bajo de primer orden de retardo. Posteriormente Suescún [7]; propone el filtro FIR que permite calcular la reactividad en tiempo real con un paso de tiempo de  $\Delta t = 0.01s$ , pero con un nivel de ruido de hasta  $\sigma = 0.001$ . Luego Suescún [8], mejoró el cálculo usando el doble filtro FIR y el método de ajuste por mínimos cuadrados para la reducción de las fluctuaciones en la señal de reactividad. Posteriormente, Suescún [9], demostró que el filtro Pasa Bajos aplicado por Shimazu [1] atenúa el valor de la señal de reactividad y que era conveniente usar el método de mínimos cuadrados acompañado del método de diferencias finitas. En un posterior trabajo, Suescún [10], empleó el método numérico de Hamming que permite calcular la reactividad con un nivel de precisión de  $O(h^5)$  y que por primera vez se registraba en la literatura. En [11] Propone un nuevo método de aproximación para calcular la reactividad en donde se emplea el primer número de Bernoulli y en un reciente trabajo [12] se expone el corrector generalizado del método de Hamming, para obtener un valor preciso de la reactividad, pero en ambos trabajos los autores no consideraron involucrar la generación de ruido aleatorio, el cual está presente en la realidad.

En este trabajo se presenta la generalización del predictor y corrector del método de ABM [13] para calcular la reactividad y el filtro SG [14] para reducir las fluctuaciones en la reactividad en tiempo real.

## 2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

A continuación se expone el modelo físico-matemático que clásicamente se conoce como las ecuaciones de la cinética puntal y tienen la siguiente representación [15]:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \left[ \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} \right] P(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

El anterior sistema de ecuaciones (1) y (2), se encuentra sujeto a las siguientes condiciones:

$$P(t = 0) = P_0 \quad (3)$$

$$C_i(t = 0) = \frac{\beta_i}{\Lambda \lambda_i} P_0, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

donde:

$P(t)$ : Potencia nuclear

$C_i(t)$ : La concentración del  $i$ -ésimo grupo de los precursores de neutrones retrasados.

$\rho(t)$ : La reactividad nuclear.

$\Lambda$ : El tiempo de generación de neutrones instantáneos.

$\beta_i$ : Fracción efectiva del  $i$ -ésimo grupo de precursores de neutrones retrasados.

$\beta$ : Fracción total efectiva de precursores de neutrones retrasados.

$\lambda_i$ : Constante de decaimiento del  $i$ -ésimo grupo de precursores de neutrones retrasados.

Las ecuaciones de la cinética puntual se pueden derivar de la ecuación de difusión de neutrones que conforman un sistema de siete ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas y no lineales, usualmente se usan seis ecuaciones para precursores de neutrones retrasados y una para la potencia [1]. Físicamente estas ecuaciones describen la evolución temporal de la distribución de neutrones y la concentración de precursores de neutrones retardados en el núcleo del reactor nuclear.

De esta forma para hallar  $\rho(t)$  en términos de  $P(t)$  y suponiendo que  $P(t < 0) = \langle P_0 \rangle$ , es decir cuando el reactor está crítico, la ecuación (2) se puede integrar hasta el tiempo  $(t)$ , resultando:

$$C_i(t) = \frac{\beta_i \langle P_0 \rangle}{\lambda_i \Lambda} e^{-\lambda_i t} + \frac{\beta_i}{\Lambda} \int_0^t e^{-\lambda_i(t-t')} P(t') dt' \quad (5)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (1), se obtiene la ecuación inversa de la cinética puntual, en su forma continua:

$$\rho(t) = \beta + \frac{\Lambda}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt} - \frac{1}{P(t)} \sum_{i=1}^6 \lambda_i \beta_i \left[ \frac{\langle P_0 \rangle}{\lambda_i} e^{-\lambda_i t} + \int_0^t e^{-\lambda_i(t-t')} P(t') dt' \right] \quad (6)$$

La ecuación (6) es una ecuación integro-diferencial frecuentemente usada para programar el movimiento de los bancos de barras de control para obtener una variación deseada de la potencia

nuclear y durante las pruebas físicas de partida de una planta nuclear. También es la ecuación base para el desarrollo de un medidor digital de reactividad, la parte integral es conocida como el histórico de la potencia, ya que usa todos los valores de la potencia nuclear existente y la parte diferencial representa el período del reactor.

### 3. METODO DE ADAMS-BASHFORT- MOULTON

El método multipaso de Adams Bashforth-Moulton puede resolver el problema de valor inicial de la forma  $y' = f(t_k, y_k)$  utilizando información de puntos previos a  $y_k$  para encontrar  $y_{k+1}$ , generalmente dichos puntos se obtienen con el método de Runge Kutta de orden 4. El método de coeficientes indeterminados es usado para calcular la solución de la función  $f(t_k, y_k)$ . Se define el generalizador lineal de pasos de la ecuación diferencial con coeficientes constantes o fórmula generalizada para la integración de una ecuación diferencial de la forma:

$$y_{k+1} = \sum_{i=1}^p \alpha_i y_{k+1-i} + h \sum_{i=0}^p \beta_i y'_{k+1-i} + E \quad (7)$$

donde  $E$  es el error. Los resultados de la ecuación (7), para valores de  $\beta_0 = 0$  hace referencia a ecuaciones explícitas o predictoras; para el caso en el que  $\beta_0 \neq 0$ , hace referencia a una ecuación, implícita o correctora, en consecuencia, para el predictor generalizado de orden 4, se obtiene:

$$y_{k+1} = \sum_{i=1}^4 \alpha_i y_{k+1-i} + h \sum_{i=1}^4 \beta_i y'_{k+1-i} + E_p \quad (8)$$

donde  $E_p$  es el error en el predictor.

Los coeficientes  $\alpha_i, \beta_i$  para  $i=1, \dots, 4$  se calculan al realizar la expansión de la serie de Taylor de la ecuación (8) alrededor de  $y_{k-1}, y_{k-2}, y_{k-3}, y'_{k-1}, y'_{k-2}$  y de  $y'_{k-3}$ .

Por otro lado, la ecuación diferencial con coeficientes constantes para el corrector de orden 4 viene dada por:

$$y_{k+1} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i y_{k+1-i} + h \sum_{i=0}^3 \beta_i y'_{k+1-i} + E_c \quad (9)$$

donde  $E_c$  es el error en el corrector.

Los coeficientes  $\alpha_i, \beta_i$  se calculan al realizar la expansión de la serie de Taylor alrededor de  $y_{k-1}, y_{k-2}, y_{k+1}, y'_{k-1}$  y  $y'_{k-2}$  de la ecuación (9).

En las Tablas I y II, se muestran los valores de los coeficientes en las ecuaciones (8) y (9), se puede obtener nuevas fórmulas explícitas e implícitas. Para el error de estas, se debe tener en cuenta que

que  $E_p = \frac{E}{5!} h^5 y_k^{(5)}(\xi_1)$  y que  $E_c = \frac{E}{5!} h^5 y_k^{(5)}(\xi_2)$ .

**Tabla I. Coeficientes para los predictores.**

Coeficientes \ predictores	P1	P2	P3	P4	P5	P6
$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 - \alpha_3 - \alpha_4$	1	0	0	0	0	1/2
$\alpha_2 = \alpha_2$	0	1	0	0	1/3	1/2
$\alpha_3 = \alpha_3$	0	0	1	0	1/3	0
$\alpha_4 = \alpha_4$	0	0	0	1	1/3	0
$\beta_1 = (1/24)(55 + 9\alpha_2 + 8\alpha_3 + 9\alpha_4)$	55/24	8/3	21/8	8/3	191/72	119/48
$\beta_2 = (1/24)(-59 + 19\alpha_2 + 32\alpha_3 + 27\alpha_4)$	-59/24	-5/3	-9/8	-4/3	-11/8	-99/48
$\beta_3 = (1/24)(37 - 5\alpha_2 + 8\alpha_3 + 27\alpha_4)$	37/24	4/3	15/8	8/3	47/24	69/48
$\beta_4 = (1/24)(-9 + \alpha_2 + 9\alpha_4)$	-9/24	-1/3	-3/8	0	-17/72	-17/48
$E = (1/6)(251 - 19\alpha_2 - 8\alpha_3 - 27\alpha_4)$	251/6	116/3	243/6	224/6	233/6	116/4

**Tabla II. Coeficientes para los correctores.**

Coeficientes \ Correctores	C1	C2	C3	C4	C5	C6
$\alpha_1 = 1 - \alpha_2 - \alpha_3$	1	0	0	1/3	1/2	0
$\alpha_2 = \alpha_2$	0	1	0	1/3	1/2	2/3
$\alpha_3 = \alpha_3$	0	0	1	1/3	0	1/3
$\beta_0 = (1/24)(9 - \alpha_2)$	9/24	1/3	3/8	13/36	17/48	25/72
$\beta_1 = (1/24)(19 + 13\alpha_2 + 8\alpha_3)$	19/24	4/3	9/8	13/12	17/16	91/72
$\beta_2 = (1/24)(-5 + 13\alpha_2 + 32\alpha_3)$	-5/24	1/3	9/8	5/12	1/16	43/72
$\beta_3 = (1/24)(1 - \alpha_2 + 8\alpha_3)$	1/24	0	3/8	5/36	1/48	1/8
$E = (1/6)(19 + 11\alpha_2 - 8\alpha_3)$	-19/6	-4/3	-9/2	-3	-9/4	-43/18

#### 4. FILTRO SAVITZKY-GOLAY

El filtro Savitzky-Golay (SG), es un filtro digital el cual ha sido empleado en diferentes campos, el marco teórico unificado se expone en el trabajo propuesto [16]. El objetivo principal del método es el ajuste mediante mínimos cuadrados en una serie de datos de longitud  $2M + 1$ , donde el polinomio utilizado para el ajuste es evaluado generalmente en el centro de los  $2M + 1$  puntos, siendo este entonces el valor aceptado como valor filtrado de la señal. La idea del filtro SG es la

de aplicar a los datos un filtrado que permita preservar las características principales de la función como el ancho y la altura, mientras se realiza el proceso de mínimos cuadrados.

El método propuesto considera la siguiente formulación. Sea el conjunto de  $2M+1$  valores consecutivos que se ubican simétricamente sobre el origen del vector  $x$ , el cual representa la información con fluctuaciones tanto para la potencia como para la reactividad, su representación vectorial es la siguiente:

$$x = [x_{-M}, \dots, x_{-1}, x_0, x_1, x_2, \dots, x_M]^T \quad (10)$$

Siendo,  $M$  la ventana de filtrado. Ahora se considera una combinación lineal de vectores bases denotados por  $s_i$ ,  $i=0,1,\dots,d$ , definidos como componentes, de la forma:

$$s_i(m) = m^i, \quad -M \leq m \leq M \quad (11)$$

De este mismo modo, se define la matriz  $S_{N \times d+1}$  como un arreglo matricial por columnas, donde cada una tiene un vector base,  $s_i$ , y se representa por la siguiente ecuación:

$$S = [s_0, s_1, \dots, s_d] \quad (12)$$

Posteriormente para conseguir la reducción del ruido en el vector (12), se emplea un polinomio de suavización  $\hat{x}$ , de grado  $d$ , dado por:

$$\hat{x} = \sum_{i=0}^d c_i s_i = [s_0, s_1, \dots, s_d] \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_d \end{bmatrix} = Sc \quad (13)$$

donde,  $c$  es el vector de coeficientes del polinomio dado por la ecuación (13), además  $s$  es la matriz de vectores base representada por la ecuación (12), para formar una combinación lineal. Seguidamente el filtro SG se emplea con un ajuste de mínimos cuadrado, donde el error cuadrático medio sea el mínimo, por lo cual es necesario encontrar un índice de desempeño, conocido como el error o la diferencia vectorial

$$e = x - \hat{x} = x - Sc \quad (14)$$

Con base en lo anterior, el índice de desempeño se puede representar mediante la ecuación:

$$J = e^T e = x^T x - 2c^T S^T x + c^T S^T S c \quad (15)$$

Minimizando  $J$  con respecto al vector  $c$ , se obtiene:

$$\frac{\partial J}{\partial c} = -2S^T x + 2S^T S c = -2S^T (x - Sc) = -2S^T e = 0 \quad (16)$$

Si  $\frac{\partial J}{\partial c} = 0$ , entonces se conforma un sistema de ecuaciones ortogonales, el cual se representa así:

$$S^T S c = S^T x \quad (17)$$

En este orden de ideas, una solución óptima para el sistema expresado por la ecuación (17), resulta ser:

$$c = (S^T S)^{-1} S^T x = G^T x \quad (18)$$

donde se define  $G$  como una matriz de dimensiones  $(N) \times (d+1)$ , esta matriz contiene los coeficientes de convolución y su representación matricial es:

$$G = S F^{-1} = S (S^T S)^{-1} \quad (19)$$

En la ecuación (19), la matriz  $F$ , es una matriz simétrica, denotada por  $F = S^T S$ . Por lo cual esta matriz admite inversa. Luego reemplazando los coeficientes óptimos de la ecuación (18) en la ecuación (14), se obtiene una expresión para los valores suavizados, denotada por:

$$\hat{x} = Sc = SG^T x = S(S^T S)^{-1} S^T x = Bx \quad (20)$$

De la anterior ecuación (20),  $B$  es una matriz de dimensión  $(d+1) \times (d+1)$  simétrica y puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$B = SG^T = GS^T = S(S^T S)^{-1} S^T = [b_{-M}, \dots, b_0, \dots, b_M] \quad (21)$$

La ecuación (20), puede ser reformulada por medio de la expresión:

$$\hat{x} = Bx \Leftrightarrow \hat{x}_m = b_m^T x, \quad -M \leq m \leq M \quad (22)$$

La ecuación (22), se puede escribir como una suma de convolución mediante la siguiente expresión:

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=-M}^M b_o(m)x(n+m) = \sum_{m=-M}^M b_o(-m)x(n-m) \quad (23)$$

donde  $b_o$ , representa la columna de valores que se ubica en el centro de la matriz  $B$ . La ecuación (23) expresa una convolución como señal de salida para una secuencia de datos,  $x(n)$ . Además cabe destacar que la columna de valores,  $b_o$  es simétrica con respecto a los otros valores de la matriz  $B$ , es decir que se puede reemplazar  $b_o(m)$  por  $b_o(-m)$ . Lo anterior indica que el filtro SG tiene una propiedad de invariancia o de estado estable.

Sin embargo, para evitar realizar la inversión del sistema (18) y el mal condicionamiento que se produce cuando no se satisface la condición  $N \leq 2M$ , este artículo propone emplear la aproximación de Gram y obtener una fórmula analítica de los coeficientes de convolución que se agrupan en la matriz  $B$ , de este modo, conviene cambiar el polinomio  $\hat{x}(n)$ , de la ecuación (23), por la siguiente:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^d c_i f_i^m(n), \quad -M \leq m \leq M \quad (24)$$

La ecuación (24), permite realizar la suavización de la potencia nuclear y la reactividad para lo cual se emplea el polinomio,  $f_i^m(n)$ , que es la aproximación de Gram de grado  $i=0,1,\dots,d$ , con un ancho  $2M+1$  puntos, evaluado en el punto  $n$ , y  $c_i$  son los coeficientes de dicho polinomio. Este polinomio se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$f_i^m(n) = \sum_{i=0}^d \left( \frac{(-1)^{i+d} (i+d)^{(2i)} (m+n)^i}{(i!)^2 (2m)^{(i)}} \right) \quad (25)$$

En la fórmula (25), la expresión,  $(2m)^i = (2m)(2m-1)\dots(2m-i+1)$  y  $(2m)^0 = 1$  es la función factorial generalizada.

Adicionalmente existe una expresión para calcular los coeficientes de convolución,  $c_i$ , la cual es:

$$c_i = \sum_{i=0}^d \frac{(2i+1)(2m)^{(i)}}{(2i+i+1)^{(i+1)}} \quad (26)$$

Sustituyendo la ecuación (25) y (26) en la ecuación (24), se obtiene la ecuación que permite reducir las fluctuaciones de la reactividad la cual, es:

$$\hat{\rho}(n) = \sum_{j=-m}^m \sum_{i=0}^d \frac{(2i+1)(2m)^{(i)}}{(2m+i+1)^{(i+1)}} f_i^m(j) f_i^m(n) x_j \quad (27)$$

En la ecuación (27), los polinomios de Gram,  $f_i^m(j)$  se pueden calcular por medio ente fórmula recursiva:

$$f_i^m(j) = \frac{2(2i-1)}{i(2m-i+1)} i g_{i-1}^m(j) - \frac{(i-1)(2m+i)}{i(2m-i+1)} g_{i-2}^m(j) \quad (28)$$

donde,  $g_i^m(j) = 1$  y  $g_{-1}^m(j) = 0$

En síntesis, la ecuación (27), junto con la ecuación (28), permiten la implementación computacional del filtro SG. La ecuación (27) consigue una aproximación adecuada y es un novedoso enfoque para diseñar la implementación computacional del filtro SG, puesto que permite resolver el problema de mal condicionamiento que se presenta en la inversión del sistema lineal, denotado por la ecuación (18).

A continuación se presentan los resultados más relevantes, que se efectuaron en las simulaciones numéricas.

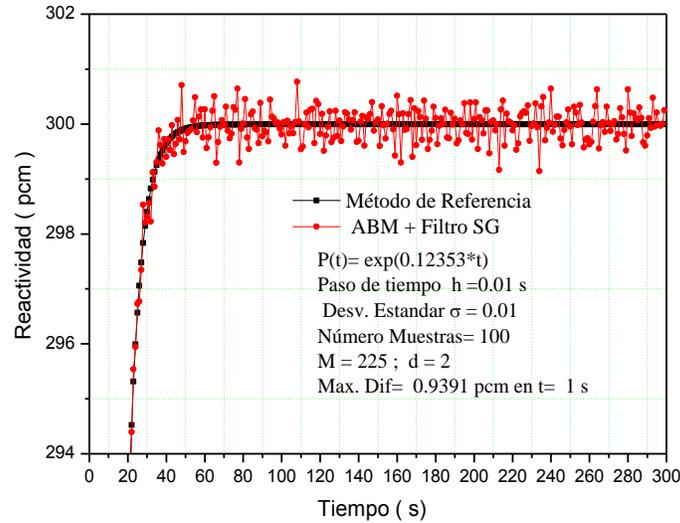
## 5. RESULTADOS COMPUTACIONALES

A continuación se muestran algunos resultados de experimentos numéricos desarrollados para diferentes valores de  $\omega$  calculando la raíz positiva resultante de la ecuación Inhour [15]. Las pruebas de simulación que se llevaron a cabo consideran los parámetros tales como:  $\lambda_i$  es la constante de decaimiento de neutrones retardados,  $\beta_i$  las fracciones de neutrones retardados. Los coeficientes típicos de precursores se ilustran en la Tabla 1. El tiempo de generación  $\Lambda = 2 \times 10^{-5} s$ . Los resultados que se presentan fijan un tiempo real  $t_R = 1 s$ , esto es usando 100 muestras para cada cálculo. Adicionalmente en los experimentos realizados el valor exacto de reactividad puede ser calculado empleando la ecuación (6), la cual se denota como el método de referencia. Cabe resaltar que durante las pruebas de simulación que se llevaron a cabo se empleó un generador de números pseudo-aleatorios con una distribución normal y una semilla que se restablece en el entero  $2^{31} - 1$  para permitir al lector la reproducción de los resultados que se obtienen en este artículo.

**Tabla III. Coeficientes típicos de precursores para U235.**

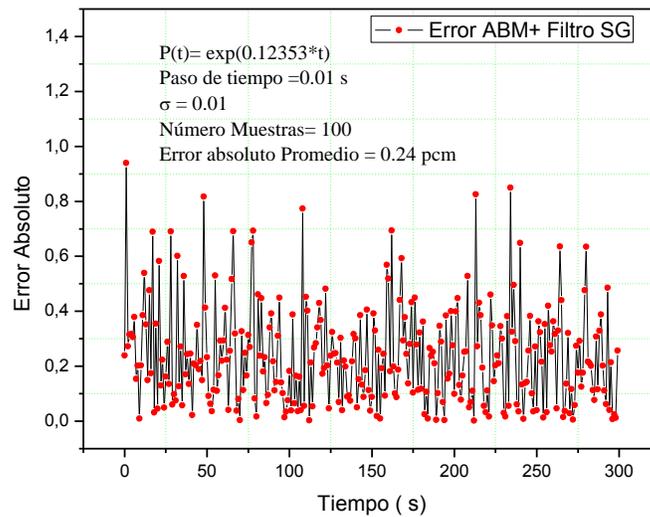
GRUPO	1	2	3	4	5	6
T1/2 (s)	54.5785	21.8658	6.0274	2.2288	0.4951	0.1791
$\lambda_i$	0.0127	0.0317	0.115	0.311	1.4	3.87
$\beta_i/\beta$	0.0380	0.2130	0.1880	0.4070	0.1280	0.0260
$\beta_i$	0.000266	0.001491	0.001316	0.002849	0.000896	0.000182

Por otra parte, en este artículo se establece el caso V con predictor P3 y el corrector C5 definidos en las Tablas I y II, como reportado [13]. En la Figura 1. Se muestra la variación en la reactividad para una forma de potencia,  $P(t) = \exp(\omega t)$  con  $\omega = 0.12353 s^{-1}$  y la desviación estándar relativa de ruido es de  $\sigma = 0.01$  usando el método propuesto para un paso de tiempo de cálculo  $h = 0.01 s$  que se compara con el método de referencia dado por la ecuación (6). Este resultado es mejor que el reportado recientemente en la literatura [9], [14].



**Figura 1: Variación de la reactividad con  $\omega = 0.12353s^{-1}$  ,  $h = 0.01s$  empleando ABM y el filtro SG para disminuir un ruido Gaussiano  $\sigma = 0.01$ .**

En la Figura 2. Se muestra el error cometido en función del tiempo, el error absoluto promedio es muy bajo de 0.24 pcm.



**Figura 2: Error absoluto con  $\omega = 0.12353s^{-1}$  ,  $h = 0.01s$  empleando ABM y el filtro SG con un ruido Gaussiano con  $\sigma = 0.01$ .**

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra por primera vez, el uso del método generalizado tanto del predictor como del corrector de ABM y el filtro SG que permiten reducir las fluctuaciones en el cálculo de la reactividad, diferente a los trabajos presentados en la literatura. Se muestra que el Caso V resulta ser adecuado cuando se combina con el filtro SG tiene menor error que los reportados en la literatura.

Finalmente, este artículo permite establecer que los resultados encontrados serían la base fundamental para la implementación de un medidor de reactividad en tiempo real, con paso de tiempo de cálculo de hasta  $h=0.01$  s, para las diferentes formas de potencia nuclear, cuando ésta contiene una distribución de ruido Gaussiano, alrededor de la potencia media con una desviación estándar relativa de hasta  $\sigma=0.01$ .

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue concluida gracias al apoyo académico, moral y financiero de la Universidad Surcolombiana, el programa de Física, el grupo de investigación en Física Teórica y el semillero de investigación Física Computacional.

## REFERENCIAS

1. Shimazu Y., Nakano and Y., Tahara Y., “Development of a compact digital reactivity meter and reactor physics data processor”, *Nuclear Technology*, **77**, p. 247-254 (1987).
2. Hoogenboom J.E., and Van Der Sluijs, A.R., “Neutron source strength determination for on-line reactivity measurements”, *Annals of Nuclear Energy*, **15**, p. 553-559 (1988).
3. Binney S.E., and Bakir A.I.M., “Design and development of a personal computer based reactivity meter for a nuclear reactor”, *Nuclear Technology*, **85**, p. 12-21 (1989).
4. Ansari S.A., “Development of on-line reactivity meter for nuclear reactors”, *IEEE Trans. Nuclear Science*, **38**, p. 946-958 (1991).
5. Tamura S., “Signal fluctuation and neutron source in inverse kinetics method for reactivity measurement in the sub-critical domain”, *Nuclear Science and Technology*, **40**, p. 153-157 (2003).
6. Suescún D., Senra A., and Da Silva F.C., “Formulation for the calculation of the reactivity without nuclear power history”, *Nuclear Science and Technology*, **44**, p. 1149-1155 (2007).
7. Suescún D., Senra A., and Da Silva F.C., “Calculation of reactivity using a finite impulse response filter”, *Annals of Nuclear Energy*, **35**, p. 472-477 (2008).
8. Suescún D., Senra A., “Reactivity calculation with reduction of the nuclear power fluctuations”, *Annals of Nuclear Energy*, **36**, p. 676-679 (2009).
9. Suescún D., Senra A., “Finite differences with exponential filtering in the calculation of reactivity”, *Kerntechnik*, **75**, p. 210-213 (2010).

10. Suescún D., Flórez J.F., and Rodríguez J.A., "Hamming method for solving the delayed neutron precursor", *Annals of Nuclear Energy*, **42**, p. 47-49 (2012).
11. Suescún D., Figueroa J.H., and Rodríguez J.A., "Reactivity calculation using the Euler-Maclaurin formula", *Annals of Nuclear Energy*, **53**, p. 104-108 (2013).
12. Suescún D., Ibarquen M.C., and Figueroa J.H., "Hamming generalized corrector for reactivity calculation", *Kerntechnik*, **79**, p. 219-225 (2014).
13. Suescún D., Narvaez M., Lozano J.H., "Calculation of nuclear reactivity using the generalised Adams-Bashforth-Moulton predictor corrector method", *Kerntechnik*, **81**, p. 86-93 (2016).
14. Suescún D., Figueroa J.H., Bonilla H. F., "Savitzky Golay filter for reactivity calculation", *Nuclear Science And Technology*, **53**, p. 944-950 (2016).
15. Duderstadt J.J., Hamilton L.J., *Nuclear Reactor Analysis*, New York: John Wiley and Sons, New York, Estados Unidos (1976).
16. Çağatay C., Hakan I., "A unified framework for derivation and implementation of Savitzky-Golay filters", *Signal Processing*, **104**, p. 203-211 (2014)