

ALGORITMO PARA LA DETERMINACION DE LA CARACTERISTICA INTEGRAL DE LA EFECTIVIDAD DE LAS BARRAS ABSORBENTES. APROXIMACION DE UN GRUPO DE NEUTRONES RETARDADOS

Bárbaro Quintero Leyva
Instituto Superior de Ciencias y Tecnología Nucleares
La Habana, Cuba

Resumen

En el presente trabajo se solucionó la ecuación de la cinética inversa con métodos numéricos. Se elaboró un algoritmo, que fue utilizado en la medición de la característica integral de la efectividad de las barras absorbentes en función del tiempo. También fue analizada la aproximación de un grupo de neutrones retardados en el cálculo de reactividades negativas. Como resultado de este análisis se obtuvo una expresión de la constante de desintegración promediada para los seis grupos de neutrones retardados considerados. Los valores obtenidos de esta constante proporcionan resultados más exactos que los comúnmente empleados en la literatura.

ALGORITHM TO MEASURE THE ROD-WORTH CURVE. APPROXIMATION OF ONE GROUP OF DELAYED NEUTRONS

Abstract

In this work the inverse kinetic equation was solved with the aid of numerical methods. An algorithm was elaborated, to be used in the measurement of the time depend rod-worth curve. The one group approximation was analyzed by using negative reactivity calculations. A formule for the averaged decay constant of six groups were obtained. In this way better accuracy than the commonly reported in the literature was achieved.

INTRODUCCION

La determinación de la característica integral de la efectividad de las barras absorbentes es importante para la compensación de la reactividad, control y protección del reactor nuclear durante la explotación.

El presente trabajo tiene como objetivos elaborar un algoritmo sencillo y práctico para obtener la característica integral de la efectividad de las barras absorbentes en función del tiempo, a partir de datos experimentales de la variación del flujo neutrónico y, además, analizar la aproximación de un grupo de neutrones retardados en el cálculo de reactividades negativas.

Se solucionó la ecuación de la cinética inversa con métodos numéricos aplicables en el procesamiento de la información proveniente de detectores de neutrones térmicos en régimen de impulso.

El algoritmo propuesto se validó utilizando los valores del flujo neutrónico obtenidos por el programa CINETICA [1] como datos de entrada al programa elaborado en el presente trabajo.

Los resultados fueron satisfactorios y se mostró gran coincidencia entre los valores de reactividad introducidos al programa CINETICA y los calculados en este trabajo.

El algoritmo también fue validado experimentalmente en el reactor nuclear de la Universidad Técnica de Budapest. Además, se obtuvo una expresión y un conjunto de valores de la constante de desintegración promediada para los seis grupos de neutrones retardados (aproximación de un grupo). Los valores obtenidos de esta constante proporcionan resultados más exactos que los comúnmente empleados en la literatura.

METODO DE CALCULO

Para determinar la característica integral de la efectividad de las barras absorbentes pueden utilizarse diferentes métodos, entre ellos tenemos [2,3]:

- Método de la medición del tiempo de duplicación de la potencia.

- Método de la medición del número de conteos en régimen de amplificación subcrítica.
- Método de la fuente pulsante de neutrones.
- Método de la extracción de la fuente de neutrones (*source-Jerk*).
- Método de la cinética inversa.

En el trabajo se seleccionó el método de la cinética inversa, pues proporciona un considerable ahorro de tiempo en la realización del experimento, y no es necesario suponer la introducción instantánea de reactividad en el reactor.

El método de la cinética inversa se fundamenta en la dependencia de la reactividad de la variación del flujo neutrónico en el tiempo, obtenida a partir de las ecuaciones de la cinética puntual.

Considerando que los grupos de neutrones retardados son seis, que no existe reacción foneutrónica y que, además, no existe fuente externa de neutrones, se puede obtener [4]:

$$\rho(t) = \frac{\left[\Lambda \frac{d\phi}{dt} + \beta\phi(t) - \sum_{k=1}^6 \lambda_k \beta_k \int_{-\infty}^t e^{\lambda_k(t'-t)} \phi(t') dt' \right]}{\phi(t)} \quad (1)$$

donde:

- $\rho(t)$: reactividad del sistema en función del tiempo.
- Λ : tiempo de vida media de una generación de neutrones.
- $\phi(t)$: flujo de neutrones térmicos en función del tiempo.
- β : fracción total efectiva de neutrones retardados.
- β_k : fracción efectiva de neutrones retardados del grupo k.
- λ_k : constante de desintegración del grupo k.

Solución de la ecuación de la cinética inversa para el cálculo de la reactividad

Considerando en la ecuación (1) que el reactor estuvo crítico durante un prolongado período de tiempo, o sea, que para $-\infty < t \leq 0$ el $\phi(t) = \phi_0$ obtenemos:

$$\frac{\rho(t)}{\beta} = \frac{\Lambda}{\beta} \frac{d\phi(t)}{dt} + \phi(t) - \sum_{k=1}^6 \frac{\lambda_k \beta_k}{\beta e^{\lambda_k t}} \left[\frac{\phi_0}{\lambda_k} + \int_0^t e^{\lambda_k t'} \phi(t') dt' \right] \quad (2)$$

Para la solución de la ecuación (2) es necesario determinar el flujo de neutrones térmicos, el cual lo obtendremos a partir de la información recibida de

detectores de impulso que proporcionan un número determinado de conteos (impulsos) en un intervalo de tiempo prefijado (Δt), a través del tiempo total de medición (T_m).

Para el número de conteo recibido durante el intervalo se cumple:

$$B_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \frac{1}{k} \phi(t) dt \quad \Delta t = t_{i+1} - t_i$$

donde:

B_i : número de conteos en el intervalo.

K : factor de proporcionalidad, el cual tiene en cuenta la eficiencia del detector.

En caso estacionario se obtiene: $\phi_0 = K \frac{B_0}{\Delta t}$

Para el caso transitorio se considera que:

$$B_i = \frac{1}{k} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \phi(t) dt = \frac{1}{k} \Delta t \phi(t_{i\xi}) \quad \text{para } t_{i\xi} \in (t_i, t_{i+1})$$

Considerando un Δt pequeño podemos suponer que:

$$t_{i\xi} \approx \frac{t_i + t_{i+1}}{2}$$

obteniéndose:

$$\phi(t_{i\xi}) \approx \frac{B_i}{\Delta t} \cdot k$$

La consideración anterior resulta más exacta en la medida en que la variación del flujo neutrónico en dicho intervalo sea lineal, condición esta que no siempre se cumple. Por ello es necesario utilizar valores pequeños de Δt .

La ecuación (2) se soluciona con la ayuda de métodos numéricos. La utilización de estos métodos hace más sencillo el trabajo y en caso de poca fluctuación estadística, la solución numérica se obtiene con suficiente rapidez, brindando de esta forma la posibilidad de diseñar un medidor de la reactividad con microprocesador en tiempo real (*on line*).

Para calcular el término diferencial de la ecuación (2) aplicamos el teorema de Lagrange [8], el cual se cumple en el intervalo de tiempo a analizar, o sea:

$$\frac{d\phi}{dt} \approx \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{\hat{t}_{i+1} - \hat{t}_{i-1}} \quad \text{donde } \hat{t}_i = \hat{t}_{i\xi}$$

Para un Δt pequeño planteamos que:

$$c \approx \frac{\hat{t}_{i+1} + \hat{t}_i}{2}$$

entonces :

$$\frac{d\phi_i}{dt} \approx \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2 \cdot \Delta t}$$

Para calcular el término integral de la ecuación (2), aplicamos el método de los trapecios [8], por tanto:

$$\int_0^{t_m} e^{\lambda_k t'} \phi(t') dt' = \Delta t \left[\frac{\phi_0}{2} + \sum_{i=1}^{m-1} e^{\lambda_k \hat{t}_i} \phi_i + \frac{e^{\lambda_k \hat{t}_m} \phi_m}{2} \right]$$

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, la ecuación (2) se transforma en:

$$\rho(t_i) = \left[\frac{\Lambda}{\beta} \frac{(B_{i+1} - B_i)}{2 \cdot \Delta t} + B_i - \sum_{k=1}^6 \frac{\lambda_k \beta_k}{\beta} T_{i,k} \right] B_i^{-1} \quad (3)$$

$$T_{i,k} = \left[\frac{B_0}{\lambda_k} + \Delta t \left(\frac{B_0}{2} + \sum_{p=1}^{i-1} e^{\lambda_k \hat{t}_p} B_p + \frac{e^{\lambda_k \hat{t}_i} B_i}{2} \right) \right] e^{-\lambda_k \hat{t}_i} \quad (3.1)$$

donde:

$\rho(t_i)$: valor de la reactividad expresada en dólares.

$$t_i = \Delta t(i-0,5), \quad i \geq 2; \quad \hat{t}_p = \Delta t(p - 0,5), \quad p \geq 1$$

Para el cálculo de la reactividad con la ecuación (3), se plantea el siguiente algoritmo:

$$\rho(\hat{t}_i) = (D_i + B_i - I_i) / B_i \quad (4)$$

$$D_i = \frac{B_{i+1} - B_{i-1}}{2 \Delta t} \cdot \frac{\Lambda}{\beta} \quad (4.1)$$

$$I_i = \begin{cases} B_0 & \text{para } i = 0 \\ \sum_{k=1}^6 a_k \left[\frac{B_0}{\lambda_k} + \frac{\Delta t}{4} (B_0 + B_1 e^{\lambda_k \hat{t}_1}) \right] e^{-\lambda_k \hat{t}_i} & \text{para } i = 1 \\ \sum_{k=1}^6 a_k T_{i,k} & \text{para } i \geq 2 \end{cases} \quad (4.2)$$

donde:

$$a_k = \lambda_k \beta_k / \beta$$

Con el algoritmo anterior para tiempo de cálculo grande, el argumento de las exponenciales positivas puede superar el valor máximo permitido (*overflow*).

Para aliviar esta dificultad se hace:

$$S_{i-1,k} = \sum_{p=1}^{i-1} e^{\lambda_k (\hat{t}_p - \hat{t}_i)} \cdot B_p$$

desarrollando se obtiene:

$$S_{i-1,k} = \sum_{p=1}^{i-1} B_p e^{\lambda_k \Delta t (p-i)}$$

obteniéndose:

$$S_{i,k} = \left[S_{i-1,k} + B_i \right] e^{-\lambda_k \Delta t}$$

Con estas transformaciones la ecuación 4.2 se convierte en:

$$I_i = \begin{cases} B_0 & \text{para } i = 0 \\ \sum_{k=1}^6 a_k \frac{\Delta t}{4} \left[B_0 \left(1 + \frac{4}{\lambda_k \Delta t} \right) e^{-\lambda_k \hat{t}_i} + B_1 \right] & \text{para } i = 1 \\ \sum_{k=1}^6 a_k \Delta t \left[B_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\lambda_k \Delta t} \right) e^{-\lambda_k \hat{t}_i} + S_{i-1,k} + \frac{B_i}{2} \right] & \text{para } i \geq 2 \end{cases}$$

Para:

$$i = 2, \quad S_{i-1,k} = S_{1,k} = B_1 e^{-\lambda_k \Delta t}$$

Para:

$$i > 2, \quad S_{i-1,k} = \left[S_{i-2,k} + B_{i-1} \right] e^{-\lambda_k \Delta t}$$

Cuando las fluctuaciones estadísticas del flujo de neutrones son apreciables, es necesario realizar un

suavizamiento del número de conteos, para ello empleamos la siguiente fórmula [9]:

$$B_{i1} = \left[S_1 B_{i-1} + S_2 B_i + S_3 B_{i+1} \right] / \left[S_1 + S_2 + S_3 \right]$$

donde B_{si} es el valor del número de conteos suavizado en el instante t_i , $S_1 = S_3 = 1$, $S_2 = 2$.

El punto correspondiente al estado estacionario lo obtenemos con el promedio de algunos puntos y por tanto este valor no será suavizado. Para el último punto hacemos $S_3 = 0$.

Las perturbaciones a introducir en el sistema serán negativas, lo cual implica que partiendo del reactor crítico esto pasaría a estado subcrítico y el flujo tendría siempre carácter decreciente, condición esta que utilizaremos para dar fin al proceso de suavizamiento múltiple, o sea, este proceso terminaría cuando:

$$\frac{d\phi_i}{dt} < 0 \quad i = 1, 2, \dots, N-1$$

Análisis de la aproximación de un grupo de neutrones retardados

En la literatura [5,6] podemos encontrar diferentes expresiones para los parámetros promediados (λ , β) de los núcleos precursores de neutrones retardados en la aproximación de un grupo, entre ellas tenemos:

$$\bar{\lambda}_A = \sum_1^6 \beta_k \lambda_k / \beta \quad \beta_A = \beta$$

Estas fórmulas son apropiadas para valores de reactividad cercanos o superiores a la criticidad por neutrones instantáneos y para variaciones rápidas de la reactividad [5,6] y:

$$\bar{\lambda}_B = \beta / \sum_1^6 \beta_k / \lambda_k \quad \beta_B = \beta$$

que son válidas para pequeños valores de la reactividad [5].

Utilizando las expresiones anteriores, se realizaron cálculos de la reactividad apropiados para cada expresión de reactividades negativas y se obtuvieron resultados de poca exactitud.

Para determinar correctamente los parámetros promediados de los 6 grupos de precursores, es necesario tener en cuenta la influencia de estos en los cálculos en el transcurso del tiempo.

Por ejemplo, si introducimos en el reactor en estado crítico un valor de reactividad muy grande en un tiem-

po relativamente pequeño, la variación del flujo neutrónico sería:

$$\phi(t) \approx A_0 e^{-t/\lambda} + \sum_1^6 A_k e^{-\lambda_k t}$$

De la ecuación anterior se observa la dependencia de la variación del flujo neutrónico con la constante de desintegración de los diferentes grupos. La contribución de los grupos de mayor constante de desintegración disminuye rápidamente, predominando de esta forma los grupos de menor λ .

De acuerdo con esto la constante de desintegración promedio varía en función del tiempo y para valores de reactividad no muy grandes también depende de esta, por tanto, encontrar una constante de desintegración promedio que describa exactamente el proceso de todo el rango de reactividad y tiempo es en principio imposible.

Fenómeno similar al analizado anteriormente ocurre en el cálculo de la reactividad. De la ecuación de la cinética inversa se puede apreciar la dependencia de la reactividad de las constantes de desintegración de cada grupo.

Para tener en cuenta la dependencia de la constante de desintegración promedio con el tiempo, hacemos lo siguiente: considerando un solo grupo de neutrones retardados y partiendo de un estado crítico, la ecuación (1) se convierte en:

$$\rho(t) = \left[\frac{\lambda}{\beta} \frac{d\phi(t)}{dt} + \phi(t) - e^{-\bar{\lambda}(t)t} \left\{ \phi_0 + \lambda(t) \int_0^t e^{\bar{\lambda}(t')t'} \phi(t') dt' \right\} \right] \phi(t)^{-1} \quad (5)$$

Igualando (5) con la ecuación correspondiente a 6 grupos de neutrones retardados -ecuación (2)- obtenemos:

$$\frac{\phi_0}{\beta} \sum_1^6 \frac{\beta_k}{e^{\lambda_k t}} + \sum_1^6 \frac{\lambda_k \beta_k}{\beta} \int_0^t e^{\lambda_k(t'-t)} \phi(t') dt' = \frac{\phi_0}{e^{\bar{\lambda}(t)t}} + \frac{\lambda(t)}{e^{\lambda(t)t}} \int_0^t e^{\bar{\lambda}(t')t'} \phi(t') dt'$$

Considerando que en la igualdad anterior el intervalo de tiempo a analizar es pequeño y que la reactividad a introducir es relativamente grande, los miembros que contienen las integrales pueden ser despreciados y se obtiene que:

$$\bar{\lambda}(t) \approx - \frac{\ln \left[\sum_1^6 \frac{\beta_k}{\beta} e^{-\lambda_k t} \right]}{t} \quad (6)$$

Para $t = 0$ obtenemos:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \bar{\lambda}(t) = \sum_{k=1}^6 \frac{\lambda_k \beta_k}{\beta} = \bar{\lambda}_A$$

La expresión (6) no nos brinda gran sencillez de trabajo, por ello le hallamos su media temporal del modo siguiente:

$$\bar{\lambda} = \frac{\int_0^t \bar{\lambda}(t) dt}{\int_0^t dt} \quad (7)$$

Para valores grandes del tiempo se realizará el cálculo en tres casos diferentes:

1. Cálculo de la reactividad durante la caída de las barras absorbentes ($0 \leq t \leq t_p$).
2. Cálculo después de la caída de las barras absorbentes ($t_p \leq t \leq 2t_p$).
3. Cálculo en todo el intervalo analizado por (1) y (2) ($0 \leq t \leq 2t_p$).

Donde t_p es el momento en que la barra alcanza su posición final.

La constante de desintegración promedio la buscaremos de forma tal que, en cada uno de los 3 casos, de forma independiente, la máxima desviación en el valor de la reactividad calculada por 6 grupos y por un grupo, sea mínima en el intervalo de tiempo-reactividad a analizar, o sea, que buscaremos aquellas constantes de desintegración que satisfagan:

$$\text{MAX } | \rho_6(t) - \rho_1(t) | = \text{mínimo}$$

donde:

$\rho_6(t)$: cálculo de la reactividad por 6 grupos.

$\rho_1(t)$: cálculo de la reactividad por 1 grupo.

El algoritmo para el cálculo con 1 grupo de neutrones retardados es el mismo que para 6 grupos, solo que en

el lugar de $\sum_{k=1}^6 a_k$ y de λ_k escribiremos $\bar{\lambda}$.

Validación de los modelos propuestos

En primer lugar se trabajó en la comprobación de la validez del algoritmo para 6 grupos de neutrones retardados. Para ello con ayuda de un programa que resuelve las ecuaciones de la cinética [1], se obtuvieron los valores de los flujos neutrónicos correspondientes a variaciones de la reactividad en forma de escalón, lineal y en forma de característica integral de la efectividad de la barra absorbente. Estos valores de flujos neutrónicos se lo introducimos al programa de cálculo elaborado sobre la base del algoritmo planteado en el trabajo.

Los resultados del cálculo obtenidos fueron satisfactorios en todos los casos.

En la figura 1 se muestra el resultado del cálculo para el caso en que la reactividad introducida varía en forma de característica integral de la efectividad de la barra absorbente, o sea, que:

$$\rho(t) = \rho_0 \left[\frac{t}{t_p} - \frac{\text{Sen} \left(\frac{2\pi}{t_p} t \right)}{2\pi} \right]$$

donde:

ρ_0 : efectividad total de la barra.

La desviación máxima relativa entre los valores de reactividad introducidos al programa CINETICA y los obtenidos por el programa elaborado es de 1,7%, lo que demuestra la validez del algoritmo propuesto.

Para comprobar el algoritmo también se hicieron experimentos en el reactor nuclear de la Universidad Técnica de Budapest y se obtuvieron resultados acordes con los valores de efectividad total de las barras absorbentes determinados en [7].

En la realización de los experimentos se utilizó un detector de neutrones térmicos tipo SZNM-17 con cubierta de plomo para disminuir el fondo gamma. Este detector fue ubicado aproximadamente a 3 m del extremo superior de la zona activa.

Para el registro del número de conteos recibidos en el intervalo de tiempo prefijado ($\Delta t = 0,01s$), durante el tiempo de medición, se utilizó un analizador tipo ICA-70 de 4 K de memoria.

Partiendo de un estado crítico a una potencia de 2 W, se lanzó la barra de protección (BV1) y se registró la variación del número de conteos en cada intervalo Δt . En la figura 2 se muestran los resultados de la aplicación del algoritmo en la determinación de la característica integral de la efectividad de esta barra.

En dicha figura se observa una pequeña oscilación de la reactividad después de la caída de la barra. Para investigar las causas de esa oscilación se tendrían que planear experimentos en función de ese objetivo. Como posibles causas de este fenómeno pudieran plantearse:

- La fluctuación estadística del flujo es muy grande.
- La barra de protección al llegar a su posición final realiza una oscilación mecánica.

El valor reportado por la literatura [8] en la medición del peso de la barra es de $2,15\% \pm 3\%$ dólares.

En la propia figura 2 se muestran los resultados empleando la aproximación propuesta para un grupo de neutrones retardados -ecuación (7)-, los que se compararon con los obtenidos utilizando las constantes de desintegración reportadas en la literatura ($\bar{\lambda}_A, \bar{\lambda}_B$)

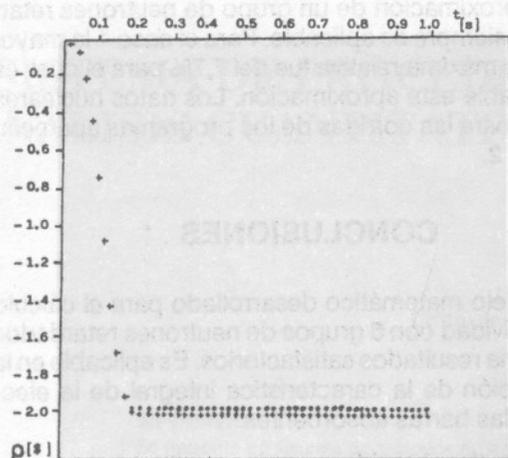


Figura 1. Cálculo de la reactividad con 6 grupos de neutrones retardados.
 + : reactividad introducida al programa CINETICA
 ● : reactividad calculada con el flujo de neutrones calculados por CINETICA
 $\rho_0 = 2\%$
 $t_p = 0,23 \text{ s}$
 $\Delta t = 0,01 \text{ s}$

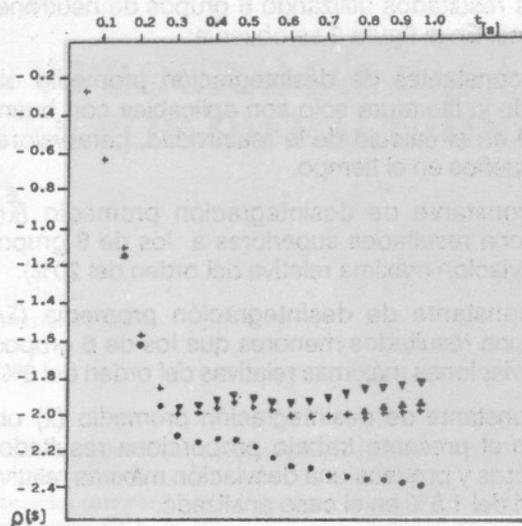


Figura 2. Característica integral de la efectividad de la barra de protección BV1.
 + : 6 grupos de neutrones retardados
 ▲ : un grupo de neutrones retardados, $\lambda = \bar{\lambda}$
 ▼ : un grupo de neutrones retardados, $\lambda = \lambda_A$
 ● : un grupo de neutrones retardados, $\lambda = \lambda_B$

Tabla 1
 Resultados del cálculo de la constante de desintegración promedio [S^{-1}].
 Caso I: $0 \leq t \leq t_p$, E_M : desviación máxima relativa.

t_p [s]	ρ_0 [%]					EM %
		0,5	1	2	3	
1	0,327	0,325	0,32	0,32	0,51	
3	0,26	0,26	0,25	0,25	2,8	
5	0,23	0,22	0,22	0,22	4,25	
10	0,19	0,18	0,17	0,17	7,7	

Tabla 2
 Datos nucleares para el combustible U-235 en reactores térmicos [3].

K	λ_k [s^{-1}]	β_k [%]
1	0,0124	0,02145
2	0,0305	0,14235
3	0,111	0,1274
4	0,301	0,25675
5	1,14	0,07475
6	3,01	0,0273

$\beta = 0,65\%$

$\beta = 0,75\%$

$\frac{\beta}{\Delta} = 180 \text{ s}^{-1}$

y con los resultados utilizando 6 grupos de neutrones retardados. En la figura 2 se observa:

1. Las constantes de desintegración promedio obtenidas de la literatura solo son aplicables con buena exactitud en el cálculo de la reactividad, para valores muy pequeños en el tiempo.

2. La constante de desintegración promedio ($\bar{\lambda}_B$) proporciona resultados superiores a los de 6 grupos (con desviación máxima relativa del orden del 20%).

3. La constante de desintegración promedio ($\bar{\lambda}_A$) proporciona resultados menores que los de 6 grupos (con desviaciones máximas relativas del orden del 8%).

4. La constante de desintegración promedio ($\bar{\lambda}$) obtenida en el presente trabajo proporciona resultados más exactos y provoca una desviación máxima relativa del orden del 1,5% en el caso analizado.

En la literatura es posible encontrar otras formas de promediar a un grupo de neutrones retardados, en el cálculo de la reactividad, estas originaron errores aún mayores que $\bar{\lambda}_A$ y $\bar{\lambda}_B$.

Para intervalos de tiempo relativamente grandes se determinó el valor de $\bar{\lambda}$ que cumpla la condición:

$$\text{MAX } | \rho_6(t) - \rho_1(t) | = \text{mínimo}$$

Los valores de $\bar{\lambda}$ se calcularon para los 3 casos mencionados anteriormente con las siguientes 16 variantes:

Tiempo de caída de las barras [s]	Reactividad total [β]
1	-0,5, -1,0, -2,0, -3,0
3	-0,5, -1,0, -2,0, -3,0
5	-0,5, -1,0, -2,0, -3,0
10	-0,5, -1,0, -2,0, -3,0

Los resultados del cálculo de la constante de desintegración promedio para el caso ($0 \leq t \leq t_p$) se muestran en la tabla 1.

Los resultados del cálculo para los casos 2 y 3 son similares entre sí y para tiempos superiores a 6 segundos, la desviación máxima relativa es superior al 8% llegando hasta el 26% para $t = 20$ segundos.

De los resultados del cálculo se observa que en el transcurso la desviación máxima relativa aumenta y por

tanto la aproximación de un grupo de neutrones retardados, no siempre es aplicable. Para el caso 1 la mayor desviación máxima relativa fue del 7,7% para el cual es aún aceptable esta aproximación. Los datos nucleares utilizados para las corridas de los programas aparecen en la tabla 2.

CONCLUSIONES

1. El modelo matemático desarrollado para el cálculo de la reactividad con 6 grupos de neutrones retardados proporciona resultados satisfactorios. Es aplicable en la determinación de la característica integral de la efectividad de las barras absorbentes.

2. La fórmula obtenida para la constante de desintegración promedio de los 6 grupos proporciona en el cálculo de las reactividades negativas resultados más exactos que las constantes reportadas en la literatura.

3. Para valores del tiempo entre 1 y 10 segundos es posible utilizar los resultados del cálculo de las constantes de desintegración promedio obtenidas en el presente trabajo, que se muestran en la tabla 1.

4. Si el intervalo de tiempo a analizar es superior aproximadamente a 10 segundos, entonces la aproximación de un grupo de neutrones retardados aquí tratada no es aplicable.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Programa CINETICA (Documento interno de la cátedra de reactores), Budapest (1985).
- [2] CSOM, G., Mediciones en la técnica atómica. Editorial Libros de Enseñanza, Budapest (1973) 193.
- [3] KEEPIN, R. G., Physics of Nuclear Kinetics, Addison-Wesley Pub. Co. (1965).
- [4] SZATMARY, Z., Conferencia impartida sobre física de los reactores nucleares, Budapest (1985).
- [5] SOODAK, H., Reactor Handbook, vol 3, Interscience Publishers, Second Edition, New York (1962) 248-258.
- [6] ZIYA, A. y otros, Mathematical Methods in Nuclear Reactor Dynamics, Academic Press, New York and London (1971) 96-113.
- [7] ZSOLNAY, E., CSOM, G. y otros, Mediciones de la zona activa reconstruida del reactor nuclear de la Universidad Técnica de Budapest, Budapest, BME-TR-105/1980 (1980) 4.
- [8] BRENSHTEIN, I. y SEMENDIAEV, K., Manual de matemática para ingenieros y estudiantes, 2a. edición, Moscú. Editorial MIR (1973) 371-447.
- [9] AMBROZY, A. y JAVOR, A., Evaluación de datos experimentales, Electrónica y Programación, Budapest (1976) 76-79.

El autor desea expresar su agradecimiento al doctor Csom Gyulá, director de la sección de energía atómica cátedra de reactores de la Universidad Técnica de Budapest, por el constante apoyo brindado; al doctor Szatmary Zoltán, director del Instituto Central de Investigaciones Físicas de Budapest y al doctor Elő Sandor, jefe del Grupo de Electrónica de la cátedra de reactores de la Universidad Técnica de Budapest por sus valiosos consejos; asimismo a Lévai Ferenc, Gyurkocza Chaba y Gyuris János por la ayuda brindada durante la ejecución de los experimentos.