

## MEDICION DE PARAMETROS CINETICOS EN UN REACTOR NUCLEAR MEDIANTE RUIDO NEUTRONICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

Juan Avila y Arturo Ramón

*Instituto Peruano de Energía Nuclear, Apt. 1687, Perú*

Recibido el 20 de Agosto de 1985

### RESUMEN

*En el presente trabajo se describen las ecuaciones de la cinética puntual y los modelos de ruido neutrónico en el dominio del tiempo de Alfa-Rossi, Alfa-Feynman y distribución de intervalos de tiempo, pulso a pulso de Babala. Se discute el alcance de los modelos arriba mencionados, en la medición experimental de los parámetros cinéticos del reactor: constante de decaimiento de los neutrones pronto para los estados subcríticos y críticos del reactor, constante asintótica de la varianza relativa correlacionada, reactividad del reactor para los estados en los cuales la constante de decaimiento de los neutrones pronto es medida, y la eficiencia del detector de neutrones. Se describe también las mediciones que se pueden realizarse mediante el analizador profesional NSA-1000 en línea con un reactor y una computadora Digital: Modelo PC-350-D2.*

### ABSTRACT

*Noise techniques in the domain of time of Alfa-Rossi, Alfa Feynman y Babala models, respectively, are applied to solve local kinematics equations for neutrons in the reactor RP-0, Lima. The prompt neutron decay constant at the critical and sub-critical states, the asymptotical value of the correlated relative variance and the reactivity corresponding to the reactor are measured. The available uses of the stocastical analyser NSA-1000 on line with the reactor and a Digital computer, PC-350-D2, are discussed.*

# 1. INTRODUCCION

Los problemas cinéticos en el cálculo y diseño de reactor nuclear adquieren suma importancia, por cuanto estan relacionados con el control, seguridad y explotación eficiente del mismo. Los cálculos del comportamiento temporal del reactor, durante el diseño, dependen de los valores adoptados de los parámetros cinéticos, los que requieren una comprobación posterior.

Desde 1947, cinco años después que E. Fermi puso en marcha el primer reactor nuclear, Feynman realizó los primeros estudios de ruido neutrónico mediante métodos estadísticos, intensificándose el estudio y aplicación de estas técnicas en los últimos años para la determinación de los parámetros cinéticos. El análisis de las fluctuaciones estadísticas de los procesos de la reacción en cadena (análisis de ruido neutrónico) mediante la correlación de los impulsos, que proporcionan los detectores ubicados en el reactor, dan información sobre los parámetros arriba mencionados.

En el presente trabajo se analizan dichas fluctuaciones en el dominio temporal. Se miden los parámetros cinéticos siguientes: constante de decaimiento de los neutrones prontos para estados subcríticos ( $\alpha_c$ ) y el estado crítico del reactor RP-0 ( $\alpha_c$ ), constante asintótica de la varianza relativa correlacionada ( $Y_0$ ), la reactividad ( $\rho$  del reactor para los estados en los cuales fue medido  $\alpha$  y la eficiencia del detector de neutrones ( $\epsilon$ ).

## 2. CONSIDERACIONES TEORICAS

### 2.1. PARAMETROS DE LA CINETICA PUNTUAL

El balance neutrónico en un reactor se expresa mediante la siguiente relación [1],

$$\frac{\delta N}{\delta t} = LN + Q, \quad (1)$$

donde Q es la producción neutrónica de fuentes externas por segundo y por cm<sup>3</sup> y L = P - D, siendo P la probabilidad de producción neutrónica por segundo y D la probabilidad de destrucción neutrónica por segundo. En estado subcrítico asintótico, sin considerar los neutrones retardados ni

fuentes externas, la evolución temporal del balance neutrónico se expresa mediante la relación,

$$\frac{\delta N(t)}{\delta t} = -\alpha N(t) . \quad (2)$$

Considerando las ecuaciones cinéticas de la teoría puntual del reactor [1] se obtiene la ecuación siguiente:

$$\frac{\delta N(t)}{\delta t} = \frac{\rho_p - \beta_{eff}}{\Lambda} N(t) + \sum_{i=1}^z \lambda_j(t) + Q(t) , \quad (3)$$

donde  $\rho_p$  es la reactividad pronta,  $\beta_{eff}$  la fracción efectiva de neutrones retardados,  $\lambda_j$  la constante de decaimiento del grupo de núcleos precursores que originan neutrones retardados del grupo  $j$  (1/s),  $\Lambda$  el tiempo entre generaciones;

$$\frac{\delta C_j(t)}{\delta t} = \frac{\beta_j}{\Lambda} N(t) - \lambda_j C_j(t) , \quad (4)$$

donde  $\beta_j$  es la fracción de neutrones retardados del grupo  $j$ .

La constante de decaimiento está dada por la fórmula,

$$\alpha = \frac{\beta_{eff} - \rho_p}{\Lambda} = \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} (1 - \rho_p / \beta_{eff}) . \quad (5)$$

En estado crítico, esta relación se transforma en,

$$\alpha_c = \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} .$$

La reactividad del reactor estará dada por la expresión

$$r = \frac{\rho_p}{\beta_{eff}} = \frac{\alpha_c - \alpha}{\alpha_c} . \quad (7)$$

Aplicando las ecuaciones (3) y (4), en condiciones estacionarias se obtiene [2],

$$\alpha = \alpha_c + \kappa/R, \quad (8)$$

donde,  $\kappa$ , el factor de multiplicación esta dada por la relación,

$$\kappa = Q_0 (\varepsilon/\nu\Lambda).$$

donde  $\nu$  es el número promedio de neutrones producidos.

## 2.2 EL MODELO DE ALFA-ROSSI

El Modelo de Alfa-Rossi se basa en la probabilidad de detectar un neutrón en el intervalo de tiempo  $\delta t_2$ , alrededor del tiempo  $t_2$ , después de haber detectado otro en el intervalo  $\delta t_1$ , alrededor del tiempo  $t_1$ .

Debido a la naturaleza del medio multiplicador, existe correlación entre neutrones detectados de un tiempo a otro, que pueden ser provenientes de un sólo antecesor o diferentes antecesores, denominados detecciones acopladas o accidentales, como se muestra en la Fig. 1 [3].

La probabilidad de detectar un par acoplado de neutrones está expresado en la siguiente fórmula [4],

$$P_C(t_1, t_2) \delta t_1 \delta t_2 = \frac{F_0 \varepsilon^2 \kappa_p^2}{2\alpha l^2} \frac{\sqrt{\nu^2 - \bar{\nu}^2}}{\bar{\nu}^2} e^{-\alpha(t_2 - t_1)} \delta t_1 \delta t_2, \quad (9)$$

donde  $F_0$  es la razón de fisión en el sistema (fis./s); y la probabilidad de detectar pares accidentales es expresado por la fórmula siguiente:

$$P_C(t_1, t_2) \delta t_1 \delta t_2 = F_0^2 \varepsilon^2 \delta t_1 \delta t_2. \quad (10)$$

De las fórmulas anteriores se deduce que la probabilidad de detectar pares acoplados y accidentales es,

$$P_C(t_1, t_2) \delta t_1 \delta t_2 = F_0 \varepsilon \delta t_1 \left\{ F_0 \varepsilon \delta t_2 + \frac{\varepsilon D_\nu (1 - \beta_{eff})^2}{2\alpha l^2 \Lambda^2} e^{-\alpha(t_2 - t_1)} \delta t_2 \right\}; \quad (11)$$

donde:

$$\rho_p = (\kappa_p - 1)/\kappa_p,$$

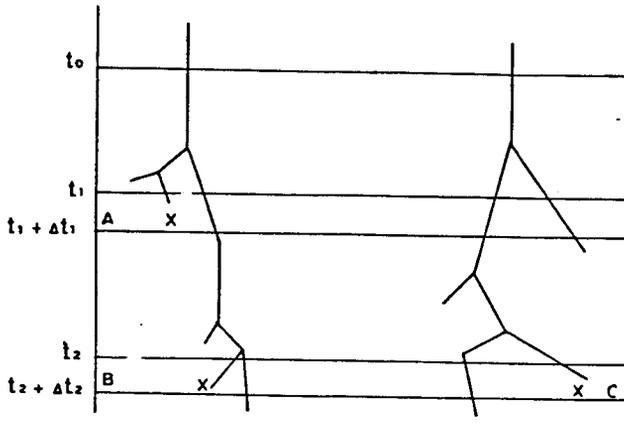


Fig. 1. Descripción esquemática de dos eventos correlacionados, A y B, y dos eventos accidentales, B y C, respectivamente.

siendo  $\kappa_p$  el factor de multiplicación pronta, y  $D_v$ , el parámetro de Diven, es definido por la expresión,

$$D_v = (\bar{v}^2 - \bar{v}^2) / \bar{v}^2,$$

Si se pone  $F_0 \varepsilon \delta t_1$  igual a 1, se está exigiendo que una cuenta sea detectada en  $t_1$ , y  $F_0 \varepsilon \delta t_2$  es la probabilidad de tener una cuenta aleatoria en el intervalo de tiempo  $\delta t_2$ , y el segundo término del corchete de la función (11) es la probabilidad de tenerse una cuenta correlacionada en  $t_2$ . La probabilidad de tener una cuenta en  $t$ , seguida de otra en  $t=0$ , está expresada mediante la fórmula siguiente:

$$p(t) \delta t = A \delta t + B e^{-\alpha t} \delta t \quad (12)$$

donde:

$$A = F_0 \varepsilon$$

$$B = \{ \varepsilon D_v (1 - \beta_{\text{eff}})^2 \} / 2\alpha^2 \Lambda^2$$

### 2.3. MODELO DE ALFA-FEYNMAN

Si los impulsos, originados por los neutrones que llegan al detector, obedecieran a la distribución de Poisson, la razón varianza a media sería 1, sin embargo como algunos de los neutrones pertenecen a la misma cadena de fisión( ver. Fig. 1) esa razón se aparta más de la unidad cuando mayor sea el número de neutrones correlacionados.

Sea  $c$  el número de cuentas, entonces la varianza relativa correlacionada,  $Y$ , definida por la la expresión,

$$Y = (\bar{c}^2 - \bar{c}^2) / \bar{c}^2,$$

será dada por la función,

$$Y = 1 + Y_0 [1 + (1 - e^{-\alpha t}) / \alpha t] . \quad (13)$$

donde  $Y_0$  es el valor asintótico de  $Y$ , dada por la fórmula,

$$Y_0 = \varepsilon D_v (1 - \beta_{\text{eff}})^2 / 2\alpha^2 \Lambda^2 . \quad (14)$$

### 2.4. DISTRIBUCION DE INTERVALOS DE TIEMPO PULSO A PULSO

Babala ha mostrado [5] que la distribución de intervalos de tiempo pulso a pulso,  $P_{cc}$ , puede estar dado por la expresión,

$$P_{cc}(t) \delta t = c_1(t) \delta t + c_2(t) e^{-\alpha \gamma t} \delta t , \quad (15)$$

donde:

$$c_1(t) = 4F_0 \varepsilon P_0(t) \left[ \frac{(\gamma+1) + (\gamma-1)e^{-\alpha \gamma t}}{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha \gamma t}} \right]^2 , \quad (16)$$

$$c_2(t) = \frac{8F_0 \varepsilon P_0(t) \gamma^2}{\sigma [(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha \gamma t}]^2} , \quad (17)$$

$$\gamma = (1 + 2Y_0)^{\frac{1}{2}}$$

$$P_0(t) = \exp \frac{2F_0 \varepsilon t}{\gamma + 1} \left[ 1 + \frac{2}{\gamma - 1} \alpha t \ln \frac{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha \gamma t}}{4\gamma} \right] , \quad (18)$$

donde  $\sigma = SA/D_v$ , para el estado subcrítico y  $\sigma = vF_0\rho_p/\alpha D_v$ , para estado crítico del reactor.

La ecuación (18) es la distribución de probabilidad cero de Mogilver derivado por Pál [5].

La probabilidad  $P_{cc}(t)$ , es dependiente de el nivel de la potencia o de la fuente de neutrones, y la eficiencia del detector. A niveles de potencia elevado, donde el modelo de Alfa-Rossi no es aplicable,  $c_2(t) = 0$ , y la función (15) queda,

$$P_{cc}(t) = 4F_0\varepsilon P_0(t) \left[ \frac{(\gamma+1) - (\gamma+1)e^{-\alpha\lambda t}}{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha\lambda t}} \right]^2 \quad (19)$$

La cual puede ser usada para la medición experimental.

### 3. ANALISIS EXPERIMENTAL

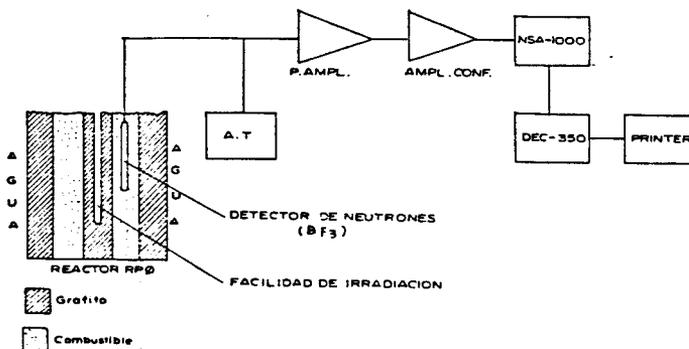


Fig. 2. Esquema de la instrumentación de medición. El reactor RP-0 consta de un reflector externo e interno de grafito, elemento combustible tipo varilla con U-235, enriquecido al 20%, moderado con agua liviana. Se usa un detector de neutrones de BF<sub>3</sub> tipo 31E40; una fuente de alta tensión es del modelo CNEA 0 81; un preamplificador CNEA 0 11, un amplificador conformador CNEA 0 31; un analizador estocástico NSA-1000, un computador DEC-350 y una impresora LA50.

En el presente trabajo se ha encontrado que solamente con detectores de neutrones de modo pulso o cámaras de ionización, ubicados dentro del núcleo del reactor, se pueden observar las fluctuaciones de la reacción mediante el analizador estocástico NSA-1000.

El método de Alfa-Rossi permite una buena determinación del parámetro  $\alpha$ , para estados supercríticos del reactor con reactividad absoluta menor que dos dólares.

Para mejorar la medición, se debe alejar la fuente de neutrones lo necesario para reducir el término de fondo (A) de la función (12), que es debido a los pulsos sin correlación de la fuente; hacer exclusiones en la parte final de la exponencial para evitar la contribución de los neutrones retardados. Asimismo se debe escoger un ancho de canal pequeño (aprox. 1 ms) del analizador estocástico para conseguir un decaimiento completo del término exponencial de la función arriba mencionada.

En el modelo de Alfa-Feynman, para conseguir mejor precisión en el ajuste [6], Y debe medirse en toda su extensión; es decir hasta  $\alpha t \gg 1$ , dado que para valores pequeños de t,  $Y \cong 1 + Y_0 \alpha t / 2$ , y para valores grandes de t,  $Y \cong 1 + Y_0$ , es decir que la parte final de la curva completa, el ajuste no alcanza una precisión conveniente para los parámetros  $\alpha$  e  $Y_0$ .

La distribución de intervalos de tiempo, pulso a pulso, expresada por la función (19), se puede escribir en forma más simple mediante la siguiente ecuación:

$$p(t) = 4a_1 P_0(t) q^2 + a_2, \quad (20)$$

donde,  $a_1 = F_0 \tau$ ,  $a_2$  es el término de fondo que aparece debido a la incertidumbre del ciclo de análisis, y

$$q = \frac{(\gamma+1) + (\gamma+1)e^{-\alpha\gamma t}}{(\gamma+1)^2 - (\gamma-1)^2 e^{-\alpha\gamma t}}. \quad (21)$$

El ajuste simultáneo de los parámetros,  $Y_0$ ,  $\alpha$ ,  $a_2$  y  $a_1$ , es muy sensible a los valores iniciales de estos; debido a la forma de la función (20) y a la sensibilidad de los parámetros ajustables. Por esto es conveniente analizar el comportamiento asintótico de la función (20), en los límites  $t \rightarrow \infty$ ,  $t \rightarrow 0$ ,  $Y_0 \rightarrow 0$ .

### 3.1. LIMITE $t \rightarrow \text{CERO}$ .

La función de Pál (18), se desarrolla en una serie de Taylor, aproximándose la función (20) a la expresión [2],

$$\ln p(t) \cong \ln a_1 - (a_1 + Y_0 \alpha / 2)t + O(t^2) \quad (22)$$

Despreciando los términos de segundo orden, la función (22) es sensitiva a la combinación  $(a_1 + Y_0 \alpha / 2)$  de los parámetros buscados. De donde se concluye que si  $a_1 \gg Y_0 \alpha / 2$ , la función es independiente de los parámetros característicos del reactor. Pero al mismo tiempo, según Babala [5], este método es aplicable para valores de  $a_1$  relativamente altos, donde el modelo de Alfa-Rossi no es aplicable. En consecuencia se debe tener cuidado en escoger la tasa de contaje.

### 3.2. LIMITE $t \rightarrow$ INFINITO.

La función (20) se aproxima a,

$$\ln p(t) = \ln [a_1 / (\gamma + 1)] - 2 a_1 t / (\gamma + 1), \quad (23)$$

donde se observa que la parte final de la curva es independiente de  $\alpha$

### 3.3. LIMITE $Y_0 \rightarrow$ CERO.

Cuando la eficiencia,  $\epsilon$ , del detector es pequeña,  $Y_0$  también es pequeño. En este caso  $\gamma \rightarrow 1$ ,  $q = 1/2$  y  $p(t)$  toma la forma de la distribución de Poisson:

$$p(t) \cong a_1 e^{-a_1 t} \quad (24)$$

La cual es independiente de los parámetros del reactor. Resumiendo, en la distribución de intervalos de tiempo, pulso a pulso, es conveniente escoger una posición para el detector, donde  $Y_0$  sea mayor que cinco.

De las funciones (14) y (5) se determina la eficiencia del detector de neutrones,

$$\epsilon = \frac{Y_0 \beta_{\text{eff}}^2 (1 - \rho_p / \beta_{\text{eff}})^2}{D_v (1 - \beta_{\text{eff}})^2} (\text{n. det/fis.}), \quad (25)$$

donde,  $\beta_{\text{eff}}$  se puede medir experimentalmente o calcular mediante códigos [7].

Así es como de la función (7) se obtiene la reactividad en dólares, del reactor, para los estados en los cuales es medido el parámetro  $\alpha$ :

$$r = \rho_p / \beta_{eff}$$

Las mediciones experimentales consiste en detectar los neutrones del proceso nuclear del reactor, mediante el detector de neutrones, cuyos impulsos se amplifica y conforma en el pre-amplificador y amplificador-conformador. Luego estas son procesadas por el analizador estocástico, finalmente ajustados a los modelos teóricos mediante la computadora profesional DEC-350. La instrumentación instalada es mostrada en la Fig. 2.

#### 4. RESULTADOS

En las tablas 1-3 se muestran los resultados obtenidos mediante los modelos de Alfa-Rossi, Alfa-Feynman y el método de Babala. Mediante el

Tabla 1. Mediciones de parámetros cinéticos del reactor RP-0, del Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima, mediante el método de Alfa-Rossi.

Identificación	Posición de la barra(%)	Tasa de conteaje (cuentas/s)	Alfa ( $\alpha$ ) (1/s)	$S_p / \beta_{eff}$
Picros 140	30.0	379.4±3.2	78.8±3.2	0.50±0.12
Picros 150	26.0	309.7±2.9	79.8±3.3	0.51±0.12
Picros 160	22.0	231.8±2.6	93.2±3.8	0.78±0.11
Picros 170	18.0	183.8±2.2	103.6±4.1	0.97±0.11
Picros 220	14.0	167.6±1.8	105.6±4.1	1.01±0.11
Picros 190	10.0	141.9±1.7	112.9±4.1	1.15±0.11
Picros 200	6.0	133.1±1.7	126.2±4.1	1.54±0.10

Tabla 2. Mediciones de parámetros cinéticos del reactor RP-0, del Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima, mediante el método de Alfa-Feynman.

Identificación	t(ms)	Y(t)
Picfey 080	0.5	1.174
Picfey 180	1.0	1.737
Picfey 081	2.0	2.168
Picfey 181	5.0	2.730
Picfey 182	20.0	4.163
Picfey 085	50.0	5.193

Tabla 3. Mediciones de parámetros cinéticos del reactor RP-0, del Instituto Peruano de Energía Nuclear, Lima, mediante el método de Babala.

Identificación	Tasa de contaje (cuentas/s)	$Y_0$	Alfa ( $\alpha$ ) (1/s)
Picbab 060	317	7.45±1.24	92.1±19.2
Picbab 061	280	9.93±1.96	58.0±13.6
Picbab 062	475	7.36±1.96	76.5±16..
Picbab 063	700	3.92±1.68	94.5±45.6
Picbab 064	1116	6.21±3.67	87.2±49.6
Picbab 065	1524	3.37±1.50	177.9±87.7

método de Babala, los resultados fueron obtenidos realizando iteraciones sucesivas. En primer lugar se fijó los parámetros  $\alpha$  e  $Y_0$ , dados por Alfa-Rossi y Alfa-Feynman, respectivamente, ajustando los parámetros  $a_2$  y  $a_3$  de la función (20). Luego se fijo  $a_2$  y  $a_3$ , ajustandose los valores para  $\alpha$  e  $Y_0$ .

Los valores promedios para  $Y_0$  y  $\alpha$ , obtenidos por el método de Babala son los siguientes:  $Y_0 = 6.37 \pm 1.91$  y  $\alpha = 97.70 \pm 30.37$  1/s. Para la misma posición de la barra de control (20.6%), mediante el modelo de Alfa-Rossi se encontró  $\alpha = 94$  1/s,  $Y_0 = 6.05 \pm 0.77$ .

A partir de los modelos de Alfa-Feynman y Babala, usando el valor promedio de  $Y_0$  y  $D_v = 0.795$  [5], la expresión (25) se convierte en,

$$\epsilon = 7.81 \frac{\beta_{eff}(1 - \rho_p/\beta_{eff})^2}{(1 - \beta_{eff})^2} \text{ (n. det./fis.) .}$$

Del ajuste de las mediciones de Alfa-Rossi, para  $\alpha$  en función de la inversa de cuentas promedio  $\langle N \rangle$ . con los detectores de trifluoruro de boro, se ha obtenido  $\alpha_c = 52.44 \pm 3.74$  1/s. Ver Fig. 3.

Con el valor de  $\alpha_c$  y  $\alpha$  mediante la ecuación (7), se ha obtenido la reactividad  $\rho_p/\beta_{eff}$ , para los estados del reactor en los cuales se midió el parámetro  $\alpha$ , como lo muestra la tabla 1.

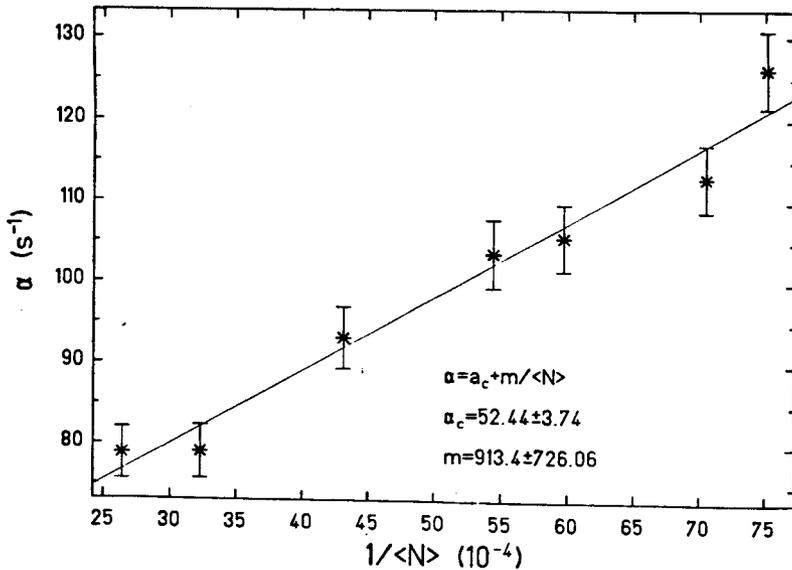


Fig. 3. Comportamiento de la constante de decaimiento de los neutrones prontos ( $\alpha$ ) en función de la inversa de las cuentas promedio,  $\langle N \rangle$ , para el reactor RP-0.

## 5. CONCLUSION

Las mediciones han sido realizadas en el reactor de entrenamiento RP-0, poniéndose a punto técnicas que serán usadas para mediciones futuras en el mismo sistema crítico o en cualquier otro sistema, como complemento a otras medidas. Los resultados obtenidos mediante cada uno de los modelos han sido utilizados en forma complementaria.

Los valores de  $Y_0$ , obtenidos mediante los modelos de Feynman y Babala están dentro del error experimental; sin embargo el método de Babala es menos preciso, como lo muestra el análisis hecho en el ajuste del modelo para las mediciones experimentales. El parámetro  $\alpha$ , obtenido mediante este modelo es sensible a la tasa de conteje, disminuyendo su precisión grandemente para elevados niveles de conteje.

El modelo de Alfa-Rossi permite determinar  $\alpha$ ,  $Y_0$  y  $\beta_{\text{eff}}$ . Se puede determinar la eficiencia del detector de neutrones y calibrar la potencia del reactor. Así mismo,  $\alpha$ , relacionado con las ecuaciones de la cinética, ha permitido la determinación de la reactividad del reactor para los estados del valor  $\alpha$ .

## REFERENCIAS

- [1] Alcalá Ruíz F., Aplicación de la Distribución Exacta  $\rho\kappa$  a la Determinación de Parámetros Cinéticos de un Reactor, J.E.N. 516, Madrid, 1982
- [2] Z. Szatmáry, J. Avila, Mediciones de Ruido Neutrónico Utilizando el Analizador Estocástico NSA-1000, IPEN, Lima, Sept. 1984
- [3] M. Williams, Random Process in Nuclear Reactors, Pergamon Press, 1974
- [4] J. Avila, Parámetros Medidos en el RP-0 con el analizador Estocástico NSA-1000 Mediante Ruido Neutrónico en el dom Temporal, Informe IPEN, Lima, 1984
- [5] R. E. Uhrig, Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems, U. S. Atomic Energy Commision, Tennese, Oak Ridge, 1970
- [6] Z. Szatmáry, Descripción del Programa STPROC, Informe OIEA, Lima, Agosto 1984
- [7] Z. Szatmáry and I. Turi, Determination of  $\beta_{eff}$  by Method of Statistical Weights and Measuring the Absolute Power of the Reactor, Nukleonik 12(1969)241-243

Medición de parámetros cinéticos en un reactor nuclear mediante ruido neutrónico en el dominio del tiempo por Juan Avila, Arturo Ramón se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.