

08.75.05

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| C.N.E.A. Biblioteca   |                  |
| ARCHIVO PUBLICACIONES |                  |
| Nº<br>1               | AÑO<br>Ene. 1975 |

INTRODUCCION A LA CINETICA NUCLEAR

Félix C. DIFILIPPO  
Ricardo M. WALDMAN

BUENOS AIRES  
1974

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

INTRODUCCION A LA CINETICA NUCLEAR

Félix C. DIFILIPPO  
Ricardo M. WALDMAN

BUENOS AIRES  
1974

INIS CLASSIFICATION AND KEYWORDS

E21

REACTOR KINETICS  
REACTOR KINETICS EQUATIONS  
REACTIVITY  
ROD DROP METHOD  
REACTIVITY METERS  
PULSED NEUTRON TECHNIQUES  
TABLES  
REACTOR PERIOD  
BOLTZMANN EQUATION  
MEASURING METHODS  
EDUCATION  
MANUALS

## RESUMEN

La creciente actividad docente en el departamento de Reactores, debido a la actualización de su personal y a la colaboración con las Universidades ha movido a los autores, a presentar de manera unitaria y sistemática, los distintos métodos de medición de parámetros cinéticos en sistemas multiplicativos.

La información presentada, con algunos desarrollos propios, esta desperdigada en abundante bibliografía, algunas de las cuales se hallan en la referencia respectiva. Es por eso que los autores consideran que este trabajo será de utilidad, ya sea como introducción, para luego profundizar en el tema, o para la formación básica de un curso de reactores.

A partir de una formulación lo más genérica posible, (ecuación de transporte de Boltzman) se deducen las ecuaciones de la cinética puntual con sus limitaciones, una vez planteada la solución general de esta última, se deducen los distintos métodos de medición como corolarios.

## CAPITULO I

### ECUACIONES DE LA CINETICA PUNTUAL

#### a) *Introducción*

El estado de un reactor depende de muchos factores, por ejemplo, cantidad de elementos combustibles, presencia de materiales moderadores, posición de barras de control, presencia de venenos, etc., y es generalmente definido como subcrítico, crítico, o supercrítico. El parámetro más aceptado para caracterizar el estado de un reactor, es la reactividad. Este parámetro es utilizado también, para describir la influencia de la variación de un componente del reactor sobre ese estado; por lo cual, uno de los principales problemas en cinética de reactores y en control, es la determinación de la reactividad, ya sea teóricamente, y/o experimentalmente.

Este trabajo tiene el objetivo de describir, a partir de una formulación lo más genérica posible, los distintos métodos de medición de reactividades, como así también sus limitaciones. Para ello es necesario conocer las definiciones de los principales parámetros que aparecen en cinética de reactores, y que puede resumirse en la siguiente tabla:

TABLA I

Parámetros cinéticos

| NOMBRE                                    | SIMBOLO                            | CONCEPTO                           | VALOR TEORIA A<br>1 GRUPO                         |
|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Constante de multi-<br>plicación efectiva | $k_{ef}$                           | <Producción><br><Destrucción>      | $\frac{v \Sigma_f}{\Sigma_a + DB^2}$              |
| Vida Media                                | $\lambda$                          | <Densidad Neut><br><Destrucción>   | $\frac{1}{V(\Sigma_a + DB^2)}$                    |
| Reactividad                               | $\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}}$ | <Producción-Dest.><br><Producción> | $\frac{v \Sigma_f - \Sigma_a - DB^2}{v \Sigma_f}$ |
| Tiempo entre<br>generaciones              | $\Lambda = \frac{\lambda}{k_{ef}}$ | <Densidad Neut.><br><Producción>   | $\frac{1}{V v \Sigma_f}$                          |

Donde < > significa promedio en el espacio de las fases ( $\vec{r}$ ,  $\vec{v}$ ) del proceso físico indicado. En producción se debe considerar únicamente, el proceso de fisión. Por destrucción se indica los procesos de absorción, fuga y el de transferencia de neutrones de un grupo de energía a otro.

#### b) Ecuaciones de la Cinética puntual

Esta ecuación resulta del balance neutrónico entre los términos de producción y destrucción. Por la definición de la vida media,  $N(t)/\lambda$  ( $N(t)$  densidad neutrónica al instante  $t$ ) es el número de neutrones que desaparecen por unidad de tiempo, y representa el término de destrucción. De estos  $k_{ef} N(t)/\lambda$  son los que se producirían por fisión, pero debido a la existencia de los neutrones retardados,  $(1 - \beta) k_{ef} N(t)/\lambda$  ( $\beta$  fracción efectiva de neutrones retardados) son los que aparecen como instantáneos; además por decaimiento de los precursores, se producen

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(t)$$

neutrones retardados ( $\lambda_i$  constante de decaimiento y  $C_i$  concentración al instante  $t$ , del grupo precursor  $i$  de neutrones retardados;  $m$ : número de grupos precursores). Si  $Q(t)$  es el número de neutrones producidos por unidad de tiempo por un fuente externa, (fuente externa efectiva al instante  $t$ ) el balance neutrónico resultante es:

$$\frac{d N(t)}{dt} = \frac{(1 - \beta) k_{ef} N(t)}{\lambda} + \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(t) + Q(t) - \frac{N(t)}{\lambda} \quad (1)$$

Además existe una ecuación de balance para cada grupo de precursores. Como hemos dicho,  $\lambda_i$ ,  $C_i(t)$  son los que decaen y representa el término de destrucción. De los  $k_{ef} N(t)/\lambda$  neutrones que se producirían por fisión, únicamente la fracción  $\beta_i$  ( $\beta_i$  fracción efectiva de neutrones retardados del grupo  $i$ -ésimo) serán los neutrones retardados correspondientes al grupo  $i$ -ésimo.

De ahí que la ecuación de balance sea:

$$\frac{d C_i(t)}{dt} = \frac{\bar{\beta}_i K_{ef} N(t)}{\Lambda} - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

De acuerdo a las definiciones dadas previamente, las ecuaciones (1) y (2) pueden escribirse:

$$\frac{d N(t)}{dt} = \rho \frac{N(t)}{\Lambda} - \frac{\bar{\beta} N(t)}{\Lambda} + \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(t) + Q(t) \quad (3)$$

$$\frac{d C_i(t)}{dt} = b_i \frac{\bar{\beta} N(t)}{\Lambda} - \lambda_i C_i(t) \quad (4)$$

siendo  $b_i = \bar{\beta}_i / \bar{\beta}$ , la fracción relativa de neutrones retardados del grupo  $i$ -ésimo.

Las ecuaciones (3) y (4) se denominan ecuaciones de la cinética puntual, por ser ecuaciones independientes del espacio y de la energía. Los parámetros  $\rho$ ,  $\bar{\beta}$  y  $\Lambda$  que aparecen, son parámetros efectivos de todo el reactor.

En el apéndice A, se deducen estas ecuaciones a partir de los primeros principios, y se obtendrán las limitaciones de las mismas. El número de parámetros que aparecen en las ecuaciones (3) y (4) es a menudo reducido, tratando como parámetros cinéticos, los dos cocientes  $\$ = \rho / \bar{\beta}$  y  $\Lambda^* = \Lambda / \bar{\beta}$  llamados respectivamente, reactividad en dólares y tiempo entre generaciones reducido. Este tratamiento, además de reducir el número de parámetros, ofrece dos ventajas adicionales:

- 1) Demostraremos posteriormente, que la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos en criticidad, es igual a  $1/\Lambda^*$ .
- 2) El estado de criticidad con neutrones instantáneos, está determinado por la igualdad  $\$ = 1$ .

Con estas definiciones, las ecuaciones cinéticas pueden escribirse:

$$\frac{d N(t)}{dt} = \frac{\$ - 1}{\Lambda^*} N(t) + \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(t) + Q(t) \quad (5)$$

$$\frac{d C_i(t)}{dt} = \frac{b_i N(t)}{\Lambda^*} - \lambda_i C_i(t) \quad (5)$$

## CAPITULO II

### SOLUCIONES DE LAS ECUACIONES DE LA CINETICA PUNTUAL

PROBLEMA A: *Solución de las ec. de la Cinética Puntual cuando la reactividad es constante y hay una fuente exterior en el sistema.*

Al ser constante la reactividad, las ecuaciones de la cinética puntual (5) y (6) son ecuaciones diferenciales lineales a coeficientes constantes.

Estas se resuelven en general, utilizando la transformada de Laplace (ver referencias [1] y [2]).

Si transformamos ambos miembros de las ec. (5) y (6) se obtiene:

$$s \cdot n(s) - N(0) = \frac{\beta - 1}{\Lambda^*} n(s) + \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(s) + q(s) \quad (7)$$

$$s \cdot C_i(s) - C_i(0) = \frac{\beta_i}{\Lambda^*} n(s) - \lambda_i C_i(s) \quad (8)$$

siendo  $n(s) = L \{N(t)\}$  ;  $C_i(s) = L \{C_i(t)\}$  ;  $q(s) = L \{Q(t)\}$

Si hasta el instante inicial, la densidad neutrónica está en equilibrio

$$\left. \frac{d C_i(t)}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{d N(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0$$

resulta de la ec. (6):

$$\frac{\beta_i N(0)}{\Lambda^*} = \lambda_i C_i(0) \quad (9)$$

Despejando  $C_i(0)$  de la ec. (9) y reemplazando en la ec. (8) se llega a:

$$\lambda_i C_i(s) = \left[ \frac{\beta_i}{\Lambda^*} N(0) + \frac{\beta_i}{\Lambda^*} n(s) \right] \frac{1}{s + \lambda_i} \quad (10)$$

Reemplazando la ec. (10) en la ec. (7) y operando se obtiene:

$$n(s) = N(0) \left[ \Lambda^* + W(s) \right] G(s) + \Lambda^* q(s) G(s) \quad (11)$$

Siendo

$$W(s) = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{s + \lambda_i} \quad \text{y} \quad G(s) = \frac{1}{s [\Lambda^* + W(s)] - \$}$$

La ec. (11) nos da la respuesta del reactor, (en el espacio transformado) cuando hay una fuente exterior aplicada.

Analizaremos la ec. (11) para algunos casos particulares:

CASO A-1:  $N(0) = 0$ ;  $Q(t) = AH(t)$  donde  $H(t)$  es la función Heaviside.

CASO A-2:  $N(0) = 0$ ;  $Q(t) = Q(t + T)$  (función periódica en el tiempo).

CASO A-3:  $N(0) = \text{cte}$ ;  $Q(t) = 0$

CASO A-4:  $N(0) = \text{cte}$ ;  $Q(t) = AH(t)$ .

CASO A-1: Reactor subcrítico sin fuente exterior hasta el instante inicial, e introducción posterior de una fuente constante.

La ecuación (11) se reduce en este caso a :

$$n(s) = \Lambda^* q(s) G(s) \quad (12)$$

Puede observarse que  $G(s)$  es la respuesta del sistema, salvo una constante, si  $q(s) = 1$  ( $Q(t) = \delta(t)$  delta de Dirac), o sea, es la denominada función de Green del sistema.

Aplicando la propiedad de la convolución (físicamente es el principio de superposición):

$$N(t) = \Lambda^* \int_0^t G(t - \tau) Q(\tau) d\tau \quad (13)$$

Para conocer  $G(t)$  hay que antitransformar  $G(s)$ . Para ello averiguemos los polos de  $G(s)$ , es decir, las raíces de la ecuación:

$$s \left[ \Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{s + \lambda_i} \right] = \$ \quad (14)$$

llamada ecuación inhour.

Si  $\gamma_j$  son las raíces de la ec. (14)

$$G(t) = \sum_j A_j e^{\gamma_j t} \quad (15)$$

Donde los coeficientes  $A_j$  se calculan mediante la fórmula

$$A_j = \lim_{s \rightarrow \gamma_j} (s - \gamma_j) G(s) \quad (16)$$

y operando, se llega a la expresión:

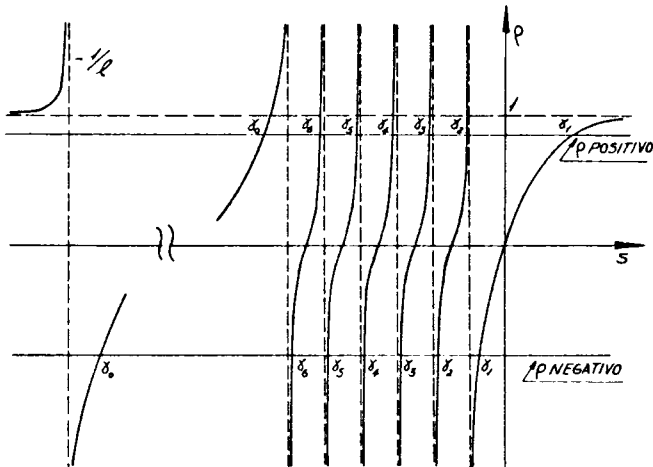
$$A_j = \frac{1}{\Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i \lambda_i}{(\gamma_j + \lambda_i)^2}} \quad (17)$$

La ecuación inhour, puede ser llevada a la siguiente forma, la cual es más adecuada para graficar la función:

$$\rho = \frac{\ell \cdot s}{1 + \ell \cdot s} + \frac{1}{1 + \ell \cdot s} \sum_{i=1}^m \frac{s \bar{\beta}_i}{s + \lambda_i} \quad (18)$$

Para graficar  $\rho = f(s)$ , observemos que hay  $m+1$  asíntotas verticales, las  $s = -\lambda_i$ , y la  $s = -1/\ell$ . Además hay una asíntota horizontal  $\rho = 1$ , pues por su definición, este es el valor máximo que puede tener la reactividad. Un esquema del gráfico es el siguiente:

FIGURA 1  
Representación gráfica de la ecuación inhour



En general la raíz  $\gamma_0$ , que corresponde al decaimiento de los neutrones instantáneos, es mucho más pequeña algebraicamente que las otras

raíces, que corresponden al decaimiento de los neutrones retardados. Por ejemplo, para el caso de  $U^{235}$  con moderador agua liviana:

$$|\gamma_0| \geq + 10^2 \text{ seg}^{-1} \quad \text{y} \quad |\gamma_6| \leq + 3 \text{ seg}^{-1}$$

Para otros combustibles y/o elementos moderadores, puede consultarse la referencia [3].

Desde un punto de vista experimental; interesan las raíces  $\gamma_0$  y  $\gamma_1$ .

Si la raíz más pequeña  $\gamma_0$  la llamamos  $-\alpha$ , la ec. (14) se escribe:

$$\rho = -\Lambda^* \alpha - \alpha \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{-\alpha + \lambda_i} \quad (19)$$

y como  $\alpha \gg \lambda_i$  (que es del orden de  $\gamma_i$ ) como ya comentáramos, la ec. (19) resulta en:

$$\rho = -\Lambda^* \alpha + 1 \quad (20)$$

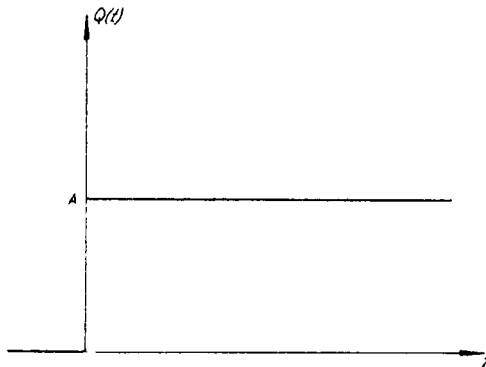
La ec. (20) es el punto de partida para medir reactividades según los métodos de Simmons-King y Garelis-Russell.

Retornemos a la Figura 1. Observamos que para  $\rho > 0$  (reactor supercrítico) hay una raíz positiva ( $\gamma_1$ ) y 6 negativas. Si  $\rho < 0$  (reactor subcrítico) todas las raíces son negativas. Si  $\rho = 0$  (reactor crítico) la raíz  $\gamma_1$ , es nula y las demás negativas.

Ahora ya estamos en condiciones de resolver el problema planteado. Lo haremos directamente a partir de la ec. (12) siendo  $q(s) = A/s$  ( $Q(t) = A H(t)$ ).

FIGURA 11

Representación de  $Q(t) = AH(t)$



Para antitransformar  $n(s)$  de la ec. (12) debemos averiguar previamente sus polos. Estos son: 0 y las raíces de la ec. inhour, luego:

$$n(t) = B + \sum_{j=0}^m B_j e^{\gamma_j t} \quad (21)$$

siendo:

$$B = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot n(s) = - \frac{\Lambda^* A}{\$} \quad (22)$$

$$B_j = \lim_{s \rightarrow \gamma_j} (s - \gamma_j) n(s) = \frac{\Lambda^* A}{\gamma_j} A_j \quad (23)$$

donde los  $A_j$  están dados por la ec. (17).

Por ser el reactor subcrítico, todos los  $\gamma_j$  son negativos, y luego de un transiente, todas las exponenciales decaen, y la solución asintótica es:

$$N_A = N(t \rightarrow \infty) = - \frac{\Lambda^* A}{\$} \quad (24)$$

que puede escribirse, a partir de las definiciones de  $\$$  y  $\Lambda^*$ :

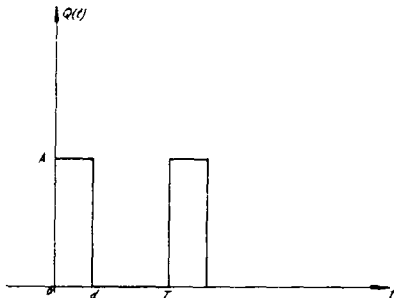
$$N_A = \frac{\ell \cdot A}{1 - K_{ef}} \quad (25)$$

Esta última ecuación, es aplicada como primera aproximación a criticidad. La carga crítica de combustible puede ser predecida, observando como se aproxima  $1/N_A$  a cero, es decir,  $K_{ef}$  a 1 a medida que se agrega combustible. Una modificación de esta técnica, que permite la determinación del valor de la reactividad, es descrito en el método de la fuente.

CASO A-2: Reactor Subcrítico sin fuente hasta el instante inicial e introducción posterior de una fuente periódica en el tiempo.

FIGURA III

Representación de una fuente periódica



En la práctica, se utiliza como fuente periódica, la representada en la figura 3, que tiene como ecuación:

$$Q(t) = A F(t)$$

$$\text{donde } F(t) = \begin{cases} 1 & nT + d \geq t \geq nT \\ 0 & (n+1)T > t > nT + d \end{cases} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (26)$$

Reemplazando la ec. (26) en la ec. (13), donde  $G(t)$  está dado por las ecs. (15) y (17), y operando, se obtiene la contribución a la densidad después del  $n$ -ésimo pulso.

$$N_n(t) = \Lambda^* A \sum_{j=0}^m \frac{A_j}{-\gamma_j} \left[ \frac{e^{-\gamma_j d} - 1}{e^{-\gamma_j T} - 1} \left( e^{\gamma_j (t-nT)} - e^{\gamma_j t} \right) + \left( 1 - e^{\gamma_j (t-nT)} \right) \right] \quad (27)$$

para  $nT + d \geq t \geq nT$

$$N_n(t) = \Lambda^* A \sum_{j=0}^m \left( \frac{A_j}{-\gamma_j} \right) \frac{e^{-\gamma_j d} - 1}{e^{-\gamma_j T} - 1} \left( e^{\gamma_j (t-(n+1)T)} - e^{\gamma_j t} \right) \quad (28)$$

para  $(n+1)T > t > nT + d$

Las ec. (27) y (28) son idénticas para  $t = nT + d$ .

Estas ecuaciones son el punto de partida para medir reactividades, según los métodos de Gozani, Garelis-Russell y de Sjöstrand.

CASO A-3: Reactor con una población neutrónica en equilibrio hasta el instante inicial y posterior variación brusca de la misma sin fuentes exteriores.

En la práctica se puede realizar de tres maneras:

- Si el reactor está inicialmente en un estado subcrítico con una fuente exterior constante, y se retira rápidamente dicha fuente en el instante inicial (método integral de "Source jerk").
- Si el reactor está inicialmente crítico sin fuentes exteriores, y se introduce rápidamente una barra de control (método integral de "rod drop").

- c) Si el reactor está inicialmente crítico sin fuentes exteriores, y se introduce o quita rápidamente reactividad mediante barras de control (mé- todo del período asintótico).

Para este caso, la ec. (11) se reduce a:

$$n(s) = N(0) \frac{\Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{\lambda_i + s}}{s(\Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{s + \lambda_i})} - \$ \quad (29)$$

De esta última ecuación se deduce:

$$\lim_{s \rightarrow 0} n(s) = N(0) \frac{\Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{\lambda_i}}{-\$} \quad (30)$$

Por otra parte, por su definición:

$$\lim_{s \rightarrow 0} n(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \int_0^{\infty} e^{-st} N(t) dt = \int_0^{\infty} N(t) dt \quad (31)$$

de las ec. (30) y (31) se obtiene:

$$-\$ = \frac{N(0) (\Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{\lambda_i})}{\int_0^{\infty} N(t) dt} \quad (32)$$

Esta última es la ecuación de partida, para los métodos de "Rod Drop" y "Source Jerk".

Aparece muy a menudo la suma:  $\Lambda^* + \sum_{i=1}^m b_i/\lambda_i$ . El primer término, en general es despreciable frente al segundo, que depende únicamente del elemento combustible. Por ejemplo para un reactor de  $^{235}\text{U}$  moderado con agua liviana:  $\Lambda^* \approx 0.013$  seg y  $\sum_{i=1}^m b_i/\lambda_i = 13.02$  seg. De lo anterior se deduce, que con muy buena aproximación, la ec. (32) puede escribirse, para el caso de reactores con combustibles de  $^{235}\text{U}$ :

$$-\$ = \frac{13.02 N(0)}{\int_0^{\infty} N(t) dt} \quad (33)$$

Para otros combustibles variará el coeficiente numérico.

La solución de la ec. (29), que se puede obtener usando la propiedad de la convolución es:

$$N(t) = N(0) \left[ \Lambda^* \sum_{j=0}^m A_j e^{\gamma_j t} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^m \frac{b_i A_j}{\gamma_j + \lambda_i} (e^{\gamma_j t} - e^{-\lambda_i t}) \right] \quad (34)$$

Luego de un transiente, la evolución del reactor va a estar gobernado por el término en  $j = 1$ , o sea:

$$N(t) = \text{cte. } e^{t/T} \quad (35)$$

Siendo  $T = 1/\gamma_1$ , el período asintótico del reactor.

Reemplazando en la ec. (14), el valor de  $T$ , se obtiene la siguiente relación:

$$-\beta = \Lambda^*/T + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{1 + \lambda_i T} \quad (36)$$

La ecuación anterior, se puede aproximar despreciando el primer término:

$$-\beta = \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{1 + \lambda_i T} \quad (37)$$

Las ec. (36) y (37) son las justificaciones teóricas para la medición de reactividades por el método del período asintótico.

La ec. (29), puede ser reescrita de la siguiente forma:

$$s n(s) = s n(s) \left[ \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{s + \lambda_i} + \Lambda^* \right] - N(0) \left[ \Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{s + \lambda_i} \right] \quad (38)$$

La ec. (38), es el punto de partida para la medición de reactividades mediante el reactímetro.

CASO A-4: Reactor en Estado crítico sin fuente exterior hasta el instante inicial e introducción posterior de una fuente constante.

Para este caso, resolviendo la ec. (11) con  $q(s) = A/s$  se obtiene:

$$N(t) = N(0) \left[ \Lambda^* \sum_{j=0}^m A_j e^{\gamma_j t} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^m \frac{b_i A_j}{\gamma_j + \lambda_i} \left( e^{\gamma_j t} - e^{-\lambda_i t} \right) \right] + \Lambda^* A \sum_{j=0}^m \frac{A_j}{-\gamma_j} (1 - e^{\gamma_j t}) \quad (39)$$

Por estar el reactor en estado crítico,  $\gamma_1 = 0$  y todas las demás raíces de la ec. inhour son negativas, de ahí que luego de un transiente, la solución persistente es el término en  $j = 1$ :

$$N_A = N(t \rightarrow \infty) = N(0) \left[ A_1 \left( \Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{\lambda_i} \right) \right] + \Lambda^* A A_1 t = \text{cte} + p.t \quad (40)$$

Es decir, hay un crecimiento lineal en la densidad neutrónica y la pendiente de la recta vale:

$$P = \Lambda^* A A_1 \quad (41)$$

donde  $A_1$  está dado por la ec. (17).

$$A_1 = \frac{1}{\Lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{\lambda_i}} \cong \frac{1}{13.02} \text{ seg} \quad (42)$$

Donde la última expresión de la derecha, vale para un reactor con combustible de  $U^{235}$ , como ya hemos comentado. La ec. (24) y (41) son la base teórica del método de la fuente para la medición de reactividades.

#### MÉTODOS DIRECTOS DE "ROD DROP" Y "SOURCE JERK"

Si el reactor tenía una población en equilibrio hasta el instante inicial

$$\left( \frac{dN(t)}{dt} \right) \bigg|_{t=0} = \frac{dC_i(t)}{dt} \bigg|_{t=0} = 0 ,$$

se obtiene de la ec. (6):

$$N(0) = \Lambda^* \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(0) \quad (43)$$

Luego de producido el transiente rápido por el decaimiento de neutrones instantáneos, el flujo empieza a variar lentamente ya que los precursores tienen vidas medias muy grandes relativas a la de los neutrones instantáneos, por lo que se puede suponer  $\frac{d N_d(t)}{dt} \approx 0$  ( $N_d(t)$  población neutrónica cuasi en equilibrio luego del decaimiento de los neutrones instantáneos). Con esta aproximación, a partir de la ec. (5) se obtiene:

$$N_d(t) = \frac{\Lambda^*}{1 - \beta} \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(t) \quad (44)$$

Como la concentración de precursores, por lo dicho anteriormente, no varía sustancialmente en el tiempo,  $C_i(t) = C_i(0)$ .

Reemplazando en la ec. anterior:

$$N_d(t) = \frac{\Lambda^*}{1 - \beta} \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i(0) \quad (45)$$

De las ec. (43) y (45) se obtiene:

$$\beta = 1 - \frac{N(0)}{N_d} \quad (46)$$

La ec. (46), es el punto de partida para la medición de reactividades por los métodos directos de "rod drop" y "source jerk"

*PROBLEMA B: Solución de las Ecuaciones de la Cinética Puntual cuando la Reactividad varía en el Tiempo.*

Para este caso las ec. de la cinética puntual (5) y (6) dejan de ser lineales a coeficientes constantes, y salvo casos particulares, no se puede obtener una solución analítica y debe resolverse por métodos computacionales.

La solución analítica para  $\rho(t) = A H(t)$  (función de Heaviside) fue resuelto en el caso A-3. Para una variación lineal de la reactividad en función del tiempo, puede consultarse la referencia [5], para una variación periódica de pequeña amplitud, puede consultarse las ref [3] y [6], y para una variación arbitraria de la reactividad, puede consultarse los métodos computacionales en la ref [3].

## METODOS EXPERIMENTALES

### a) Introducción

Antes de comenzar la descripción de las distintas técnicas, debemos adelantar las limitaciones generales de los métodos experimentales que se deducen de la cinética puntual, para poder especificar la validez de los mismos. Estas son:

- 1º) La variación temporal del reactor es la misma para cualquier punto del mismo, y para cualquier energía. Matemáticamente significa que la población neutrónica  $N(\vec{r}, \vec{v}, t) = N(\vec{r}, \vec{v}) \cdot T(t)$ . Experimentalmente se puede verificar esta hipótesis midiendo algún observable directo (que son únicamente las raíces de la ec. inhaur), para distintas posiciones del detector, para distintos rangos de energía y observando su constancia.
- 2º) Las densidades neutrónicas, instantáneas y retardada, tienen la misma distribución espacial. En sistemas reflejados, con pequeña sección eficaz de absorción ( $\Sigma_a \approx \frac{\lambda}{V}$ ), puede ser demostrado teóricamente y verificado experimentalmente, que hay discrepancias entre ambas distribuciones, especialmente en el reflector. Este efecto se denomina distorsión cinética (ver referencias [7] y [8]). Cuando existe distorsión cinética, el método experimental deducido a partir de la cinética puntual, puede aún utilizarse, corrigiéndolo mediante un cálculo auxiliar (referencia [7] y [10] o experimentalmente (ref. [9])).
- 3º) Se considera únicamente la distribución espacial del modo fundamental, es decir, se ignora la contribución debido a los armónicos superiores. Experimentalmente, se puede evitar la contaminación armónica de dos formas.
  - a) Midiendo luego de un lapso  $\Delta t > 1/\alpha$  después de finalizada la perturbación, para que decaigan los armónicos superiores.
  - b) Explotando las condiciones de simetría, es decir, posicionando adecuadamente el detector y la fuente, de forma de no excitar los armónicos superiores, o de no detectarlos. Por ejemplo, si se puede colocar la fuente en el centro geométrico del reactor, se excitan únicamente los armónicos pares, y si el detector (que se puede considerar puntual) se posiciona en algún punto donde se anulen los primeros armónicos pares, este, detecta casi exclusivamente el modo fundamental. Si el detector es grande, como integra la población neutrónica en el espacio, posicionándolo adecuadamente será insensible a los armónicos superiores.
- 4º) Se considera que todo cambio en el estado del reactor, produce únicamente variación en la reactividad. Esta suposición es válida aproximadamente, pues  $\bar{\beta}$  y en particular  $\Lambda$ , para estados distintos del reactor, son en general diferentes. Esto es válido también, para la fuente efectiva de neutrones, la cual cambia en general conjuntamente con el estado del reactor, aún cuando la fuente real externa no varíe.

Por ejemplo: un cambio en la cantidad de material absorbente, influencia primero la remoción de neutrones, y como consecuencia varía la reactividad y la vida media. Simultáneamente las distribuciones espaciales y energéticas de la población neutrónica y su función importancia, también son modificadas, lo cual influencia los parámetros  $\beta$ ,  $\Lambda$  y  $Q$  (ver Apéndice A). Por otro lado, un cambio en la cantidad de material fisio- nable influencia no solamente la reactividad, sino también el tiempo entre generaciones, y a través de las distribuciones espaciales y ener- géticas, los otros parámetros (ver Apéndice A). En general esto consti- tuirá o no un problema, dependiendo del método de medición, del rango de reactividades en que se mide, y del sistema a medir.

#### b) Medición de reactividades por el método del periodo asintótico.

Esta técnica consiste en lo siguiente: se lleva al reactor al esta- do crítico, y luego se introduce o quita la parte de la barra de control que se desea medir.

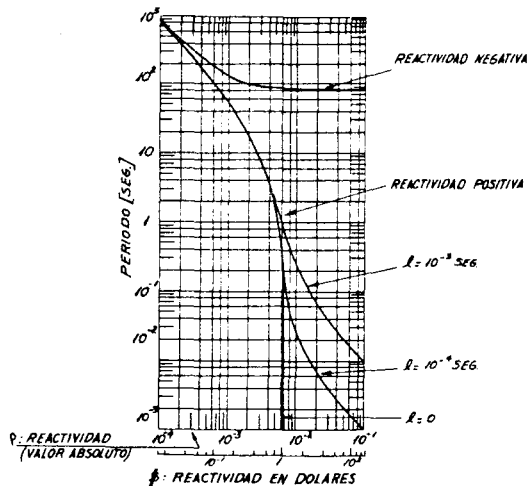
La técnica del período asintótico es en principio, el método más apropiado y confiable para la medición de reactividades, en el sentido que necesita menos hipótesis para su justificación teórica.

El valor del Período es obtenido, ya sea ajustando la componente a- sintótica de la respuesta del reactor, a una perturbación del tipo escalón en la reactividad, según la ec. (35), o midiendo el tiempo de duplicación,  $t_{1/2}$  (o decaimiento a la mitad) de la densidad neutrónica, y que está re- lacionado con el período por  $t_{1/2} = T \cdot \ln 2$ .

La reactividad se calcula por la ec. (36) o ec. (37). En general, se utiliza la ec. (37) por depender únicamente del tipo de combustible, y el primer término de la ec. (36) se calcula como una corrección, siendo esta corrección, generalmente despreciable (ver apéndice B).

Para el caso de un reactor con combustible  $^{235}\text{U}$ , la relación entre el período y la reactividad, para algunos valores de la vida media, tiene la siguiente forma:

FIGURA IV  
Período del Reactor en función  
de la Reactividad



Observamos que para reactividades negativas menores que -0.4\$, el período es prácticamente insensible al valor de la reactividad. Para reactividades positivas mayores que 0.5\$, la reactividad se hace fuertemente dependiente de la vida media del sistema, y por lo cual necesitaríamos determinar mediante otra experiencia este valor.

Deducimos de lo anterior, que en general, el rango de aplicación de este método, está limitado a pequeños valores positivos y negativos de la reactividad.

Este método se lo utiliza para calibrar barras de control fino ( $\sim 0.5\%$ ), pues si se desea calibrar barras de control de gran reactividad (más de 2%), se lo debe hacer de a pedazos, lo cual implica un gran número de experiencias, y que el error se amplifica debido a la propagación de los errores experimentales de cada medición.

Puede ser demostrado (ver referencia [10]) que la ecuación inhour, de la cual se obtiene la justificación teórica de este método, puede ser deducida a partir de la 1ra. hipótesis de la introducción, por lo tanto, esta es su única limitación.

Instrumental requerido: el reactor.

#### c) Medición de reactividades por el método de la fuente.

Está basado en las ec. (24) y (41). Suponiendo que el producto  $A.A^*$  es el mismo en ambos estados del reactor, se obtiene:

$$-\beta \cong \frac{p}{N(0)} \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{\lambda_i} \quad (46)$$

y para el caso de  $U^{235}$

$$-\beta \cong \frac{p}{N(0)} 13.02 \quad (47)$$

Siendo  $p$ ; la pendiente del crecimiento de la población neutrónica en el reactor crítico con una fuente exterior constante.  $N(0)$ : La población neutrónica, en el estado subcrítico a medir, con la misma fuente externa y en la misma posición.

La medición de reactividades subcríticas consiste por lo tanto en dos etapas: 1) Obtención de  $p$ , lo que se puede llamar calibración, pues, una vez que este valor es obtenido la medición posterior es simple; 2) Obtención de  $N(0)$ .

Las limitaciones de este método, son los items (1), (2), (3) y (4) de la introducción.

Instrumental requerido: el reactor.

d) Medición de reactividades por los métodos de "ROD DROP" y "SOURCE JERK"

Están basados en las ec. (32) y (45) que pueden sintetizarse en la siguiente tabla:

TABLA 2  
Métodos de "rod drop" y "Source Jerk"

| METODO   | FORMULA                                                                                                           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Integral | $-\beta = \frac{N(0) \left( \lambda^* + \sum_{i=1}^m \frac{\beta_i}{\lambda_i} \right)}{\int_0^{\infty} N(t) dt}$ |
| Directo  | $-\beta = \frac{N(0)}{N_d} - 1$                                                                                   |

$N_d$  es la población neutrónica cuasi en equilibrio, luego del decaimiento de los neutrones instantáneos.

$\int_0^{\infty} N(t) \cdot dt$ , da la población neutrónica integrada en el tiempo.

El método directo no se recomienda por ser la determinación de  $N_d$  dificultosa. Debido a la forma no ideal de la perturbación, el tiempo real de caída de la barra, o de apagado de la fuente, es mayor que el tiempo real de decaimiento de los neutrones instantáneos. Por lo tanto,  $N_d$  no puede ser determinado por una medición directa. Su evaluación por algún procedimiento de extrapolación, usando los valores de  $N(t)$  registrado para grandes  $t$ , parece ser inapropiado.

En el método de integración, el límite infinito de la integral, es sustituido por un valor finito, para el cual el error sistemático introducido en esta forma, cae por debajo de un valor fijado previamente. Por ejemplo, para reactividades negativas menores que  $-\beta$ , el error es menor que 1% (ver referencia [6]), cuando el tiempo de integración es 300 seg o más.

Las limitaciones de estos métodos son los items (1), (2), (3) y (4) de la introducción.

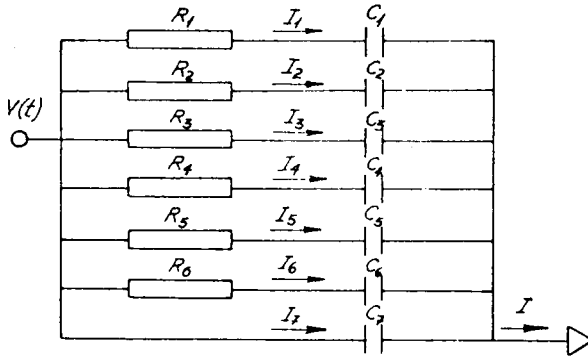
Instrumental requerido: el reactor.

e) Reactímetro.

La base del reactímetro consiste en simular medios multiplicativos, a través de circuitos electrónicos de ciertas características; donde se identifican constantes propias del medio con constantes de estos circuitos.

Esto se realiza mediante la red de Pagel, que consiste esquemáticamente en la siguiente:

FIGURA V  
Esquema de la red de Pagel



Las ecuaciones circuitales son:

$$I(t) = \sum_{j=1}^m I_j(t) \quad (48)$$

$$V(t) = I_j R_j + \frac{1}{C_j} \int_{-\infty}^t I_j(t) dt \quad j=1, \dots, m+1, R_{m+1} = 0 \quad (49)$$

Si suponemos que hasta el instante inicial la tensión  $V(t)$  es constante,

$$V(0) = \frac{Q_j(0)}{C_j} ; Q_j(0)$$

carga en el capacitor  $C_j$  en el instante inicial), y que para  $t > 0$  la tensión varía en el tiempo, las ec. (49) se escriben:

$$V(t) = \frac{I_j}{g_j} + \frac{Q_j(0)}{c_j} + \frac{1}{c_j} \int_0^t I_j(t) dt \quad (50)$$

Siendo  $g_j = 1/R_j$  y  $g = \sum_{j=1}^m g_j$ .

Si hallamos la transformada de Laplace de la ec. (48) y (50) se obtiene:

$$V(s) = \frac{i_j(s)}{g_j} + \frac{V(o)}{s} + \frac{i_j(s)}{C_j s} \quad j=1, \dots, m+1 \quad (51)$$

$$g_{m+1} = \infty$$

$$i(s) = \sum_{j=1}^{m+1} i_j(s) \quad (52)$$

donde:  $v(s) = L \{V(t)\}$  ;  $i_j(s) = L \{I_j(t)\}$  ;  $i(s) = L \{I(t)\}$   
Despejando  $i_j(s)$  en la ec. (51) y sustituyendo en la ec. (52) se obtiene:

$$i(s) = sV(s)g \left[ \sum_{j=1}^m \frac{g_j/g}{s+1/R_j C_j} + \frac{C_{m+1}}{g} \right] - g V(o) \left[ \sum_{j=1}^m \frac{g_j/g}{s+\lambda_j} + \frac{C_{m+1}}{g} \right] \quad (53)$$

Si elegimos convenientemente los valores de las resistencias y de los condensadores, de forma que se cumpla:

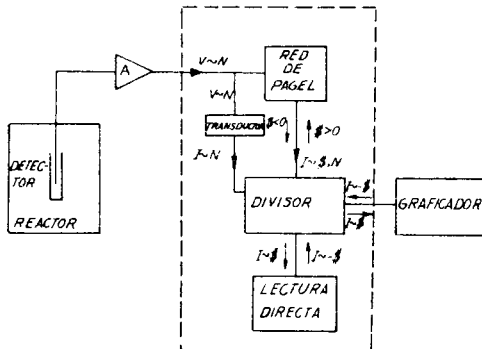
$$\frac{g_j}{g} = b_j, \quad \frac{1}{R_j C_j} = \lambda_j, \quad \frac{C_7}{g} = \Lambda^*, \quad g = 1,$$

la ec. (53) tiene la misma expresión que la ec. (38).

Por lo tanto, si la tensión  $V(t)$  es proporcional a la población neutrónica ( $V(t) = KN(t)$ ), la corriente de salida  $i(s)$  es proporcional al producto  $\$n(s)$ , con la misma constante de proporcionalidad  $K$  (antitransformando,  $I(t) = \$V(t)$ ). De lo anterior se deduce que para la medición de reactividades se requiere un conocimiento "a priori" de los parámetros  $b_j$ ,  $\lambda_j$  y  $\Lambda^*$ .

El diagrama en bloque del reactímetro es el siguiente (ver referencia [11])

FIGURA VI  
Esquema en Bloque del Reactímetro



La cadena de conteo produce una tensión  $V(t)$  proporcional a la densidad neutrónica detectada. La red de Pagel da una corriente que es igual a  $\$V(t)$ . La corriente de salida de la red es dividida por otra cuyo valor es igual a  $V(t)$  con lo que se obtiene en definitiva una indicación de \$, es decir, con este dispositivo se pueden medir reactividades, positivas o negativas indistintamente.

Las limitaciones de este método son los items (1),(2), (3) y (4) de la introducción.

Instrumental requerido: el reactímetro.

#### f) Métodos de fuente pulsada.

##### f-1) Introducción:

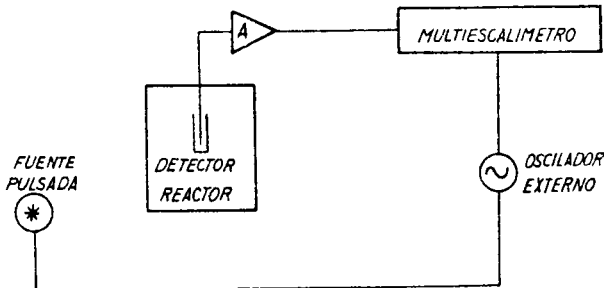
La técnica de fuente de neutrones pulsados, juega un rol importante en la investigación experimental de cinética de reactores. Las principales características de esta técnica son:

- 1) Excitación del proceso cinético sin ningún cambio en la composición material del reactor.
- 2) Posibilidad de medir reactividades hasta estados muy subcríticos.
- 3) Posibilidad de investigación de procesos dependientes de la posición y de la energía, debido a que la excitación ocurre en un lapso pequeño de tiempo.
- 4) Determinación muy precisa de la constante fundamental de decaimiento de los neutrones instantáneos.
- 5) Poseer equipos experimentales caros y complejos.

##### f-2) Esquema experimental.

El diagrama en bloques de estas experiencias es el siguiente:

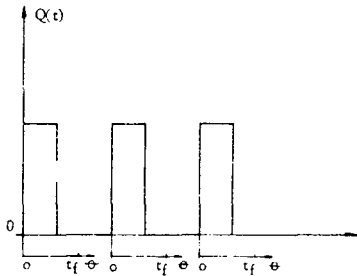
FIGURA VII  
Diagrama en bloques de la experiencia con fuentes pulsadas.



El oscilador externo fija, el período de pulsación  $T$  y también el sincronismo entre el disparo de la fuente, y el ciclo de análisis del multiescalímetro. Este analizará la respuesta del sistema entre el instante en que se inyecta el pulso y un instante  $t_f \leq T$ .

Finalizado el ciclo de análisis, el sistema de detección permanece inactivo, hasta que otro pulso de oscilador comienza un nuevo ciclo, sumándose en la memoria del multiescalímetro, las cuentas que aparecen en el mismo instante respecto del último disparo de la fuente (tiempo del multiescalímetro  $\theta$ ).

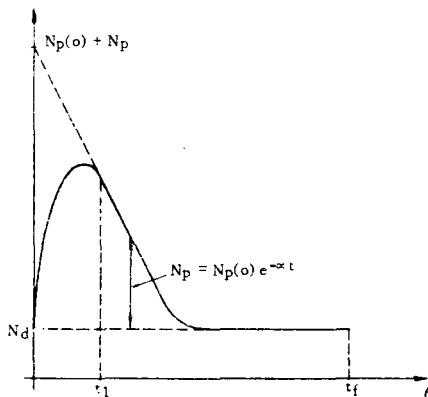
FIGURA VIII  
Esquema de la fuente periódica



Si se elige el período de pulsación  $T$  tal que sea mucho mayor que  $1/\alpha$  y mucho menor que  $1/\gamma_j$  ( $j=1, \dots, m$ ) la población instantánea decae totalmente entre cada pulso neutrónico, y la población retardada luego de un cierto tiempo de pulsación que depende del grado de subcriticidad del sistema, alcanzará un nivel estacionario (ver referencia [12]).

Si comenzamos el ciclo de análisis luego que la población retardada llegó al equilibrio, y cortamos la acumulación de estadística mientras la fuente sigue funcionando (para otra técnica ver referencia [12]), obtendremos lo que se denomina pulso de equilibrio en el multiescalímetro.

FIGURA IX  
Esquema del pulso de equilibrio



El pulso de equilibrio consiste de dos partes bien diferenciadas, un fondo constante ( $N_d$ ) correspondiente a la densidad de neutrones retardados, y una componente variable en el tiempo ( $N_p(t)$ ) causada por el decaimiento de los neutrones instantáneos.

En la población instantánea, luego de un transiente (entre 0 y  $t_1$ ) en que decaen los armónicos superiores, se establece un decaimiento exponencial puro correspondiente al modo fundamental. Ajustando los datos experimentales en esta zona a una exponencial se obtiene  $\alpha$  y  $N_p(0)$ . Del registro en la memoria del multiescalímetro se obtiene  $N_p(0)$  y  $N_d$ . Los enunciados, son los observables que dan lugar a los distintos métodos de medición de reactividades.

#### f-3) Método de Simmons - King:

De la ec. (20), si se mide en criticidad ( $\beta=0$ ), se obtiene

$$\Lambda^* = 1/\alpha_c \quad (54)$$

$\alpha_c$ : módulo de la constante de decaimiento fundamental en criticidad. Suponiendo que  $\Lambda^*$  no varíe entre este estado crítico, y el subcrítico a medir, se puede reemplazar la ec. (54) en la ec. (20) obteniéndose:

$$-\beta = \alpha/\alpha_c - 1 \quad (55)$$

Es decir para medir reactividades por el método de Simmons-King hay que medir la constante de decaimiento de los neutrones instantáneos en criticidad y en el estado subcrítico.

Las limitaciones del método son los items (1) y (4) de la introducción.

Instrumental requerido: Aquellos que puedan medir la constante de decaimiento, por ejemplo fuente pulsada.

#### f-4) Método de Sjöstrand, Gozani y Garelis-Russell.

A partir de las ec. (27) y (28) que dan la respuesta del reactor a una fuente pulsada luego de  $n$  pulsos, pueden obtenerse diversas relaciones entre la reactividad y los observables experimentales ya mencionados, y que da lugar a los métodos de Sjöstrand, Gozani y Garelis-Russell. En general el desarrollo matemático necesario para ello es complejo. El interesado puede consultar la referencia [4].

#### Método de Sjöstrand.

En la ausencia de modos superiores en las componentes, instantánea y retardada de la densidad neutrónica, se obtiene:

$$- \$ = I_p/I_d \quad (56)$$

siendo  $I_p = \int_0^t N_p(\theta) d\theta$  el área de los neutrones instantáneos, y  $I_d = N_d.T$  el área de los neutrones retardados, en el pulso de equilibrio del multiescalímetro.

Limitaciones del método: items (1), (2), (3) de la introducción.

Instrumental requerido: Fuente de neutrones pulsados.

Método de Gozani:

En ausencia de modos superiores en la componente retardada de la distribución neutrónica, se obtiene:

$$- \$ = \frac{d}{T(1 + \frac{2\lambda}{\alpha})} \frac{1 - e^{-\alpha T}}{e\alpha d - 1} \frac{N_p(0)}{N_d} \quad (57)$$

$\bar{\lambda}$  es la constante media de decaimiento de los neutrones retardados que tiene la expresión:

$$\bar{\lambda} = \sum_{i=1}^m b_i \lambda_i$$

Limitaciones del método: Los items (1) y (2) de la introducción ya que es despreciable la influencia de la contaminación armónica en la población retardada (ver referencia [4]).

Instrumental requerido: Fuente de neutrones pulsados.

Método de Garelis-Russell:

Suponiendo que los tiempos entre generaciones reducidos, sean iguales para todos los armónicos, se obtiene:

$$\int_0^T N_p(\theta) (1 - e^{\theta/\Lambda^*}) d\theta = N_d T \quad (58)$$

De la ec. (58) se obtiene el valor de  $\Lambda^*$  que ajusta a los observables experimentales, y la reactividad se obtiene luego de la ec. (20)  $- \$ = \alpha \Lambda^* - 1$ .

Limitaciones del método: Los items (1) y (2) de la introducción ya que para tiempos pequeños luego de inyectado el pulso neutrónico, donde se observa la contribución de los armónicos superiores, el integrando de la ec. (58) es prácticamente nulo, y contribuye poco a la integral.

Instrumental requerido: Fuente de neutrones pulsados.

Los tres métodos tienen las características comunes siguientes: además de los errores sistemáticos que fueron comentados en cada método particular, si la reactividad del estado subcrítico es muy grande, el área retardada se hace pequeña y esto introduce dificultades experimentales para la medición.

Estos métodos no necesitan llevar a crítico al reactor para la medición de reactividades.

# APENDICE A

## FORMULACION RIGUOSA DE LA CINETICA PUNTUAL

Una formulación rigurosa de las ecuaciones de balance neutrónico, consiste en considerar en detalle la dependencia en espacio, tiempo, energía y dirección.

Así el flujo direccional  $\phi(\vec{r}, \vec{v}, t)$  será función de las siete variables  $\vec{r}$ ,  $\vec{v}$  y  $t$ .

Las ecuaciones de transporte de Boltzman que describen la evolución en el reactor del flujo neutrónico son:

$$\begin{aligned} & [\hat{L} + (1 - \beta_T) \chi_p \hat{M}] \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) + \sum_{i=1}^m \chi_i(E) \lambda_i C_i(\vec{r}, t) + S(\vec{r}, \vec{v}, t) = \\ & = V^{-1}(E) \frac{\partial \phi(\vec{r}, \vec{v}, t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (59)$$

$$\beta_i \hat{M} \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) - \lambda_i C_i(\vec{r}, t) = \frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (60)$$

donde:

$$\phi(\vec{r}, \vec{v}, t) = V N(\vec{r}, \vec{v}, t) \quad (61)$$

$N(\vec{r}, \vec{v}, t)$ : densidad neutrónica en el espacio de las fases  $(\vec{r}, \vec{v})$  al tiempo  $t$ ;  
 $C_i(\vec{r}, t)$ : concentración de precursores en el instante  $t$ .

$\hat{L}$ : operador de destrucción:

$$\begin{aligned} \hat{L} \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) = & - \frac{\vec{\nabla}}{V} \cdot \vec{\nabla} \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) - \Sigma_t(\vec{r}, \vec{v}) \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) + \\ & + \int_{\forall \vec{v}^1} \Sigma_s(\vec{r}, \vec{v}^1 \rightarrow \vec{v}) \phi(\vec{r}, \vec{v}^1, t) d\vec{v}^1 \end{aligned} \quad (62)$$

El primer término del lado derecho representa la pérdida neta de neutrones por fuga, en el punto del espacio de las fases  $\vec{r}$ ,  $\vec{v}$ , el segundo representa la pérdida de neutrones por interacción nuclear (fisión, captura, "scattering out", etc), y el tercero representa la ganancia neta de neutrones debido a la dispersión hacia el punto  $\vec{r}$ ,  $\vec{v}$  del espacio de las fases ("scattering in").

$\beta_T$  : fracción de neutrones retardados.

$\beta_i$  : fracción retardada del grupo precursor i-ésimo.

$\chi_p = \chi_p(E)$  : espectro de fisión de los neutrones instantáneos.

$M$  : operador de producción:

$$\hat{M} \phi(\vec{r}, v, t) = \int_{\vec{v}^1} v(E^1) \Sigma_f(\vec{r}, \vec{v}^1) \phi(\vec{r}, \vec{v}^1, t) d\vec{v}^1 \quad (63)$$

representa la producción debido al proceso de fisión.

$\lambda_i$  : constante de decaimiento del grupo precursor i-ésimo.

$\chi_i(E)$  : espectro energético de los neutrones retardados provenientes del grupo precursor i-ésimo.

El tercer término del lado izquierdo de la ec. (59) representa la contribución debido al decaimiento de los precursores. El último término  $S(\vec{r}, \vec{v}, t)$ , es la contribución causada por una fuente exterior.

En la ec. (60), el primer término de la izquierda representa la contribución debido al proceso de fisión en la concentración de precursores, el segundo la pérdida debido al decaimiento de los mismos.

Si multiplicamos escalarmente ambos miembros de las ec. (59) y (60) por una función de peso en principio arbitraria  $W(\vec{r}, \vec{v})$  se obtiene:

$$\begin{aligned} <W(\vec{r}, \vec{v}), (\hat{L} + (1 - \beta_T) \chi_p \hat{M}) \phi(\vec{r}, \vec{v}, t)> + \sum_{i=1}^m \lambda_i <W(\vec{r}, \vec{v}), \chi_i C_i(\vec{r}, t)> + \\ &+ <W(\vec{r}, \vec{v}), S(\vec{r}, \vec{v}, t)> = \frac{d}{dt} <W(\vec{r}, \vec{v}), N(\vec{r}, \vec{v}, t)> \end{aligned} \quad (64)$$

$$<W(\vec{r}, \vec{v}), \chi_i \beta_i \hat{M} \phi(\vec{r}, \vec{v}, t)> - \lambda_i <W(\vec{r}, \vec{v}), \chi_i C_i(\vec{r}, t)> = \frac{d}{dt} <W(\vec{r}, \vec{v}), \chi_i C_i(\vec{r}, t)> \quad (65)$$

donde:

$$<W(\vec{r}, \vec{v}), A(\vec{r}, \vec{v}, t)> = \int_{\vec{r}} d\vec{r} \int_{\vec{v}} W(\vec{r}, \vec{v}) A(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{v} \quad (66)$$

y en la ec. (65) se multiplicó previamente ambos miembros por  $\chi_i(E)$ .

Las ec. (64) y (65) pueden ser llevadas a la ec. de la cinética puntual (5) y (6), mediante las siguientes definiciones:

$$N(t) = \langle W(\vec{r}, \vec{v}), N(\vec{r}, \vec{v}, t) \rangle ; C_i(t) = \langle W(\vec{r}, \vec{v}), \chi_i(E) C_i(\vec{r}, \vec{v}, t) \rangle$$

$$Q(t) = \langle W(\vec{r}, \vec{v}), S(\vec{r}, \vec{v}, t) \rangle$$

$$f_s(E) = (1 - \beta_T) \chi_p(E) + \sum_{i=1}^m \chi_i(E) \beta_i \quad (\text{espectro estático})$$

$$\Lambda = N(t) / \langle W(\vec{r}, \vec{v}), f_s(E) \hat{M}(\vec{r}, \vec{v}, t) \rangle ; \bar{\beta}_i = \langle W(\vec{r}, \vec{v}), \chi_i \beta_i \hat{M}(\vec{r}, \vec{v}, t) \rangle / \langle W, f_s \hat{M} \phi \rangle$$

$$\rho = \langle W, (\hat{L} + f_s \hat{M}) \phi \rangle / \langle W, f_s \hat{M} \phi \rangle ; \bar{\beta} = \sum_{i=1}^m \bar{\beta}_i$$

El término  $\langle W(\vec{r}, \vec{v}), f_s \hat{M} \phi(\vec{r}, \vec{v}, t) \rangle$  representa la producción total de neutrones. Vemos así las ec. que los definen:

$$\Lambda = N(t) / \langle \text{producción} \rangle \text{ y } \rho = \langle \text{Prod.-dest} \rangle / \langle \text{prod} \rangle$$

en total acuerdo con la introducción del capítulo I.

En general  $\bar{\beta}_i$  es mayor que  $\beta_i$  por ser distintos los espectros retardado y estático. Pero el cociente  $\bar{\beta}_i = \frac{\beta_i}{\beta_T}$  se puede aproximar bien por  $\frac{\beta_i}{\beta_T}$  por ser los espectros de los distintos grupos de neutrones retardados parecidos entre sí.

La ecuación puntual deducida será aplicable en la medida que los parámetros que aparecen en ella y definidos previamente, sean constantes en el tiempo para un reactor determinado.

Esto se cumple si:

- 1) La variación temporal de reactor es la misma para cualquier punto del mismo, y para cualquier energía. Matemáticamente significa que  $N(\vec{r}, \vec{v}, t) = N(\vec{r}, \vec{v}) \cdot T(t)$ .
- 2) Las densidades neutrónicas, instantáneas y retardadas tienen la misma distribución espacial.

La función de peso que se elige  $W(\vec{r}, \vec{v})$ , es en general la función importancia (flujo adjunto)  $\psi^*(\vec{r}, \vec{v})$ , pues de esta manera la definición de reactividad que resulta, coincide con la reactividad estática calculable mediante códigos estáticos (ver referencia [7]).

## APENDICE B

### TABLAS DE REACTIVIDAD VS. PERIODO DEL REACTOR.

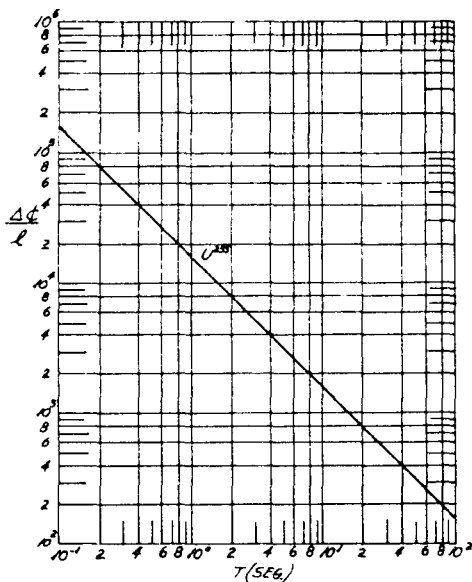
Las tablas siguientes (válidas para  $^{235}\text{U}$ ) fueron calculadas a partir de la ec. (37), utilizando los valores  $b_i$  y  $\lambda_i$  de la tabla 4-8 de la referencia [3].

La tercer columna da el error estadístico por propagación de los errores de  $b_i$  y  $\lambda_i$ . La cuarta columna da el error adicional por el error en la medición del período. Debe multiplicarse por dicho error y sumarse al término anterior.

La figura X da la contribución a la reactividad por el primer termino de la ec. (36). Para obtener este valor dado el período  $T$ , hay que multiplicar el valor  $\Delta\epsilon/\ell$  que se obtiene, por el valor de la vida media  $\ell$  del sistema. Por ser esta contribución pequeña, basta con estimar el valor de la vida media.

FIGURA X

Contribución a la reactividad de los neutrones  
Instantáneos en  $\text{U}^{235}$  (según Ec. (36))



| PERIODO<br>(SEG) | REACTIVIDAD<br>(CENTAVOS) | ERROR<br>(CENTAVOS) | COMPLEMENTO<br>(CENT/SEG) |
|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| 16.0             | 32.0067                   | 0.2218              | 2.3508                    |
| 16.2             | 31.8073                   | 0.2216              | 2.3275                    |
| 16.4             | 31.6109                   | 0.2213              | 2.3047                    |
| 16.6             | 31.4174                   | 0.2211              | 2.2824                    |
| 16.8             | 31.2267                   | 0.2208              | 2.2604                    |
| 17.0             | 31.0389                   | 0.2206              | 2.2390                    |
| 17.2             | 30.8537                   | 0.2204              | 2.2179                    |
| 17.4             | 30.6711                   | 0.2202              | 2.1972                    |
| 17.6             | 30.4912                   | 0.2200              | 2.1770                    |
| 17.8             | 30.3137                   | 0.2198              | 2.1571                    |
| 18.0             | 30.1388                   | 0.2197              | 2.1376                    |
| 18.2             | 29.9662                   | 0.2195              | 2.1184                    |
| 18.4             | 29.7959                   | 0.2194              | 2.0996                    |
| 18.6             | 29.6280                   | 0.2192              | 2.0811                    |
| 18.8             | 29.4623                   | 0.2191              | 2.0630                    |
| 19.0             | 29.2987                   | 0.2189              | 2.0452                    |
| 19.2             | 29.1373                   | 0.2188              | 2.0277                    |
| 19.4             | 28.9780                   | 0.2187              | 2.0105                    |
| 19.6             | 28.8208                   | 0.2186              | 1.9936                    |
| 19.8             | 28.6656                   | 0.2185              | 1.9770                    |
| 20.0             | 28.5123                   | 0.2184              | 1.9607                    |
| 20.2             | 28.3609                   | 0.2183              | 1.9446                    |
| 20.4             | 28.2114                   | 0.2182              | 1.9289                    |
| 20.6             | 28.0638                   | 0.2181              | 1.9133                    |
| 20.8             | 27.9180                   | 0.2181              | 1.8981                    |
| 21.0             | 27.7739                   | 0.2180              | 1.8831                    |
| 21.2             | 27.6315                   | 0.2179              | 1.8683                    |
| 21.4             | 27.4909                   | 0.2179              | 1.8538                    |
| 21.6             | 27.3519                   | 0.2178              | 1.8395                    |
| 21.8             | 27.2146                   | 0.2177              | 1.8254                    |
| 22.0             | 27.0788                   | 0.2177              | 1.8115                    |
| 22.2             | 26.9446                   | 0.2176              | 1.7979                    |
| 22.4             | 26.8120                   | 0.2176              | 1.7845                    |
| 22.6             | 26.6808                   | 0.2176              | 1.7712                    |
| 22.8             | 26.5511                   | 0.2175              | 1.7582                    |

| PERIODO | REACTIVIDAD | ERROR      | COMPLEMENTO |
|---------|-------------|------------|-------------|
| (SEG)   | (CENTAVOS)  | (CENTAVOS) | (CENT/SEG)  |
| 23.0    | 26.4229     | 0.2175     | 1.7454      |
| 23.2    | 26.2961     | 0.2175     | 1.7327      |
| 23.4    | 26.1707     | 0.2174     | 1.7203      |
| 23.6    | 26.0467     | 0.2174     | 1.7080      |
| 23.8    | 25.9241     | 0.2174     | 1.6959      |
| 24.0    | 25.8027     | 0.2174     | 1.6840      |
| 24.2    | 25.6827     | 0.2173     | 1.6723      |
| 24.4    | 25.5639     | 0.2173     | 1.6607      |
| 24.6    | 25.4454     | 0.2173     | 1.6493      |
| 24.8    | 25.3281     | 0.2173     | 1.6380      |
| 25.0    | 25.2130     | 0.2173     | 1.6269      |
| 25.2    | 25.1011     | 0.2173     | 1.6160      |
| 25.4    | 24.9894     | 0.2173     | 1.6052      |
| 25.6    | 24.8769     | 0.2173     | 1.5945      |
| 25.8    | 24.7654     | 0.2173     | 1.5840      |
| 26.0    | 24.6571     | 0.2173     | 1.5736      |
| 26.2    | 24.5489     | 0.2173     | 1.5634      |
| 26.4    | 24.4417     | 0.2173     | 1.5533      |
| 26.6    | 24.3356     | 0.2173     | 1.5434      |
| 26.8    | 24.2306     | 0.2173     | 1.5336      |
| 27.0    | 24.1266     | 0.2173     | 1.5239      |
| 27.2    | 24.0235     | 0.2173     | 1.5143      |
| 27.4    | 23.9215     | 0.2173     | 1.5048      |
| 27.6    | 23.8205     | 0.2173     | 1.4955      |
| 27.8    | 23.7204     | 0.2173     | 1.4863      |
| 28.0    | 23.6212     | 0.2173     | 1.4772      |
| 28.2    | 23.5230     | 0.2173     | 1.4682      |
| 28.4    | 23.4257     | 0.2173     | 1.4593      |
| 28.6    | 23.3293     | 0.2174     | 1.4506      |
| 28.8    | 23.2338     | 0.2174     | 1.4419      |
| 29.0    | 23.1392     | 0.2174     | 1.4334      |
| 29.2    | 23.0454     | 0.2174     | 1.4249      |
| 29.4    | 22.9525     | 0.2174     | 1.4166      |
| 29.6    | 22.8604     | 0.2174     | 1.4083      |
| 29.8    | 22.7692     | 0.2175     | 1.4002      |

| PERIODO<br>(SEG) | REACTIVIDAD<br>(CENTAVOS) | ERROR<br>(CENTAVOS) | COMPLEMENTO<br>(CENT/SEG) |
|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| 30.0             | 22.6787                   | 0.2175              | 1.3921                    |
| 30.2             | 22.5891                   | 0.2175              | 1.3842                    |
| 30.4             | 22.5002                   | 0.2175              | 1.3763                    |
| 30.6             | 22.4122                   | 0.2176              | 1.3685                    |
| 30.8             | 22.3249                   | 0.2176              | 1.3609                    |
| 31.0             | 22.2383                   | 0.2176              | 1.3533                    |
| 31.2             | 22.1525                   | 0.2176              | 1.3458                    |
| 31.4             | 22.0674                   | 0.2176              | 1.3383                    |
| 31.6             | 21.9831                   | 0.2177              | 1.3310                    |
| 31.8             | 21.8995                   | 0.2177              | 1.3237                    |
| 32.0             | 21.8165                   | 0.2177              | 1.3166                    |
| 32.2             | 21.7343                   | 0.2177              | 1.3095                    |
| 32.4             | 21.6527                   | 0.2178              | 1.3024                    |
| 32.6             | 21.5719                   | 0.2178              | 1.2955                    |
| 32.8             | 21.4917                   | 0.2178              | 1.2886                    |
| 33.0             | 21.4121                   | 0.2179              | 1.2818                    |
| 33.2             | 21.3332                   | 0.2179              | 1.2751                    |
| 33.4             | 21.2550                   | 0.2179              | 1.2685                    |
| 33.6             | 21.1774                   | 0.2179              | 1.2619                    |
| 33.8             | 21.1004                   | 0.2180              | 1.2554                    |
| 34.0             | 21.0240                   | 0.2180              | 1.2489                    |
| 34.2             | 20.9482                   | 0.2180              | 1.2426                    |
| 34.4             | 20.8731                   | 0.2181              | 1.2362                    |
| 34.6             | 20.7985                   | 0.2181              | 1.2300                    |
| 34.8             | 20.7245                   | 0.2181              | 1.2238                    |
| 35.0             | 20.6511                   | 0.2181              | 1.2177                    |
| 35.2             | 20.5782                   | 0.2182              | 1.2117                    |
| 35.4             | 20.5059                   | 0.2182              | 1.2057                    |
| 35.6             | 20.4342                   | 0.2182              | 1.1997                    |
| 35.8             | 20.3630                   | 0.2183              | 1.1939                    |
| 36.0             | 20.2924                   | 0.2183              | 1.1881                    |
| 36.2             | 20.2223                   | 0.2183              | 1.1823                    |
| 36.4             | 20.1527                   | 0.2184              | 1.1766                    |
| 36.6             | 20.0837                   | 0.2184              | 1.1710                    |
| 36.8             | 20.0152                   | 0.2184              | 1.1654                    |

| PERIODO<br>(SEG) | REACTIVIDAD<br>(CENTAVOS) | ERROR<br>(CENTAVOS) | COMPLEMENTO<br>(CENT/SEG) |
|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| 37.0             | 19.9472                   | 0.2185              | 1.1598                    |
| 37.2             | 19.8796                   | 0.2185              | 1.1544                    |
| 37.4             | 19.8126                   | 0.2185              | 1.1489                    |
| 37.6             | 19.7461                   | 0.2186              | 1.1436                    |
| 37.8             | 19.6801                   | 0.2186              | 1.1382                    |
| 38.0             | 19.6145                   | 0.2186              | 1.1330                    |
| 38.2             | 19.5494                   | 0.2187              | 1.1277                    |
| 38.4             | 19.4848                   | 0.2187              | 1.1226                    |
| 38.6             | 19.4217                   | 0.2187              | 1.1174                    |
| 38.8             | 19.3570                   | 0.2188              | 1.1123                    |
| 39.0             | 19.2938                   | 0.2188              | 1.1073                    |
| 39.2             | 19.2310                   | 0.2188              | 1.1023                    |
| 39.4             | 19.1656                   | 0.2189              | 1.0974                    |
| 39.6             | 19.1067                   | 0.2189              | 1.0925                    |
| 39.8             | 19.0452                   | 0.2189              | 1.0876                    |
| 40.0             | 18.9842                   | 0.2190              | 1.0828                    |
| 40.2             | 18.9236                   | 0.2190              | 1.0781                    |
| 40.4             | 18.8634                   | 0.2190              | 1.0734                    |
| 40.6             | 18.8036                   | 0.2191              | 1.0687                    |
| 40.8             | 18.7442                   | 0.2191              | 1.0640                    |
| 41.0             | 18.6853                   | 0.2191              | 1.0594                    |
| 41.2             | 18.6267                   | 0.2192              | 1.0549                    |
| 41.4             | 18.5685                   | 0.2192              | 1.0504                    |
| 41.6             | 18.5107                   | 0.2192              | 1.0459                    |
| 41.8             | 18.4533                   | 0.2193              | 1.0415                    |
| 42.0             | 18.3953                   | 0.2193              | 1.0371                    |
| 42.2             | 18.3397                   | 0.2193              | 1.0327                    |
| 42.4             | 18.2835                   | 0.2194              | 1.0284                    |
| 42.6             | 18.2276                   | 0.2194              | 1.0241                    |
| 42.8             | 18.1721                   | 0.2194              | 1.0198                    |
| 43.0             | 18.1159                   | 0.2195              | 1.0156                    |
| 43.2             | 18.0621                   | 0.2195              | 1.0114                    |
| 43.4             | 18.0077                   | 0.2195              | 1.0073                    |
| 43.6             | 17.9536                   | 0.2196              | 1.0032                    |
| 43.8             | 17.8999                   | 0.2196              | 0.9991                    |

| PERIODO<br>(SEG) | REACTIVIDAD<br>(CENTAVOS) | EPROR<br>(CENTAVOS) | COMPLEMENTO<br>(CENT/SEG) |
|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| 44.0             | 17.8465                   | 0.2196              | 0.9951                    |
| 44.2             | 17.7935                   | 0.2197              | 0.9910                    |
| 44.4             | 17.7408                   | 0.2197              | 0.9871                    |
| 44.6             | 17.6884                   | 0.2197              | 0.9831                    |
| 44.8             | 17.6363                   | 0.2198              | 0.9792                    |
| 45.0             | 17.5846                   | 0.2198              | 0.9753                    |
| 45.2             | 17.5333                   | 0.2198              | 0.9715                    |
| 45.4             | 17.4822                   | 0.2199              | 0.9677                    |
| 45.6             | 17.4314                   | 0.2199              | 0.9639                    |
| 45.8             | 17.3810                   | 0.2199              | 0.9601                    |
| 46.0             | 17.3309                   | 0.2200              | 0.9564                    |
| 46.2             | 17.2811                   | 0.2200              | 0.9527                    |
| 46.4             | 17.2316                   | 0.2200              | 0.9490                    |
| 46.6             | 17.1824                   | 0.2201              | 0.9454                    |
| 46.8             | 17.1335                   | 0.2201              | 0.9418                    |
| 47.0             | 17.0849                   | 0.2201              | 0.9382                    |
| 47.2             | 17.0366                   | 0.2201              | 0.9346                    |
| 47.4             | 16.9886                   | 0.2202              | 0.9311                    |
| 47.6             | 16.9409                   | 0.2202              | 0.9276                    |
| 47.8             | 16.8934                   | 0.2202              | 0.9241                    |
| 48.0             | 16.8463                   | 0.2203              | 0.9207                    |
| 48.2             | 16.7994                   | 0.2203              | 0.9172                    |
| 48.4             | 16.7528                   | 0.2203              | 0.9138                    |
| 48.6             | 16.7065                   | 0.2204              | 0.9105                    |
| 48.8             | 16.6604                   | 0.2204              | 0.9071                    |
| 49.0             | 16.6146                   | 0.2204              | 0.9038                    |
| 49.2             | 16.5691                   | 0.2205              | 0.9005                    |
| 49.4             | 16.5239                   | 0.2205              | 0.8972                    |
| 49.6             | 16.4789                   | 0.2205              | 0.8940                    |
| 49.8             | 16.4342                   | 0.2206              | 0.8908                    |
| 50.0             | 16.3897                   | 0.2206              | 0.8876                    |
| 50.2             | 16.3455                   | 0.2206              | 0.8844                    |
| 50.4             | 16.3016                   | 0.2207              | 0.8812                    |
| 50.6             | 16.2579                   | 0.2207              | 0.8781                    |
| 50.8             | 16.2144                   | 0.2207              | 0.8750                    |

| PERIODO<br>(SEG) | REACTIVIDAD<br>(CENTAVOS) | ERROR<br>(CENTAVOS) | COMPLEMENTO<br>(CENT/SEG) |
|------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|
| -90.0            | -44.8214                  | 2.7084              | 0.7457                    |
| -95.0            | -33.6876                  | 2.6248              | 0.6567                    |
| -100.0           | -27.8457                  | 2.5858              | 0.6032                    |
| -105.0           | -24.1106                  | 2.5512              | 0.5629                    |
| -110.0           | -21.4490                  | 2.5432              | 0.5294                    |
| -115.0           | -19.4219                  | 2.5290              | 0.5010                    |
| -120.0           | -17.8073                  | 2.5173              | 0.4759                    |
| -125.0           | -16.4806                  | 2.5073              | 0.4534                    |
| -130.0           | -15.3626                  | 2.4986              | 0.4332                    |
| -135.0           | -14.4047                  | 2.4910              | 0.4149                    |
| -140.0           | -13.5716                  | 2.4843              | 0.3981                    |
| -145.0           | -12.8385                  | 2.4782              | 0.3827                    |
| -150.0           | -12.1871                  | 2.4727              | 0.3684                    |
| -155.0           | -11.6036                  | 2.4677              | 0.3553                    |
| -160.0           | -11.0771                  | 2.4632              | 0.3431                    |
| -165.0           | -10.5993                  | 2.4590              | 0.3317                    |
| -170.0           | -10.1633                  | 2.4552              | 0.3210                    |
| -175.0           | -9.7636                   | 2.4516              | 0.3111                    |
| -180.0           | -9.3956                   | 2.4483              | 0.3017                    |
| -185.0           | -9.0555                   | 2.4452              | 0.2929                    |
| -190.0           | -8.7402                   | 2.4423              | 0.2846                    |
| -195.0           | -8.4458                   | 2.4397              | 0.2768                    |
| -200.0           | -8.1733                   | 2.4371              | 0.2694                    |
| -205.0           | -7.9174                   | 2.4348              | 0.2624                    |
| -210.0           | -7.6775                   | 2.4325              | 0.2557                    |
| -215.0           | -7.4522                   | 2.4304              | 0.2494                    |
| -220.0           | -7.2400                   | 2.4284              | 0.2434                    |
| -225.0           | -7.0399                   | 2.4266              | 0.2376                    |
| -230.0           | -6.8508                   | 2.4248              | 0.2322                    |
| -235.0           | -6.6718                   | 2.4231              | 0.2270                    |
| -240.0           | -6.5021                   | 2.4215              | 0.2220                    |
| -245.0           | -6.3410                   | 2.4200              | 0.2172                    |
| -250.0           | -6.1879                   | 2.4185              | 0.2126                    |
| -255.0           | -6.0421                   | 2.4171              | 0.2083                    |
| -260.0           | -5.9031                   | 2.4158              | 0.2041                    |

## REFERENCIAS

- [1] HILDE BRAND F.B., Método de Cálculo para Ingenieros, Aguilar, Madrid, 1960.
- [2] SPIEGEL, LAPLACE Transforms, Mc. Graw Hill
- [3] KEEPIN G.R., Physics of Nuclear Kinetics, Addison-Wesley 1965.
- [4] GOZANI T., The Theory of the Modified pulsed Source Technique. Eir - Bericht N° 79, Wurenlingen, April 1965.
- [5] LAMARSH, J.R., Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison Wesley, 1966.
- [6] KINETICS Noise Analysis of Zero-Power Reactor, Technical Reports 138, IAEA, Viena, 1972.
- [7] PRESKIT, C.A. Et. al. Nucl. Sci. Eng. 29, 283 (1967).
- [8] DIFILIPPO F.C., "Medición de Reactividades Mediante la Técnica de Neutrones pulsados. Los errores Sistemáticos que introduce la Distorsión Cinética". CNEA Re-74.
- [9] DIFILIPPO F.C., PIERONI N.B., VIÑEZ J.C., "Measurements of Spatially Independent Reactivity in Pulsed-Neutron Experiments", Nucl. Sci. Eng. 51, 3 (1973).
- [10] GOZANI, T., "Consistent Subcritical Fast Reactor Kinetics", Dynamics of Nuclear Systems, p 109, University of Arizona Press, Tucson (1972).
- [11] DALL'OSTO F.F., PERL H., VIÑEZ J.C., "Mediciones con un Reactímetro". CNEA Re-51.
- [12] GARELIS E., "Theory of Pulsing Techniques", Nucl. Sci. Eng. 18. 242 (1964).

## I N D I C E

|                                                                     | Pag. |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| CAPITULO I: Ecuación cinética puntual.....                          | 3    |
| a) Introducción .....                                               | 3    |
| b) Ec. de la cinética puntual.....                                  | 4    |
| CAPITULO II: Solución de las Ecuaciones de la Cinética Puntual..... | 6    |
| a) Problema A: Reactividad constante.....                           | 6    |
| b) Problema B: Reactividad Variable en el tiempo.....               | 15   |
| CAPITULO III: Métodos Experimentales.....                           | 16   |
| a) Introducción.....                                                | 16   |
| b) Método del Período Asintótico.....                               | 17   |
| c) Método de la Fuente.....                                         | 18   |
| d) Métodos de "Rod Drop" y Source Jerk".....                        | 19   |
| e) Reactímetro.....                                                 | 19   |
| f) Métodos de fuente pulsada.....                                   | 22   |
| APENDICE A: Formulación Rigurosa de la Cinética Puntual.....        | 27   |
| APENDICE B: Tablas de reactividad vs. Período Asintótico.....       | 30   |
| REFERENCIAS .....                                                   | 37   |

Impreso en CNEA  
Enero 1975