

**J. E. N. 418**

Sp ISSN 0081-3397

**DETERMINACION DEL TERMINO FUENTE  
A PARTIR DE MEDIDAS  
DE MULTIPLICACION SUBCRITICA EN EL  
REACTOR CORAL-I.**

por

Blazquez Martinez, J.B.

Barrado Menendez, J.M.

**JUNTA DE ENERGIA NUCLEAR**

**MADRID, 1978**

CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES

E36

NEUTRON SOURCES

REACTOR KINETICS EQUATIONS

CORAL-I REACTOR

CRITICALITY

REACTIVITY

NEUTRON IMPORTANCE FUNCTION

REACTOR KINETICS

CONTROL ELEMENTS

MULTIPLICATION FACTORS

DEAD TIME

RADIATION DETECTORS

MEASUREMENTS

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Documentación Biblioteca y Publicaciones, Junta de Energía Nuclear, Ciudad Universitaria, Madrid-3, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del INIS para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. Para más detalles consúltese el informe IAEA-INIS-12 (INIS: Manual de Indización) y IAEA-INIS-13 (INIS: Thesaurus) publicado por el Organismo Internacional de Energía Atómica.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Este trabajo se ha recibido para su impresión en Marzo de 1978.

Agradecemos al Dr. F. Verdaguer Hernández y al Dr. E. Rodríguez Máyquez la dirección del trabajo, así como su participación en la interpretación de los resultados.

INDICE.

	Pag.
Introducción .....	1
Fundamento teórico .....	3
Método experimental .....	6
Aplicaciones .....	14
Reactor crítico con fuente. Importancia neutrónica ..	18
Resumen y conclusiones .....	22
Bibliografía .....	24
Apéndice .....	25

## INTRODUCCION.

En el reactor rápido experimental de potencia cero, CORAL-I, son frecuentes los cambios de configuración, tales como inserción de muestras en el interior del reactor, creación de huecos, variaciones de la carga del núcleo, etc.

Es una norma obligatoria de seguridad, en la explotación del reactor, la estima de la variación de la reactividad, correspondiente al cambio de configuración, antes de volver a poner el reactor en estado justamente crítico. El procedimiento más sencillo y fiable, para cumplir la norma anterior, es medir la variación de reactividad en estado subcrítico. Para ello es necesario conocer el término fuente  $S$ , que aparece en las ecuaciones de la cinética puntual.

En este trabajo se detallan dos procedimientos independientes para la medida del término fuente. En uno de ellos, el reactor se encuentra en estado subcrítico, y se hace uso de la calibración en reactividad de las barras de control. En el otro procedimiento, desde el estado subcrítico, se aproxima el reactor al estado justamente crítico con fuente. En este caso la población neutrónica del reactor aumenta linealmente con el tiempo, y de la medida de la pendiente se deduce el valor del término fuente.

Además de la medida de reactividad en régimen subcrítico, el conocimiento del término fuente se ha aplicado a la elaboración de un método de medida que suministra simultáneamente el tiempo muerto del sistema de detección de neutrones, y el importe en reactividad del material que constituye la fuente.

Con objeto de comprobar la bondad de los métodos teóricos de cálculo, aplicables a un reactor, tal como el CORAL-I, donde las fugas neutrónicas son un fenómeno dominante, se ha relacionado el término fuente medido, con la función importancia de los neutrones de la fuente. En el caso en que el espectro de energía de los neutrones de la fuente fuera parecido al de los neutrones de fisión, tal como sucede en el caso de una fuente de  $C_f^{252}$ , se dispondría de un método para la medida de la forma del flujo adjunto del reactor.

Por el uso extensivo del método de los mínimos cuadrados para el tratamiento de las medidas, se incluye al final del trabajo, un apéndice sobre el criterio empleado en la asignación de pesos a las medidas.

## 1. FUNDAMENTO TEORICO.

Las ecuaciones de la cinética puntual son:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(1-\bar{r}\beta) - 1}{\ell} n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i \gamma_i C_i + \gamma_s S$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k\beta_i}{\ell} n - \lambda_i C_i ; \quad i=1, \dots, 6$$

En donde  $n(t)$  es el número de neutrones presentes en el reactor en el instante  $t$ ,  $\bar{r}\beta$  la fracción efectiva de neutrones retardados,  $\ell$  la vida media de los neutrones instantáneos. Para el grupo  $i$ -ésimo de neutrones retardados,  $C_i(t)$  es el número de núcleos precursores en el instante  $t$ ,  $\lambda_i$  la constante de desintegración de estos núcleos y  $\beta_i$  la fracción de neutrones retardados en este grupo;  $\gamma_i$  la eficiencia relativa, o importancia, de los neutrones retardados del grupo  $i$  frente a los neutrones instantáneos, y por fin,  $\gamma_s$  es la importancia relativa de los neutrones de la fuente  $S$ .

Es bien sabido que en el caso de un reactor en estado subcrítico y con fuente de intensidad constante, tanto  $n(t)$  como  $C_i(t)$ , alcanzan el régimen estacionario. En estas condiciones:

$$\frac{dn}{dt} = 0 , \quad \frac{dC_i}{dt} = 0 ; \quad i=1, \dots, 6 ; \quad \text{y de}$$

las ecuaciones de la cinética resulta:

$$\frac{k\beta_i}{\ell} n = \lambda_i C_i$$

$$\text{ó bien} \quad \sum_{i=1}^6 \gamma_i \lambda_i C_i = \sum_{i=1}^6 \frac{k\gamma_i\beta_i}{\ell} n$$

Teniendo en cuenta que :

$$\bar{r}\beta = \sum_{i=1}^6 \gamma_i \beta_i$$



puede eliminarse de la primera de las ecuaciones de la cinética, el término de los neutrones retardados  $\sum_i \lambda_i \tau_i C_i$ , resultando:

$$0 = \frac{k-1}{\ell} M + \gamma_s S$$

de donde: 
$$\frac{M}{\ell} = (\gamma_s S) \left( \frac{1}{1-k} \right)$$

Recordando que  $n$  es el número de neutrones presentes en el reactor durante una generación que por término medio dura  $\ell$  segundos, se deduce que  $M/\ell$  es el número de neutrones que ha habido en el reactor al cabo de un segundo; por ello, cabe interpretar que  $M/\ell$  es el ritmo de destrucción de neutrones, y como se está suponiendo que el reactor se encuentra en régimen estacionario, - forzosamente,  $\gamma_s S / (1-k)$  será el ritmo de creación de neutrones.

El presente trabajo está orientado hacia la determinación del término fuente  $\gamma_s S$ , basándose en la ecuación anterior; y suponiendo que se trata de una fuente puntual.

Si  $\epsilon_D$  es la probabilidad de que un neutrón del reactor sea contado por un detector de neutrones, situado en las cercanías del reactor, y  $N$  es la medida de dicho detector en (c./sg.), resulta:

$$N = \epsilon_D \frac{M}{\ell}$$

por tanto:

$$N = \epsilon_D \gamma_s S (1-k)^{-1} \tag{1-1}$$

Haciendo  $\bar{S} = \epsilon_D \cdot \gamma_s S$ , se tiene:

$$N = \frac{\bar{S}}{1-k} \tag{1-2}$$

Esta expresión se utilizará en adelante como base para la determinación de  $\bar{S}$ . Conviene advertir sin embargo, que (1-2) no se utilice para la interpretación física de  $\bar{S}$ , pues ello puede conducir a conclusiones erróneas. En efecto, a la vista de (1-2) parece natural interpretar  $\bar{S}$  como la medida de un detector cuando

$K = 0$  ; esto es, en un medio no multiplicativo, pero con las mismas propiedades dispersivas que el reactor. En esta interpretación no se ha tenido en cuenta la posible variación de la eficiencia de detección  $\epsilon_D$  en este medio hipotético. Este hecho es debido a que el espectro energético de los neutrones de la fuente es distinto en general del espectro de los neutrones del reactor, y también debido a que, en el caso de que  $K = 0$  , el lugar donde existe la máxima concentración de neutrones es precisamente en el punto donde está la fuente, mientras que en el reactor, donde  $K < 1$  , la máxima concentración se encuentra normalmente en el núcleo.

Los razonamientos anteriores conducen a que para determinar e interpretar  $\bar{S}$ , el reactor debe encontrarse en estado subcrítico, pero próximo a la criticidad. En este caso, la ecuación (1-1) puede ponerse en la forma

$$N = \gamma_S S \left( \frac{\epsilon_0}{1-K} \right)$$

donde se hace énfasis que como  $K < 1$  , la gran mayoría de los neutrones detectados no provienen de la fuente, siendo entonces  $\epsilon_0$  una constante independiente de la fuente. Como S también es constante, resulta que  $\bar{S}$  es proporcional a  $\gamma_S$  , o sea:

$$\bar{S} = (\epsilon_0 S) \gamma_S$$

de forma que  $\bar{S}$  puede considerarse en estas condiciones como una medida de la forma de la función importancia neutrónica de los neutrones de la fuente.

## 2. METODO EXPERIMENTAL.

El método para la determinación experimental del término fuente  $\bar{S}$ , se ha puesto a punto en el reactor rápido experimental de potencia cero, CORAL-I, cuyas características vienen descritas en la referencia 1.

Para el cálculo de  $\bar{S}$  se emplea la expresión (1-2);

$$\bar{N} = \frac{\bar{S}}{1-K}$$

mientras que para su interpretación, con respecto a la función importancia neutrónica, se ha empleado la definición:

$$\bar{S} = (\epsilon_D S) \gamma_s$$

El montaje experimental debe pues, asegurar la constancia de  $\epsilon_D$  y de S. En este trabajo se ha utilizado la fuente de neutrones de arranque del reactor, de AmBe, de intensidad  $S = 8.3 \times 10^6$  n/s. Las razones que justifican su uso son:

- a) La intensidad es constante.
- b) El sistema de entrada de la fuente, junto al núcleo del reactor, asegura la reproductibilidad de posición.

Los inconvenientes encontrados han sido:

- a) El espectro energético de los neutrones de la fuente no coincide con el del reactor, de manera que la medida de  $\bar{S}$  suministrará la importancia de los neutrones de la fuente en el reactor.
- b) La fuente, aunque pequeña, no es puntual. Al colocar junto al núcleo el material que constituye la fuente, resulta una pequeña variación de reactividad que hay que acarrear en todas las medidas.

Para asegurarse de la constancia de  $\epsilon_D$ , hay que efectuar las medidas en un estado subcrítico de gran multiplicación; esto es, en las proximidades de la criticidad. En estas condiciones, la gran mayoría de los neutrones contados por el detector, provendrán del reactor y no de la fuente, de manera que puede considerarse que  $\epsilon_D$  es independiente del espectro, intensidad y posición de la fuente.

En este trabajo, las medidas se han llevado a cabo, en el rango:

$$0.99 \leq K \leq 1 \quad (2-1)$$

garantizando de esta forma la constancia de  $\epsilon_D$ .

#### Caracterización del estado subcrítico.

El estado subcrítico del reactor está caracterizado por la posición de las dos barras de control. El exceso de reactividad de las dos barras juntas es algo inferior a un dólar, de forma que siempre se cumple la condición (2-1).

Si a la posición de barras  $i$  le corresponde el valor  $\delta K_i$ , y se denota:

$$(\delta K)_i = K_i - 1 \quad ; \quad \delta K < 0$$

y a la variación de reactividad introducida por la fuente como  $(\delta K)_F$ , la ecuación (1-2) tiene la forma:

$$N_i = \frac{\bar{S}}{-(\delta K)_i + (\delta K)_F} \quad (2-2)$$

donde  $N_i$  es la medida del detector, en cuentas/segundo, cuando las barras de control están en la posición  $i$ .

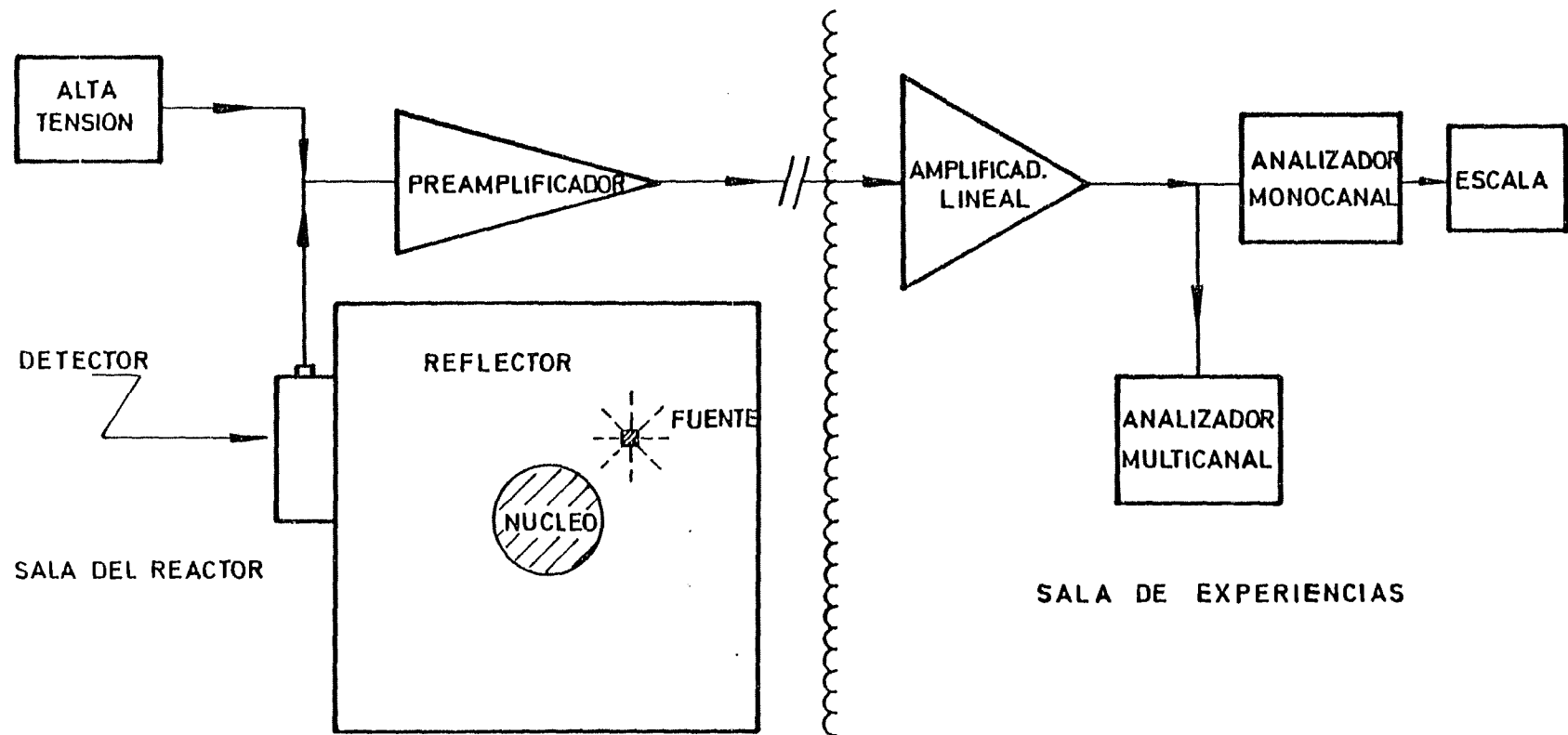


Fig.1... Esquema experimental y posición del detector en el reactor

### Medida del detector.

El detector de neutrones utilizado ha sido el contador proporcional de  $F_3B$ , que pertenece a la Lógica de Seguridad del reactor. Los motivos que justifican la decisión son:

- a) Tanto la interpretación de la medida como la discriminación  $\alpha$ - $\gamma$  son sencillas.
- b) El tiempo muerto es pequeño (inferior a  $5 \mu s$ ).
- c) Se puede garantizar la reproductibilidad de posición.

La posición del contador en el reactor viene esquematizada en la figura 1. La discriminación  $\alpha$ - $\gamma$  se efectúa con un analizador monocanal, pues los impulsos de mayor amplitud son debidos a los neutrones principalmente. El umbral de discriminación se fija con ayuda de un analizador multicanal; exactamente en el valle del espectro de amplitudes. Una vez conseguida la discriminación  $\alpha$ - $\gamma$ , el analizador multicanal se emplea sólo a efectos de control de la estabilidad de la amplificación total del sistema electrónico.

La medida debe corregirse por efecto del tiempo muerto.

### Parametrización.

Dado que las formas lineales resultan más fáciles de procesar, la expresión (2-2) puede ponerse en la forma

$$-(\delta k)_i = -(\Delta k)_F + \bar{S} \frac{1}{N_i} \quad (2-3)$$

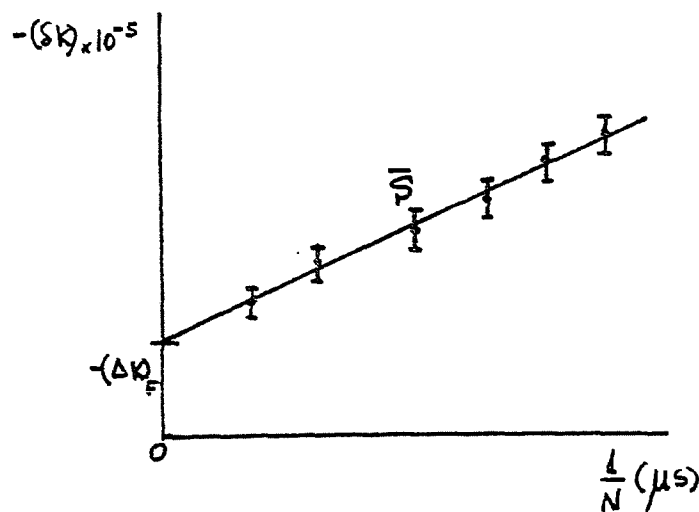
donde las incógnitas son  $(\Delta k)_F$  y  $\bar{S}$ .

Basta con variar la posición de una barra de control para obtener diversas configuraciones subcríticas en el reactor, ca

da una de ellas caracterizada por un valor conocido  $(SK)_i$ ; si se mide  $N_i$  en cada configuración, se puede proceder a minimizar la expresión:

$$Q_2 = \sum_{i=1}^m p_i \left[ -(SK)_i + (\Delta K)_F - \bar{S} \cdot \frac{1}{N_i} \right]^2 \quad (2-4)$$

donde  $m$  es el número de configuraciones subcríticas y  $p_i$  el peso asignado a cada medida.



En el apéndice se detallan los criterios de elección de los pesos  $p_i$ .

De la minimización de  $Q_2$  se obtienen  $\bar{S}$  y  $(\Delta K)_F$  con sus errores correspondientes.

Si  $(\Delta K)_F$  es negativo, entonces aumenta el factor de multiplicación

$$\frac{1}{-(SK)_i + (\Delta K)_F}$$

para cualquier configuración  $i$ , de manera que el reactor se encuentra más cerca al estado crítico por el hecho de haber introducido el material que forma la fuente. En ese sentido se dice que la fuente importa una variación de reactividad positiva en el reactor. Evidentemente, la interpretación es exactamente la contraria en caso de que  $(\Delta K)_F$  fuera positivo.

Dada la interpretación física de  $\bar{S}$ , el signo de la pendiente ha de ser positivo necesariamente.

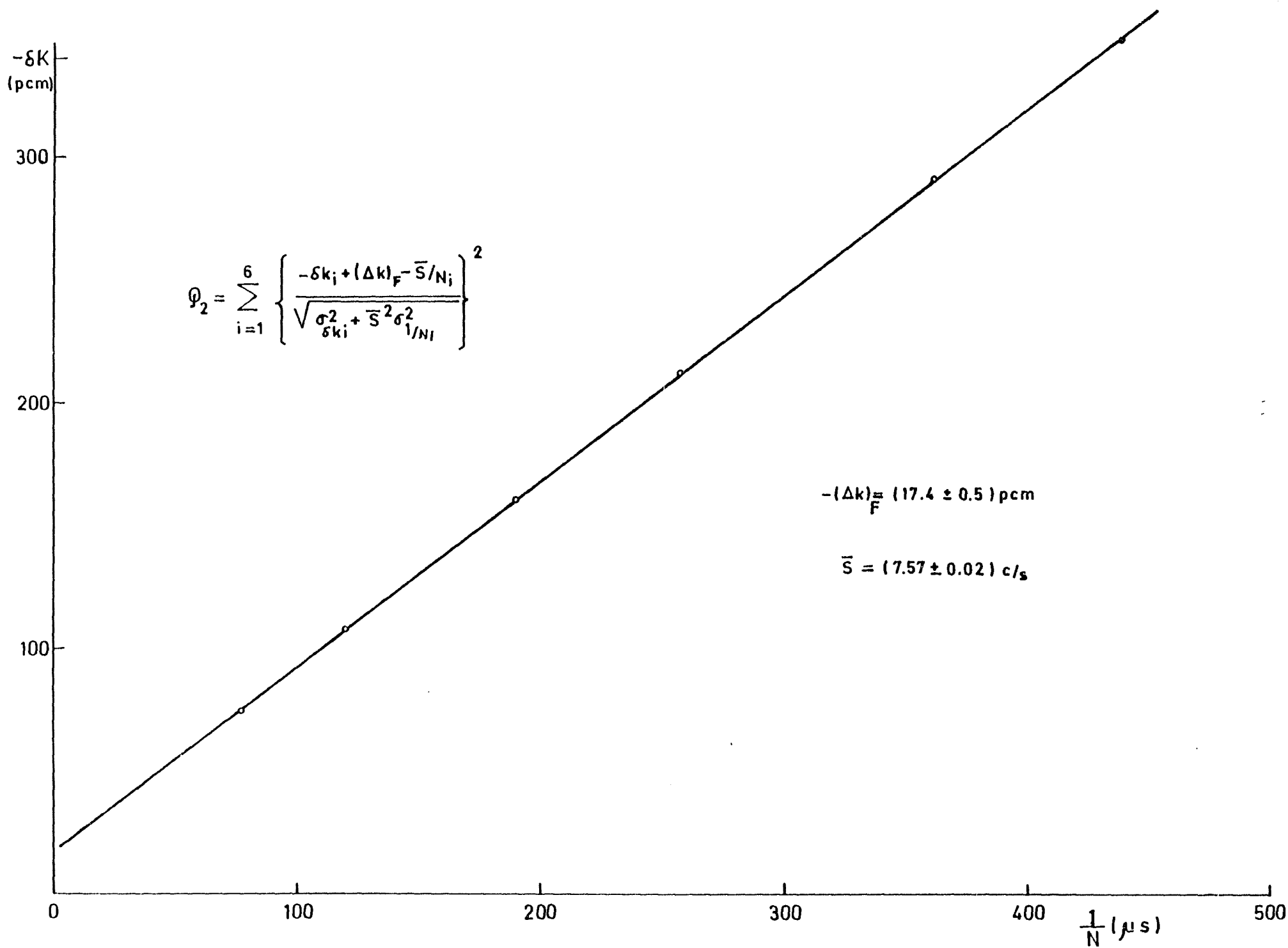


Fig. 2. — Determinación del término fuente  $\bar{S}$  y de  $-(\Delta k)_F$



En la figura 2 se ha representado las medidas obtenidas con un contador de impulsos del reactor. El origen de las ordenadas corresponde al estado justamente crítico, sin fuente externa de neutrones, por ello el término independiente, distinto de cero, es igual a  $-(\Delta K)_F$

Hasta ahora se ha supuesto que las medidas se han corregido por el efecto del tiempo muerto. A continuación se analiza el efecto de la corrección sobre los parámetros  $\bar{S}$  y  $(\Delta K)_F$

### 3. APLICACIONES.

#### A) Influencia del tiempo muerto y su determinación.

No es necesario conocer el tiempo muerto  $\tau$  del sistema experimental (contador y cadena electrónica) para la determinación de  $\bar{S}$ . Sin embargo, el no considerar la influencia de  $\tau$  conduce a un error sistemático en la estima de  $(\Delta K)_F$ .

En efecto; si  $N_D$  es el ritmo de cuentas sin corregir por tiempo muerto, resulta

$$N = \frac{N_D}{1 - N_D \tau} \quad ; \quad N_D \tau \ll 1$$

o bien:

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{N_D} - \tau$$

llevando este resultado a la expresión (2-3)

$$-(SK) = -(\Delta K)_F + \bar{S} \frac{1}{N_D} + \bar{S} \tau \quad (3-1)$$

se concluye que

$$\frac{d(-SK)}{d(1/N_D)} = \frac{d(-SK)}{d(1/N)} = \bar{S}$$

de manera que si no se hubieran hecho las correcciones por tiempo muerto se habría obtenido el mismo valor de  $\bar{S}$ , pero el importe de reactividad de la fuente hubiera quedado afectado de un error sistemático  $\bar{S} \tau$ .

El propio método de medidas en régimen subcrítico, conjetado en la expresión (2-4), suministra un procedimiento para la obtención de  $\tau$ . Este procedimiento está basado en la expresión (3-1), en donde haciendo

$$-(\Delta K)_F^i = -(\Delta K)_F + \bar{S} \tau \quad (3-2)$$

resulta una relación lineal entre  $(\Delta K)_F^i$  y  $\bar{S}$ , los cuales se determinan directamente de la minimización de  $Q_2$  en la expresión

(2-4), cuando en lugar de la variable  $N$  se utiliza la variable  $N_D$

En la expresión (3-2) hay una ecuación con dos incógnitas  $(\Delta K)_F$  y  $\tau$ , de manera que para su determinación haría falta una nueva ecuación. Si se desean obtener  $(\Delta K)_F$  y  $\tau$  con mayor precisión, es suficiente sobredimensionar el número de ecuaciones con un conjunto de  $r$  nuevos coeficientes  $\bar{S}$  y  $(\Delta K)'_F$  obtenidos también de la minimización de  $Q_2$ .

Si se procede de esta forma,  $(\Delta K)_F$  y  $\tau$  pueden obtenerse de la minimización de  $Q_1$ ;

$$Q_1 = \sum_{i=1}^r p'_i \left[ -(\Delta K)'_{Fi} + (\Delta K)_F - \tau \bar{S}_i \right]^2$$

con  $r > 2$  y  $p'_i$  el peso asignado a cada pareja  $\bar{S}_i, (\Delta K)'_{Fi}$ , teniendo en cuenta su correlación. (Ver apéndice).

El problema ha quedado relegado a buscar un procedimiento físico para cambiar  $\bar{S}$  y en consecuencia  $(\Delta K)'_F$ , sin alterar  $(\Delta K)_F$  y  $\tau$ . Para ello, se recurre al significado físico de  $\bar{S}$ .

Dado que  $\bar{S} = \epsilon_D \gamma_S S$ , es claro que no se puede variar la intensidad de la fuente  $S$ , que es constante; tampoco debe variarse  $\gamma_S$  cambiando la fuente de posición, pues ello repercutiría sobre el valor de  $(\Delta K)_F$ ; la única posibilidad entonces es variar  $\epsilon_D$ , y esto ha de hacerse con cuidado, pues cualquier cambio en el sistema de amplificación, afectaría al tiempo muerto. Formas válidas de cambiar  $\epsilon_D$  son: variar la posición del detector, variar su orientación, intercalar material moderador o fuertemente dispersor entre el detector y el reactor (sin afectar a la reactividad del reactor), etc.

En este trabajo se ha medido el importe de reactividad de la fuente de neutrones, utilizada para el arranque del reactor CORAL-I, obteniendo el resultado:

$$-(\Delta K)_F = (18.4 \pm 0.3) \text{ pcm.}$$

El proceso anterior de medida queda reflejado en la fi-

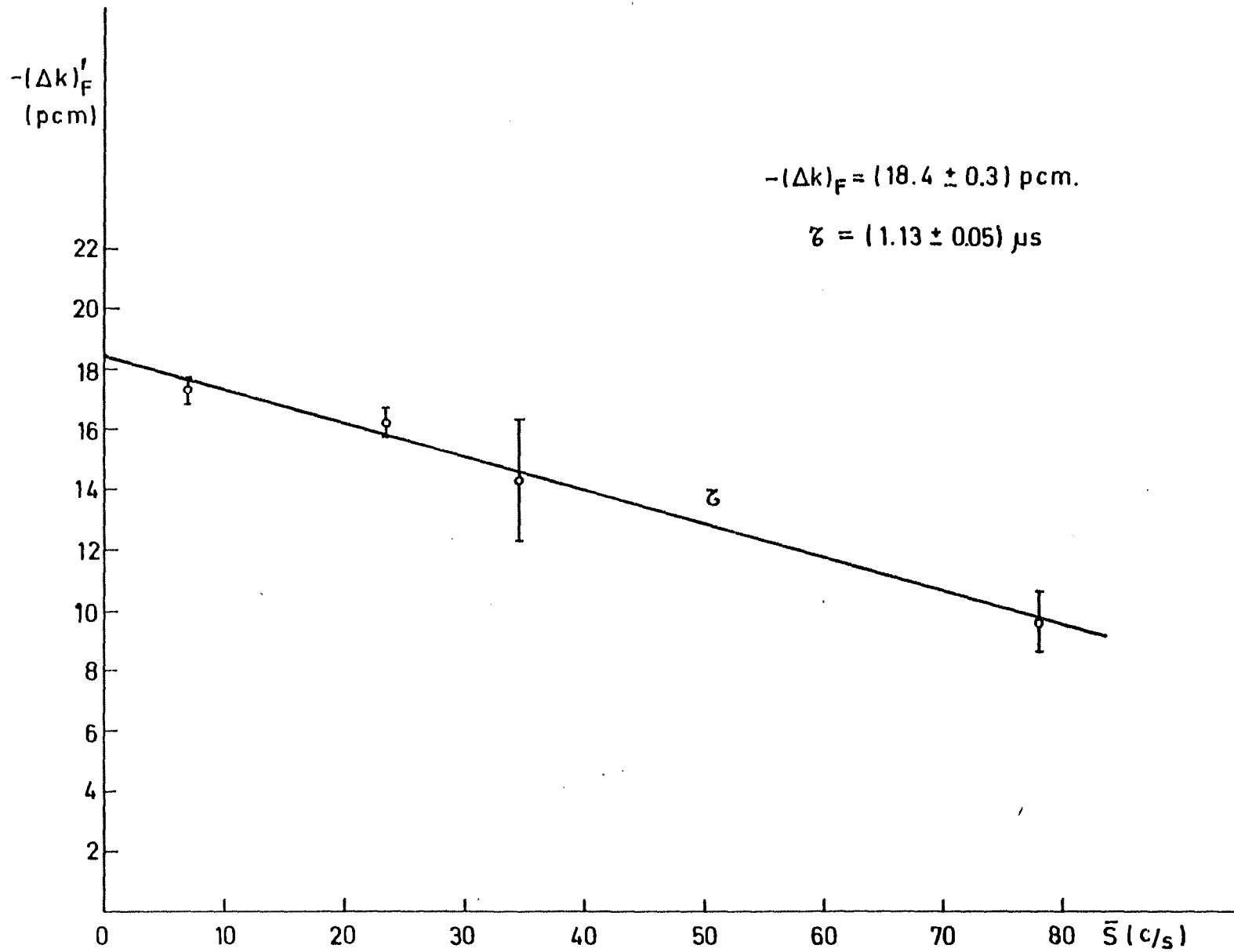


Fig. 3.— Determinación del tiempo muerto  $\zeta$  y de la reactividad de la fuente  $(\Delta k)_F$

gura 3. Obsérvese que dentro de los errores, el resultado es una relación lineal entre  $(\Delta K)_F'$  y  $\tau$ , tal como se había predicho en la expresión (3-2). El análisis de los errores, necesario para la asignación del peso  $p'$ , en la minimización de  $\Phi_1$ , condujo a que basta con considerar el error debido a  $(\Delta K)_F'$ , frente al cual se pueden despreciar los debidos a  $\bar{S}$  y a la correlación entre  $(\Delta K)_F'$  y  $\bar{S}$ .

En nuestro caso los detectores utilizados pertenecen a la Lógica de Seguridad del Reactor, y su eficiencia de detección debe permanecer inalterada; para estimar  $\tau$  y  $(\Delta K)_F'$  ha sido necesario recurrir a un contador auxiliar de  $F_3B$ , cuya posición podía variarse a voluntad, obteniendo así los diversos valores de  $\bar{S}$  que aparecen en la figura 3. De la minimización de  $\Phi_1$  se dedujeron  $(\Delta K)_F'$  y el tiempo muerto del contador auxiliar. Una vez conocido  $(\Delta K)_F'$ , que es una propiedad del reactor, independiente del detector, el valor del tiempo muerto de los demás detectores se obtiene directamente utilizando la expresión (3-1).

#### B) Medida de reactividad en régimen subcrítico.

En un reactor experimental son frecuentes pequeños cambios de configuración, tales como la sustitución de un material por otro, la creación o desaparición de huecos, la inserción de una fuente de neutrones, el desplazamiento de un material por los canales del reactor, etc. Para medir cuánto importa en reactividad el cambio de configuración efectuado, basta con poner el reactor crítico antes y después del cambio de configuración, y utilizar después las curvas de calibración de las barras de control para deducir la reactividad introducida en el sistema. Este procedimiento lleva implícito para ser válido, que el cambio de configuración no afecte a la calibración de las barras de control.

Desde el punto de vista de la seguridad del reactor es obligatorio estimar el efecto en reactividad del cambio de configuración antes de llevar al reactor al estado justamente crítico. Para ello pueden utilizarse métodos de cálculo, basados normalmente en la teoría de perturbaciones; sin embargo es más sencillo y fiable realizar su medida en régimen subcrítico.

Si  $(\delta K)_0$  es la cantidad de reactividad que hay que introducir con barras de control desde la posición de referencia, en donde se efectúan las medidas, para que el reactor se haga - justamente crítico;  $(\Delta K)_F$  el importe en reactividad debido a la presencia del material de la fuente junto al núcleo del reactor, y  $(\Delta K)_M$  la reactividad introducida en el cambio de configuración, se tiene:

antes del cambio:

$$-(\delta K)_0 + (\Delta K)_F = \frac{\bar{S}}{N_0}$$

después del cambio:

$$-(\delta K)_0 + (\Delta K)_F + (\Delta K)_M = \frac{\bar{S}}{N}$$

donde  $N_0$  y  $N$  son las medidas del contador antes y después del cambio respectivamente.

Restando miembro a miembro se obtiene:

$$(\Delta K)_M = \bar{S} \left( \frac{1}{N} - \frac{1}{N_0} \right)$$

Obsérvese que el resultado es independiente del tiempo muerto del sistema de detección, y también de la fuente de neutrones.

Para que el procedimiento sea válido es necesario que el cambio de configuración no afecte a  $\bar{S}$ ; esto es, hay que analizar los posibles efectos sobre  $\epsilon_D$  y  $\gamma_S$ . Una forma de asegurar la validez consiste en introducir en el reactor, con barras de control, una reactividad

$$(\delta K)_C = -(\delta K)_0 + (\Delta K)_M$$

tal que el reactor sea crítico sin fuente.

#### 4. REACTOR CRITICO CON FUENTE. IMPORTANCIA NEUTRONICA.

En el apartado 1 se ha definido el término fuente como  $\bar{S} = (\epsilon_0 S) \bar{\nu}_S$ , y se ha insistido que en las cercanías a la criticidad,  $\epsilon_0$  puede considerarse como constante, de manera que  $\bar{S}$  es proporcional a  $\bar{\nu}_S$ , la importancia relativa de los neutrones de la fuente.

Es sabido que si en un reactor justamente crítico se introdujeran S neutrones en un punto, la población neutrónica del reactor aumentaría de nivel en  $\Delta N$  neutrones; se llama importancia neutrónica de este punto al cociente  $\Delta N/S$ . Si se trata de un reactor crítico con una fuente de neutrones de intensidad constante, en cada segundo, el reactor aumentará su población en  $\Delta N$  neutrones,  $\Delta N$  es constante y proporcional a S, de forma que la población neutrónica crecerá linealmente con el tiempo. En estas condiciones, y por definición, la pendiente será proporcional a la función importancia.

Con objeto de relacionar cuantitativamente S con la pendiente, se pueden usar las ecuaciones de la cinética puntual, para un sólo grupo de neutrones retardados y con  $k=1$ :

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{\bar{\nu}\beta}{l} N + \bar{\nu}\lambda C + \bar{\nu}_S S$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\beta}{l} N - \lambda C$$

Si  $C(0) = C_0$ ,  $N(0) = N_0$ , son las condiciones iniciales, la solución del sistema es:

$$N(t) = \left[ N_0 - \frac{\bar{\nu}_S S + \lambda N_0 + \bar{\nu}\lambda C_0}{\beta/l + \lambda} + \frac{\bar{\nu}_S \lambda S}{(\beta/l + \lambda)^2} \right] e^{-(\beta/l + \lambda)t} + \frac{\bar{\nu}_S \lambda S}{\beta/l + \lambda} t + \left[ \frac{\bar{\nu}_S S + \lambda N_0 + \bar{\nu}\lambda C_0}{\beta/l + \lambda} - \frac{\bar{\nu}_S \lambda S}{(\beta/l + \lambda)^2} \right]$$

Para el caso del reactor CORAL-I

$$\frac{\beta}{l} = \frac{6.8 \cdot 10^{-3}}{2.2 \cdot 10^{-2}} \text{ s}^{-1} \approx 3.1 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

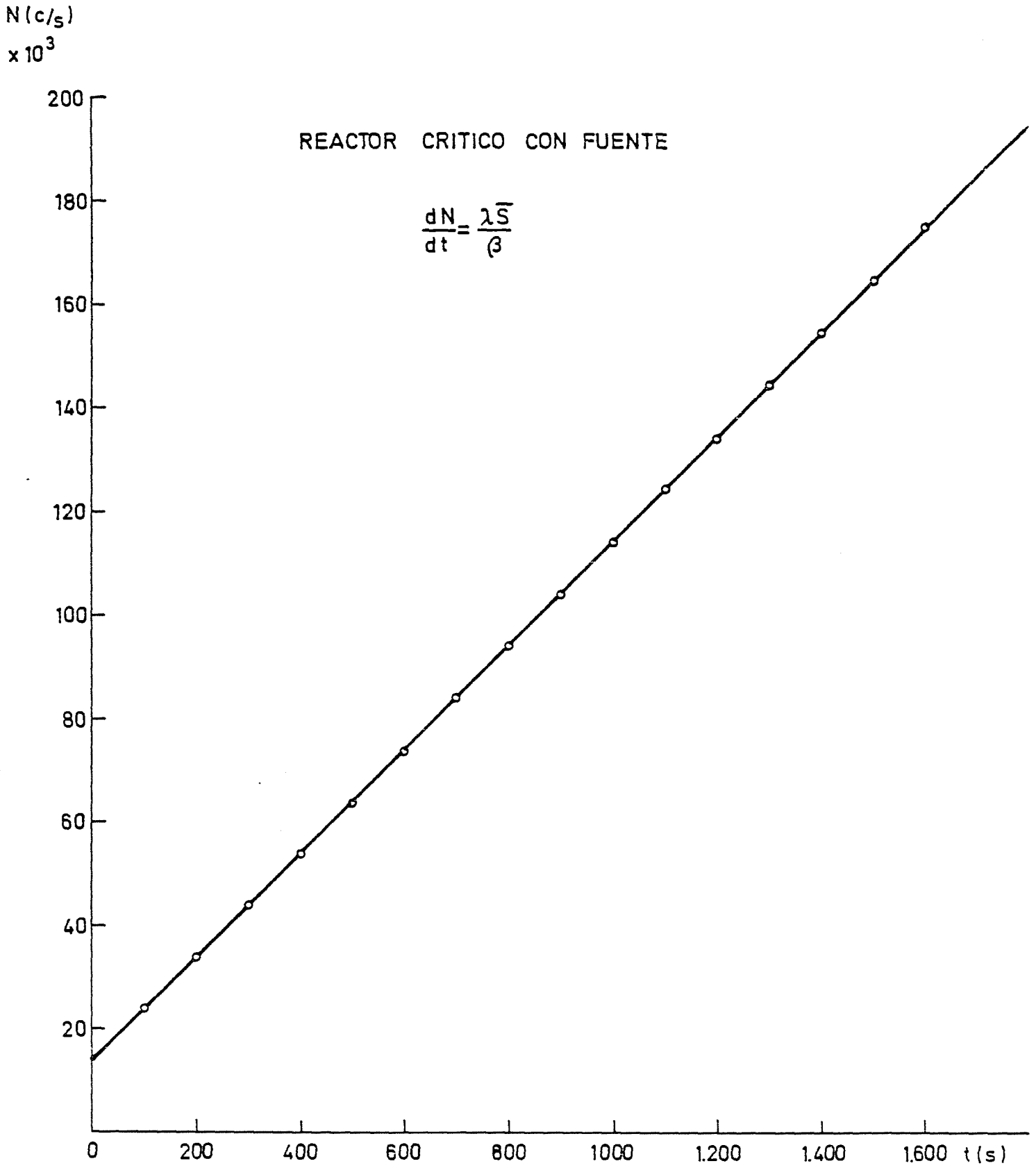


Fig. 4



$$\lambda = 8.6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$$

de manera que  $\beta/l \gg \lambda$ , y la exponencial negativa es un transitorio muy rápido que desaparece momentos después del instante inicial. La población neutrónica acaba aumentando linealmente con una pendiente:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\gamma_s \lambda S l}{\beta}$$

Si  $N$  es la medida del detector, tal como se define en el apartado 1,  $N = \epsilon_D \cdot n / l$  resulta:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\epsilon_D \gamma_s S \lambda}{\beta} = \frac{\bar{S} \lambda}{\beta}$$

Experimentalmente, figura 4, puede obtenerse  $p = \frac{dN}{dt}$ , de manera que  $\bar{S} = p \beta / \lambda$ , disponiendo así de otro método para el cálculo de  $\bar{S}$ .

Además de la interpretación inmediata de la medida, la determinación de  $\bar{S}$  con este nuevo método presenta la ventaja de ser independiente de la calibración de las barras de control, lo cual puede aprovecharse para comprobar la bondad de la calibración.

La medida de  $\bar{S}$  con el reactor justamente crítico con fuente, puede utilizarse en la expresión (2-3) para calcular  $(\beta k)_i$ ; esto es, como método alternativo para calibrar las barras de control en régimen subcrítico.

En la figura 5 se ha representado  $\bar{S}$ , medido en régimen subcrítico, desplazando la fuente por distintas posiciones del canal tangencial del reactor CORAL-I. Esta es pues, la forma de la función importancia de los neutrones de la fuente.

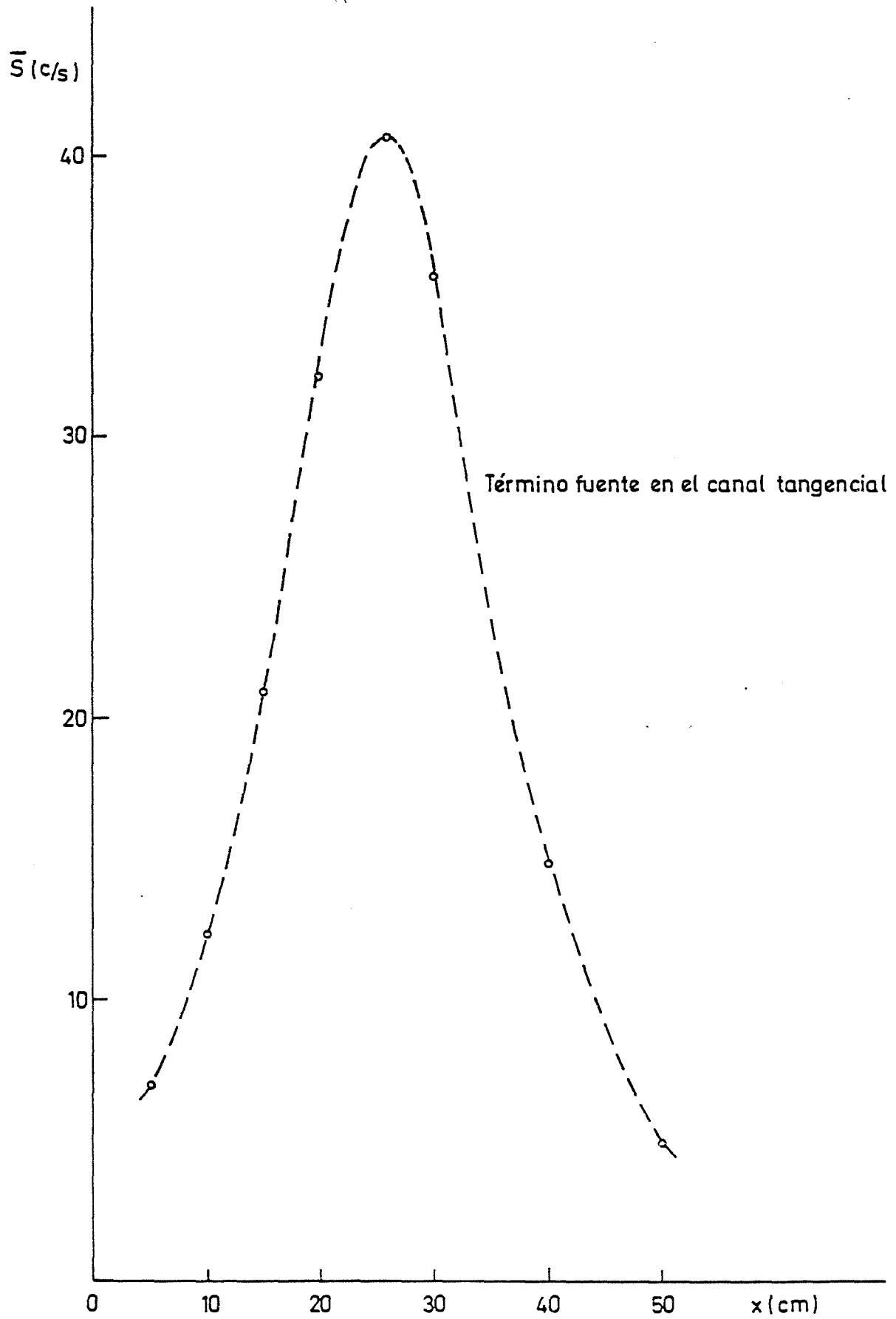


Fig. 5

## 5. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

Se han estudiado en el reactor CORAL-I dos métodos alternativos para la medida e interpretación del término fuente que aparece en las ecuaciones de la cinética puntual. En uno de los métodos, el reactor se encuentra en estado subcrítico y se hace uso de la calibración de las barras de control. En el otro método, la medida del término fuente necesita del reactor en estado justamente crítico con fuente.

La concordancia de ambos métodos confirma:

- a) La calibración de las barras de control es correcta.
- b) Es válido en el reactor, la utilización de las ecuaciones de la cinética con un sólo grupo de neutrones retardados.

Como aplicación directa de la técnica de medida en régimen subcrítico, se ha elaborado un método para la determinación del tiempo muerto de los canales de arranque del reactor. Los resultados obtenidos son:

	Canal de Impulsos 1	Canal de Impulsos 2
término $\frac{C}{S}$ fuente	$(7.58 \pm 0.05) \frac{C}{S}$	$(4.92 \pm 0.03) \frac{C}{S}$
tiempo muerto $\tau$	$(1.52 \pm 0.07) \mu s$	$(4.57 \pm 0.20) \mu s$

Otra de las aplicaciones es la medida de reactividades en régimen subcrítico. Como resultado se ha obtenido que el importe en reactividad de la fuente de AmBe del reactor vale:

$$-(\Delta k)_F = (18.4 \pm 0.3) \text{ pcm.}$$

Se ha establecido que el término fuente  $\bar{S}$  es proporcional a la importancia de los neutrones de la fuente ; disponiendo así de un método para la medida del flujo adjunto del reactor - cuando se utilice una fuente con espectro semejante al de fisión.

BIBLIOGRAFIA.

- 1 Informe de Seguridad del Reactor Rápido Experimental CORAL-I  
C.N.E.N. "Juan Vigón" Madrid, Diciembre 1.972.
- 2 Nuclear-Reactor Analysis. Allan F. Henry, The MIT Press, Cambridge  
(Massachusetts), 1.975.

APENDICE.

CRITERIOS DE ASINGACION DE PESOS EN LA RECTA DE MINIMOS CUADRADOS.

En el proceso de datos de este trabajo se hace un uso amplio del método de los mínimos cuadrados, tanto para la estimación de los parámetros, como para la de sus errores correspondientes. Así por ejemplo, en la expresión (2-2),

$$N_i = \frac{\bar{S}}{-(S K)_i + (\Delta K)_F}$$

Si se quieren estimar  $\bar{S}$  y  $(\Delta K)_F$ , a partir de un conjunto de  $m$  medidas de  $N$  y  $S K$ , habría que minimizar la expresión:

$$\sum_{i=1}^m \left[ N_i - \frac{\bar{S}}{-(S K)_i + (\Delta K)_F} \right]^2 ; \text{ que no es}$$

una relación lineal entre  $N$  y  $S K$ .

Con objeto de linealizar la expresión (2-2), se utiliza la expresión (2-3)

$$-(S K)_i = -(\Delta K)_F + \bar{S} \frac{1}{N_i}$$

en donde las variables son ahora  $\frac{1}{N}$  y  $S K$ .

Para que la pareja de valores obtenidos  $\bar{S}$  y  $(\Delta K)_F$  sea independiente de la forma elegida para la minimización, es necesario utilizar pesos adecuados. En nuestro caso se ha procedido a minimizar la expresión (2-4):

$$Q_2 = \sum_{i=1}^m P_i \left[ -(S K)_i + (\Delta K)_F - \bar{S} \frac{1}{N_i} \right]^2$$

Al asignar el peso correcto,  $Q_2$  se hace adimensional y su valor no depende de las unidades en que se miden  $S K$  y  $N$ .

Esta necesidad condiciona la forma del peso. La magnitud del peso debe ser la correspondiente a los errores de medida. En estas condiciones, si los pesos se han elegido según los criterios anteriores, se demuestra que  $Q_2$  debe tomar un valor aproximadamente igual a  $M-2$ .

En el caso de la minimización de  $Q_2$ , si  $\sigma_i$  es la imprecisión con que se conoce  $(\delta K)_i$ , a través de las curvas de calibración,  $\sigma(1/N_i)$  el error de la medida de  $1/N_i$ , y  $\bar{S}_0$  un valor aproximado de  $S$ , proveniente por ejemplo de una estimación gráfica, el peso elegido para  $Q_2$  es:

$$p_i = \left[ \sigma_i^2 + \bar{S}_0^2 \cdot \sigma^2(1/N_i) \right]^{-1}$$

La medida de  $N$  puede planearse de manera que  $\bar{S}_0 \sigma(1/N_i) \ll \sigma_i$  sin más que elegir el tiempo total de medida  $\Delta t_i$ , suficientemente grande, pues

$$\sigma^2(1/N_i) = (N_i^3 \Delta t_i)^{-1}$$

entonces

$$p_i = 1/\sigma_i^2$$

En el caso de la minimización de la expresión (3-2)

$$Q_1 = \sum_{i=1}^r p_i \left[ -(\Delta K)_{Fi}' + (\Delta K)_F - \tau \bar{S}_i \right]^2 \quad \text{donde } r$$

es el número de medidas

La elección del peso  $p_i'$ , asignado a la pareja  $\bar{S}_i, (\Delta K)_{Fi}'$

se complica al tener en cuenta que  $\bar{S}_i$  y  $(\Delta K)_{Fi}'$  están correlacionados, ya que ambos son los parámetros de ajuste de la expresión (3-1)

$$-(\delta K) = \bar{S} \frac{1}{N_D} - (\Delta K)_F'$$

de cuya minimización se obtienen  $\bar{S} \pm \sigma_S$ ,  $(\Delta K)_F' \pm \sigma_F'$  y la correlación  $\sigma_{SF}$

Aplicando los criterios anteriores, el peso elegido para la minimización de  $Q_1$  es

$$p_i' = \left[ \sigma_{F_i}^2 + \tau_0^2 \sigma_{S_i}^2 + 2 \tau_0 \sigma_{S_{F_i}} \right]^{-1}$$

donde  $\tau_0$  es un valor aproximado del tiempo muerto  $\tau$ . Como comprobación de que  $p_i'$  es el peso correcto, debe ocurrir que:

$$Q_1 \approx r-2.$$



J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Determinación del término fuente a partir de medidas de multiplicación subcrítica en el Reactor Coral-I".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

Utilizando una fuente neutrónica de AmBe en el reactor rápido experimental de potencia cero CORAL-I, se llevan a cabo dos procedimientos independientes para la medida del término fuente que aparece en las ecuaciones de la cinética puntual. En uno de ellos, aprovechando la linealidad característica de este reactor en la aproximación a crítico, se realiza la medida en estado justamente crítico con fuente. En el otro método, en régimen subcrítico, se hace uso de la calibración de las barras de control. Entre las aplicaciones destacan: la medida del tiempo muerto del sistema detector, la determinación de la reactividad de pequeñas muestras en régimen subcrítico y la obtención de la forma de la función importancia de los neutrones de la fuente.

J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Determinación del término fuente a partir de medidas de multiplicación subcrítica en el Reactor Coral-I".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

Utilizando una fuente neutrónica de AmBe en el reactor rápido experimental de potencia cero CORAL-I, se llevan a cabo dos procedimientos independientes para la medida del término fuente que aparece en las ecuaciones de la cinética puntual. En uno de ellos, aprovechando la linealidad característica de este reactor en la aproximación a crítico, se realiza la medida en estado justamente crítico con fuente. En el otro método, en régimen subcrítico, se hace uso de la calibración de las barras de control. Entre las aplicaciones destacan: la medida del tiempo muerto del sistema detector, la determinación de la reactividad de pequeñas muestras en régimen subcrítico y la obtención de la forma de la función importancia de los neutrones de la fuente.

J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Determinación del término fuente a partir de medidas de multiplicación subcrítica en el Reactor Coral-I".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

Utilizando una fuente neutrónica de AmBe en el reactor rápido experimental de potencia cero CORAL-I, se llevan a cabo dos procedimientos independientes para la medida del término fuente que aparece en las ecuaciones de la cinética puntual. En uno de ellos, aprovechando la linealidad característica de este reactor en la aproximación a crítico, se realiza la medida en estado justamente crítico con fuente. En el otro método, en régimen subcrítico, se hace uso de la calibración de las barras de control. Entre las aplicaciones destacan: la medida del tiempo muerto del sistema detector, la determinación de la reactividad de pequeñas muestras en régimen subcrítico y la obtención de la forma de la función importancia de los neutrones de la fuente.

J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Determinación del término fuente a partir de medidas de multiplicación subcrítica en el Reactor Coral-I".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

Utilizando una fuente neutrónica de AmBe en el reactor rápido experimental de potencia cero CORAL-I, se llevan a cabo dos procedimientos independientes para la medida del término fuente que aparece en las ecuaciones de la cinética puntual. En uno de ellos, aprovechando la linealidad característica de este reactor en la aproximación a crítico, se realiza la medida en estado justamente crítico con fuente. En el otro método, en régimen subcrítico, se hace uso de la calibración de las barras de control. Entre las aplicaciones destacan: la medida del tiempo muerto del sistema detector, la determinación de la reactividad de pequeñas muestras en régimen subcrítico y la obtención de la forma de la función importancia de los neutrones de la fuente.

CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations.  
CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron importance function. Reactor kinetics.  
Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations.  
CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron importance function. Reactor kinetics.  
Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations.  
CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron importance function. Reactor kinetics.  
Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

CLASIFICACION INIS Y DESCRIPTORES: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations.  
CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron importance function. Reactor kinetics.  
Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations. CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron Importance function. Reactor kinetics. Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations. CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron importance function. Reactor kinetics. Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations. CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron importance function. Reactor kinetics. Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

INIS CLASSIFICATION AND DESCRIPTORS: E36. Neutron sources. Reactor kinetics equations. CORAL-1 reactor. Criticality. Reactivity. Neutron importance function. Reactor kinetics. Control elements. Multiplication factors. Dead time. Radiation detectors. Measurements.

J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Source term determination from subcritical multiplication measurements at Koral-I Reactor".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

By using an AmBe neutron source, two independent procedures have been settled for the zero-power experimental fast-reactor CORAL-I in order to measure the source term, which appears in the point kinetical equations. In the first one, the source term is measured when the reactor is just critical with source, by taking advantage of the wide range of the linear approach to critical for CORAL-I. In the second one, the measurement is made in subcritical state by making use of the previous calibrated control rods. Several applications are also included, such as the measurement of the detector dead time, the determinations of the reactivity of small samples, and the shape of the neutron importance of the source.

J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Source term determination from subcritical multiplication measurements at Koral-I Reactor".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

By using an AmBe neutron source, two independent procedures have been settled for the zero-power experimental fast-reactor CORAL-I in order to measure the source term, which appears in the point kinetical equations. In the first one, the source term is measured when the reactor is just critical with source, by taking advantage of the wide range of the linear approach to critical for CORAL-I. In the second one, the measurement is made in subcritical state by making use of the previous calibrated control rods. Several applications are also included, such as the measurement of the detector dead time, the determinations of the reactivity of small samples, and the shape of the neutron importance of the source.

J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Source term determination from subcritical multiplication measurements at Koral-I Reactor".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

By using an AmBe neutron source, two independent procedures have been settled for the zero-power experimental fast-reactor CORAL-I in order to measure the source term, which appears in the point kinetical equations. In the first one, the source term is measured when the reactor is just critical with source, by taking advantage of the wide range of the linear approach to critical for CORAL-I. In the second one, the measurement is made in subcritical state by making use of the previous calibrated control rods. Several applications are also included, such as the measurement of the detector dead time, the determinations of the reactivity of small samples, and the shape of the neutron importance of the source.

J. E. N. 418

Junta de Energía Nuclear. División de Reactores. Madrid.

"Source term determination from subcritical multiplication measurements at Koral-I Reactor".

BLAZQUEZ, J.B.; BARRADO, J.M. (1978) 27 pp. 5 figs. 2 refs.

By using an AmBe neutron source, two independent procedures have been settled for the zero-power experimental fast-reactor CORAL-I in order to measure the source term, which appears in the point kinetical equations. In the first one, the source term is measured when the reactor is just critical with source, by taking advantage of the wide range of the linear approach to critical for CORAL-I. In the second one, the measurement is made in subcritical state by making use of the previous calibrated control rods. Several applications are also included, such as the measurement of the detector dead time, the determinations of the reactivity of small samples, and the shape of the neutron importance of the source.