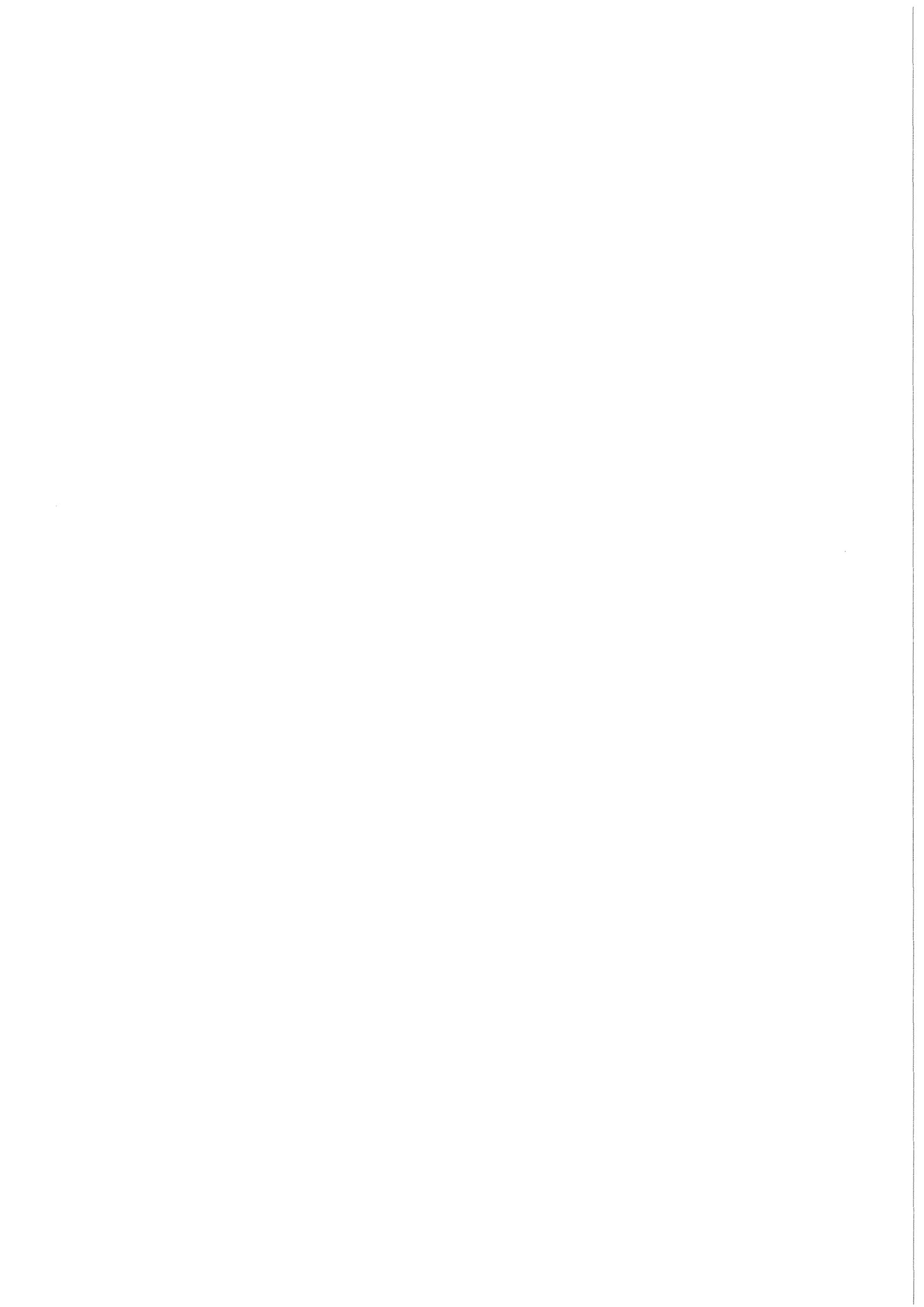


**KfK 3644 B**  
**Juni 1984**

# **Experiencias utilizando el reactor de docencia SUR 100**

**B. Milicic**  
**Schule für Kerntechnik**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Schule für Kerntechnik.

KfK 3644 B

Experimente am Unterrichtsreaktor SUR 100

Experiments with the SUR 100 training reactor

Experiencias utilizando el reactor de docencia SUR 100

Beatriz Milicic

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Resumen

Este trabajo contiene una recopilación de experiencias para docencia utilizando el reactor SUR-100, las cuales fueron ampliamente comprobadas en trabajos prácticos realizados en la Escuela de Técnicas Nucleares.

## Zusammenfassung

Dieser Bericht enthält eine Sammlung von Versuchsbeschreibungen für den Unterricht mit und am Ausbildungsreaktor SUR - 100; sämtliche hier beschriebenen Versuche sind mehrfach im praktischen Unterricht an der Schule für Kerntechnik erprobt worden.

## Abstract

This paper contains a compilation of various experiments using the SUR - 100 reactor for training purposes, which have been widely proved in practical work at the School for Nuclear Technology of the Karlsruhe Research Center.

## PROLOGO

El reactor de docencia SUR 100 es una donación del pueblo alemán a las Universidades de México (UNAM) y Rosario (UNR - Rep. Argentina).

En este trabajo se presentan experiencias que pueden ser desarrolladas en este reactor, ayudando así a su mejor aprovechamiento como instrumento de capacitación.

Las experiencias aquí detalladas pertenecen al programa normal de capacitación de la Escuela de Técnicas Nucleares del Centro de Investigaciones Nucleares de Karlsruhe, las cuales fueron previamente realizadas por la autora de este trabajo (Beatriz Milicic) en la mencionada escuela, para ser transmitidas en forma precisa en este trabajo.

Esperamos que esta guía de trabajos prácticos, escrita en idioma español, sea de utilidad para la docencia con el reactor de enseñanza en Rosario, México y otros centros de capacitación.

Hans J. Zech

## INDICE

Pág.	
	ESTÁTICA
1	Simulación de la experiencia crítica
7	Determinación del flujo mediante activación
13	Medición de la actividad absoluta de hojuelas de Au 198 mediante el método de coincidencias $\beta - \gamma$
19	Determinación de la eficiencia de un detector para Cu64 en función de la actividad de saturación del Au 198
25	Determinación de los flujos térmico y epitérmico
35	Determinación de la densidad de flujo de neutrones rápidos mediante sondas de azufre
41	Medición de la intensidad neutrónica en un canal de expe- rimentación
	CINETICA
47	Calibración de las placas de control
57	Determinación de perturbaciones
67	Método de Rossi - $\alpha$
	SEGURIDAD
77	Medición del campo de radiación en las inmediaciones del reactor
	QUIMICA
81	Reacción de Szilard-Chalmers : Cambio de la forma de ligadura mediante un proceso $(n, \gamma)$
91	Cambio del estado de oxidación mediante una reacción $(n, \gamma)$
95	APENDICE: El reactor SUR 100

## Simulación de la experiencia crítica

### 1. Teoría

La condición para que exista una reacción en cadena estable y autosostenida es que por cada fisión debe producirse exactamente un neutrón que genere otra fisión, o lo que es lo mismo, el número de fisiones que tienen lugar en el reactor por unidad de tiempo sea constante

Se define factor de multiplicación  $k$  a la relación entre el número de fisiones de una generación y la precedente. Cuando el número de fisiones en cada generación es constante,  $k = 1$ , se dice que el reactor está crítico. Si ese número decrece en el tiempo,  $k < 1$ , el reactor está subcrítico, y si aumenta en el tiempo,  $k > 1$ , el reactor es supercrítico.

Si se conoce exactamente la geometría del sistema y sus dimensiones, existe una cantidad mínima de combustible que permite autosostener la reacción en cadena en forma estable. Esa cantidad se denomina masa crítica y a las dimensiones, dimensiones críticas.

Un sistema es subcrítico si para sus dimensiones críticas no se encuentra una masa crítica de combustible. Si en ese sistema se introduce una fuente de neutrones, se generarán fisiones en el combustible. Se define como multiplicación subcrítica  $M$  o multiplicación de la fuente a la relación entre el flujo debido a las contribuciones de la fuente y de las fisiones producidas en el núcleo respecto al flujo producido por la fuente.

Si denominamos  $S$  al flujo de la fuente, después de la primera generación habrá  $Sk_{ef}$  neutrones, después de la segunda,  $Sk_{ef}^2$ , etc.  $k_{ef}$  es el factor de multiplicación efectivo. Por lo tanto:



$$(1) \quad M = \frac{S + Sk_{ef} + Sk_{ef}^2 + \dots}{S} = 1 + k_{ef} + k_{ef}^2 + \dots$$

Como el sistema es subcrítico,  $k_{ef} < 1$ , por lo tanto:

$$(2) \quad M = \frac{1}{1 - k_{ef}}$$

Esta relación permite alcanzar el estado crítico del reactor midiendo la multiplicación subcrítica.

Cuando se construye un reactor, se colocan uno a uno los elementos combustibles y se mide la multiplicación subcrítica. Llega un momento en que la inversa de la multiplicación subcrítica se anula lo cual implica que  $k_{ef}$  es 1, con lo cual se llegó al estado crítico del reactor, o sea, que se alcanzó la masa crítica.

## 2. Método.

En el reactor SUR - 100, el acceso al núcleo es relativamente difícil. Debido a ello, para fines didácticos, se realiza una simulación de la experiencia crítica. Teniendo una masa de combustible constante, se modifican las dimensiones del núcleo hasta obtener el estado crítico.

El núcleo del reactor está formado por dos cilindros con el mismo radio, que al unirse conforman las dimensiones críticas. La simulación consiste en conseguir la geometría adecuada mediante acercamientos de las dos mitades.

Como se trabaja en un sistema subcrítico, la fuente de neutrones debe estar inserta durante la experiencia. En la posición más alejada de las dos mitades del núcleo se realizan tres mediciones del flujo neutrónico: una con ambas barras insertas, otra con una barra extraída y otra con ambas barras extraídas. Luego se acercan las dos mitades del núcleo un centímetro y se repiten las mediciones. Se calcula  $1/M$  para cada una de ellas, se las grafica en función de la separación de las dos unidades del núcleo y se extrapola para  $1/M \rightarrow 0$ . De esta forma se obtiene una distancia crítica estimativa.

Se repite el procedimiento acortando la distancia hasta que el reactor se torna supercrítico para cada posición de las barras. En ese momento se retira la fuente y se observa el comportamiento del reactor: si se mantiene estable significa que se ha obtenido la distancia crítica.

### 3. Cálculo de $1/M$

Se supone que cuando las dos mitades del núcleo están separadas la máxima distancia, los detectores sólo detectan el flujo debido a la fuente ( $\phi_0$ ). Por ello

$$(3) \quad 1 / M = 1 \quad \text{para } d = 50 \text{ mm}$$

para cualquier posición de las barras.

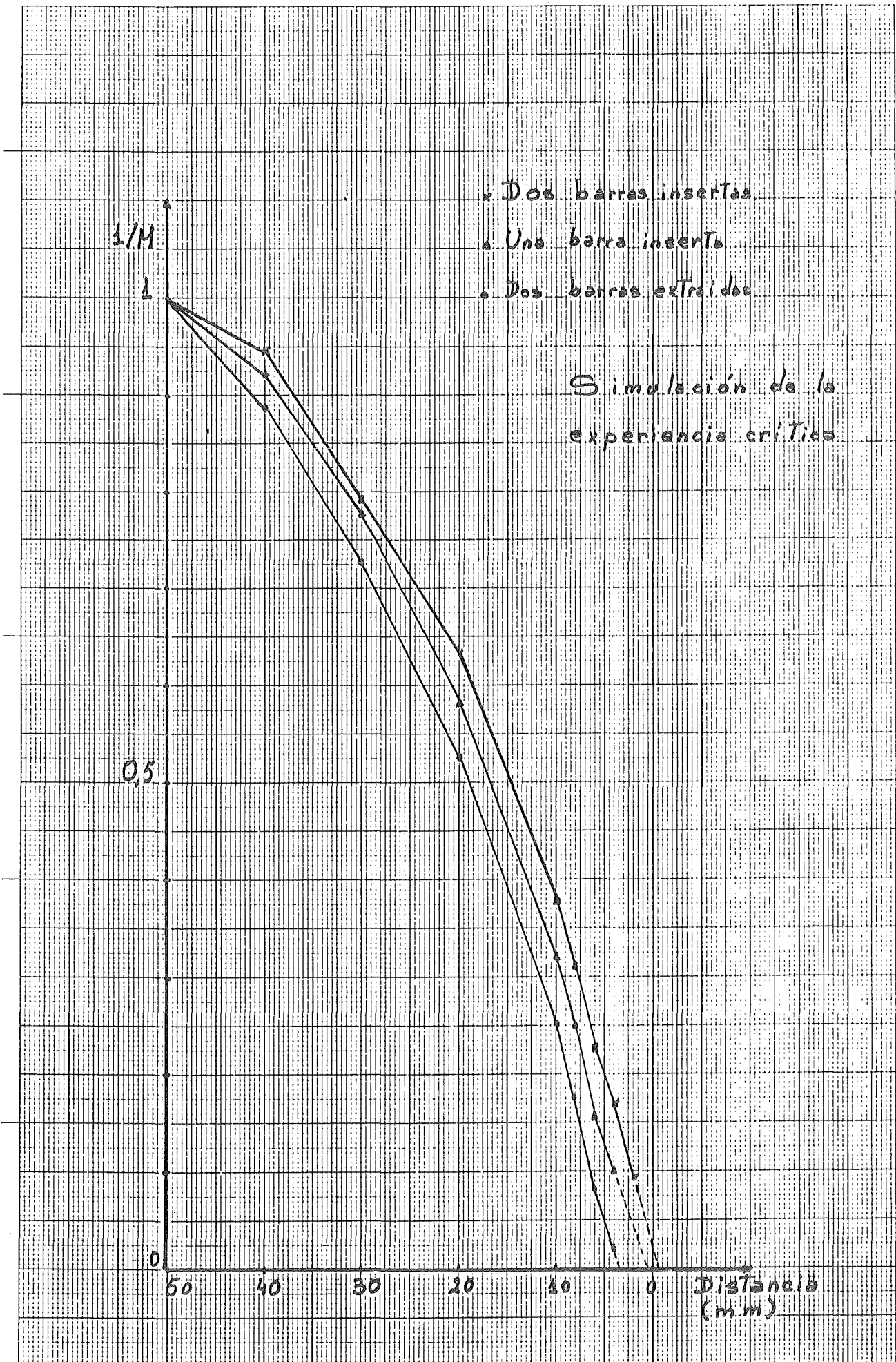
Para las restantes posiciones,  $1/M$  será la relación entre  $\phi_0$  y el flujo obtenido para dicha posición:

$$(4) \quad 1 / M = \phi_0 / \phi (d_i)$$

En principio, el cálculo se puede realizar con las mediciones obtenidas por cualquiera de los detectores, pero son preferibles los detectores lineales por la mayor exactitud en su lectura. Dentro de ellos se elige el canal de medición de impulsos, por ser más preciso para flujos bajos.

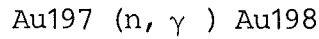
Distancia mitades del núcleo (mm)	Posición barras (mm)		Canal de impulsos		Canal de cte. cta.		1 / M
	1	2	logarítmico	lineal	logarítmico	lineal	
50	001	000	180	170	$5,4 \times 10^{-12}$	$0,2 \times 3 \times 10^{-11}$	1
50	250	001	190	180	$0,7 \times 10^{-12}$	$0,6 \times 10^{-14}$	1
50	250	250	200	190	$0,7 \times 10^{-12}$	$0,6 \times 10^{-14}$	1
40	000	001	200	180	$0,7 \times 10^{-12}$	$0,18 \times 3 \times 10^{-14}$	0,944
40	251	001	200	195	$0,7 \times 10^{-12}$	$0,6 \times 10^{-14}$	0,923
40	251	250	220	215	$0,8 \times 10^{-11}$	$0,6 \times 10^{-14}$	0,884

4. Mediciones

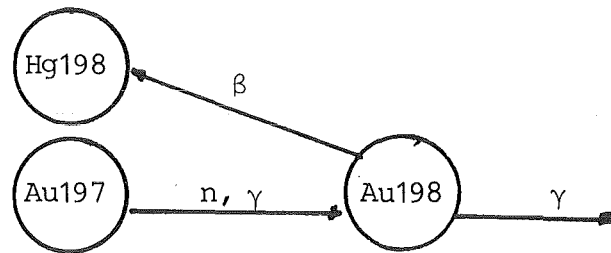


Determinación del flujo mediante activación.

Si se irradia una muestra de oro con neutrones térmicos, éste sufre una reacción :



A su vez, el Au198 emite partículas beta, decayendo a Hg198 y radiación gamma, como se muestra en la siguiente figura:



El número de átomos de Au198 presentes en la muestra va a ser función del número de átomos de Au197 que decayeron y del número de los que pasaron a Hg198.

La disminución de átomos de Au197 es :

$$(1) \quad \frac{dN_{\text{Au}}}{dt} = - \sigma_{\text{Au197}} N_{\text{Au197}} \phi$$

donde :  $\sigma_{\text{Au197}}$  es la sección eficaz del Au197 =  $98,8 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$

$\phi$  es el flujo en el lugar donde se irradió la muestra.

El número de átomos de Au198 será:

$$(2) \quad \frac{dN_{\text{Au198}}}{dt} = \sigma_{\text{Au}} N_{\text{Au}} \phi - \lambda_{\text{Au198}} N_{\text{Au198}} - \sigma_{\text{Au198}} N_{\text{Au198}} \phi$$

donde :  $\sigma_{\text{Au198}}$  es la sección eficaz del Au198 =  $25100 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$

$\lambda_{\text{Au198}}$  es la constante de decaimiento del Au198 =  $3 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

El número de átomos presentes de Hg198 será:

$$(3) \quad \frac{dN_{\text{Hg}}}{dt} = \lambda_{\text{Au198}} N_{\text{Au198}}$$

Por lo tanto, el número de átomos de Au198 presentes en un momento t en la muestra será:

$$(4) \quad N_{\text{Au198}}(t) = \frac{\sigma_{\text{Au198}} N_{\text{Au198}}(t=0) \phi}{\lambda_{\text{Au198}} + \sigma_{\text{Au198}} \phi - \sigma_{\text{Au197}} \phi} \cdot \{ e^{-\sigma_{\text{Au197}} \phi t} - e^{-(\lambda_{\text{Au198}} + \sigma_{\text{Au198}} \phi) t} \}$$

Como  $\lambda_{\text{Au198}} = \ln 2 / T_{1/2} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$   
 y  $\phi \ll 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

entonces :

$$(5) \quad \lambda_{\text{Au198}} \gg \sigma_{\text{Au197}} \phi$$

y también

$$(6) \quad \lambda_{\text{Au198}} \gg \sigma_{\text{Au198}} \phi$$

se puede aproximar

$$(7) \quad \lambda_{\text{Au198}} + \sigma_{\text{Au198}} \phi - \sigma_{\text{Au197}} \phi = \lambda_{\text{Au198}}$$

$$(8) \quad e^{-\sigma_{\text{Au197}} \phi t} = 1$$

Por lo tanto:

$$(9) \quad N_{\text{Au198}}(t) = \frac{\sigma_{\text{Au197}} N_{\text{Au197}} \phi}{\lambda_{\text{Au198}}} (1 - e^{-\lambda_{\text{Au198}} t})$$

La actividad de una muestra se define como:

$$(10) \quad A = \lambda N$$

Por lo tanto, conociendo la actividad de una muestra se puede calcular mediante (9) y (10) el flujo en el lugar de la irradiación

## 2. Método

Se colocan 6 muestras idénticas, de peso conocido, en un dispositivo de plexiglás, que fija las posiciones de las hojuelas dentro del núcleo, en el canal I de experimentación. Se irradian a 1rWatt durante 25 minutos.

Con un detector de eficiencia conocido se mide el número de cuentas de cada una y se calcula su actividad. Con ellas se calcula en flujo y se lo grafica en función de la posición en el reactor.



Resultados

Pastilla Nr. : 1

Masa : 0,145 gr

Posición : 10 mm

Densidad atómica :  $N = N_A \cdot m / M$

$N_A$  = número de Avogadro =  $6,023 \cdot 10^{23}$  át/mol

$m$  = masa de la pastilla = 0,145 gr

$M$  = masa atómica = 198 gr/mol

$$N = 4,41 \cdot 10^{20} \text{ át}$$

Sección eficaz Au197 =  $98,8 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$

Tiempo de irradiación :

Constante de decaimiento :  $3 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

Número de cuentas

$$C = 5191 \text{ d/min}$$

Fondo

$$C_o = 30 \text{ d/min}$$

Diferencia

$$C_c = 5161 \text{ d/min}$$

Eficiencia

$$\eta = 1,53 \%$$

Actividad

$$A = 336830 \text{ d/min}$$

$$\phi = A / \sigma_{\text{Au197}} (1 - e^{-\lambda t})$$

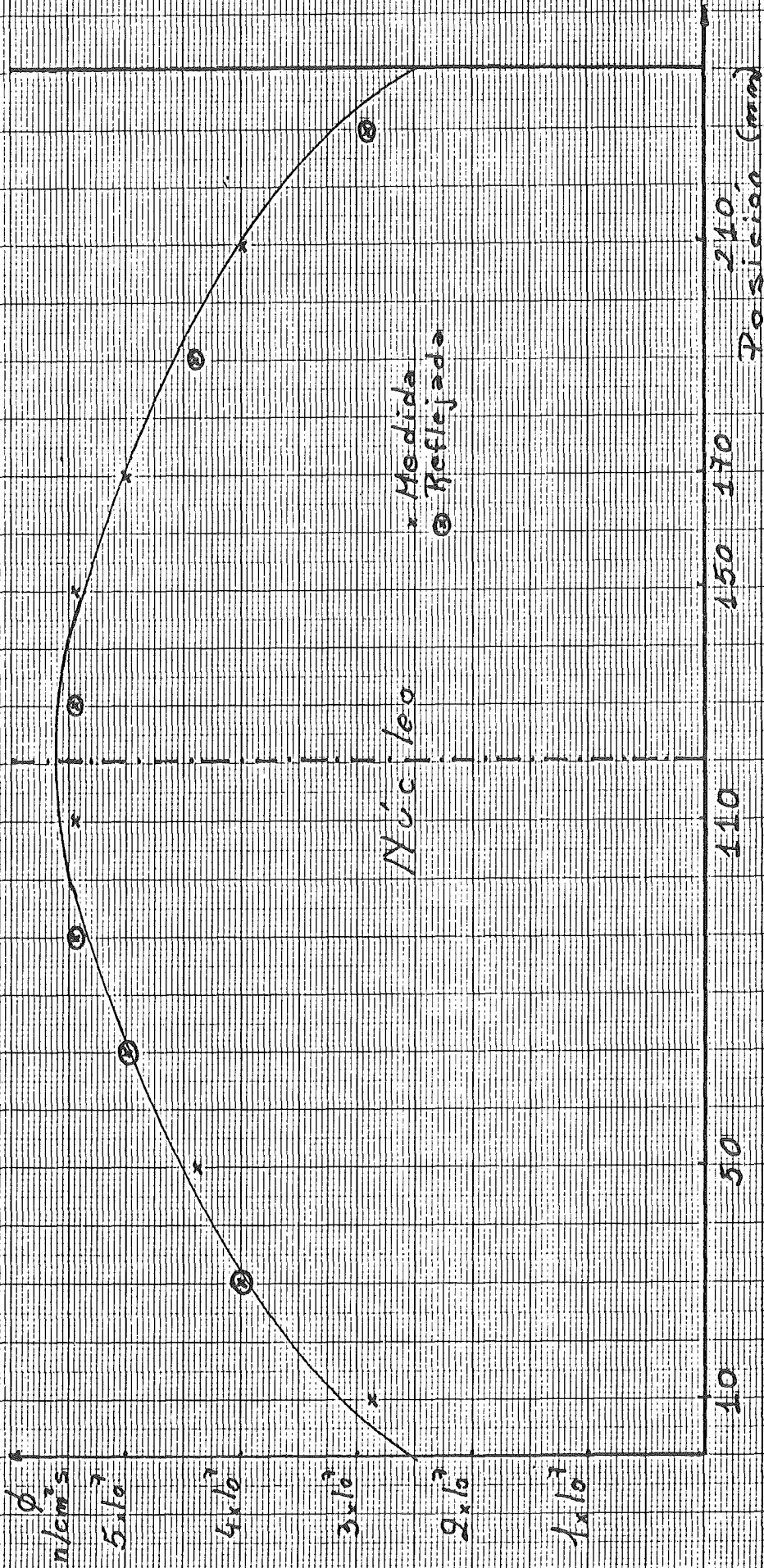
$$\phi = \frac{336830 \text{ d/min}}{98,8 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 4,41 \times 10^{20} (1 - e^{-3 \times 10^{-6} \times 25 \times 60}) \times 60 \text{ seg}}$$

$$\phi = 2,87 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$$

Distribución del flujo

Pastilla Nr	Posición (mm)	Cuentas/min	Actividad d/min	Flujo $n/cm^2 s$
1	10	5191	336830	$2,87 \times 10^7$
2	50	7879	514220	$4,38 \times 10^7$
3	110	9791	637040	$5,43 \times 10^7$
4	150	9783	638480	$5,43 \times 10^7$
5	170	9034	589600	$5,02 \times 10^7$
6	210	7182	468730	$3,99 \times 10^7$

# Distribución de flujo



Medición de la actividad absoluta de hojuelas de Au198

mediante el método de coincidencias  $\beta\gamma$

1. Teoría

Si una muestra emite radiación  $\beta$  y  $\gamma$  simultáneamente (en un intervalo de tiempo menor a  $10^{-9}$  seg), existe un método para medir su actividad absoluta.

Se utilizan dos detectores: uno que detecta sólo partículas  $\beta$ , con una eficiencia  $\eta_\beta$ , y otro que registra sólo partículas gamma, con una eficiencia  $\eta_\gamma$ . Si la actividad absoluta de la muestra es A, entonces los números de cuentas por minuto C serán:

$$(1) \quad \begin{aligned} C_\beta &= A \eta_\beta \\ C_\gamma &= A \eta_\gamma \end{aligned}$$

Si sólo se acumulan los pulsos cuando ambos detectores registran impulsos al mismo tiempo, es decir, cuando existe una coincidencia en la detección de la radiación  $\beta$  y  $\gamma$ , entonces:

$$(2) \quad C_{\beta\gamma} = A \eta_\beta \eta_\gamma$$

Si se reemplazan los valores de las eficiencias según las igualdades (1), se obtiene:

$$(3) \quad A = C_\beta C_\gamma / C_{\beta\gamma}$$

Si existen electrones de conversión, se debe corregir el número de cuentas por minuto correspondiente a las radiaciones beta, no sufriendo alteración el de gamma.

$$(4) \quad \begin{aligned} C_\gamma^{\text{sin conv.}} &= C_\gamma^{\text{incl. conv}} = C_\gamma \\ C_\beta^{\text{incl. conv.}} &= C_\beta^{\text{sin conv.}} + (e_k/\gamma) C_\beta^{\text{sin conv.}} \end{aligned}$$

$$(5) \quad C_\beta^{\text{incl. conv.}} = (1 + (e_k/\gamma)) C_\beta^{\text{sin conv.}}$$

donde :  $e_k / \gamma$  = es la fracción de los electrones de conversión.

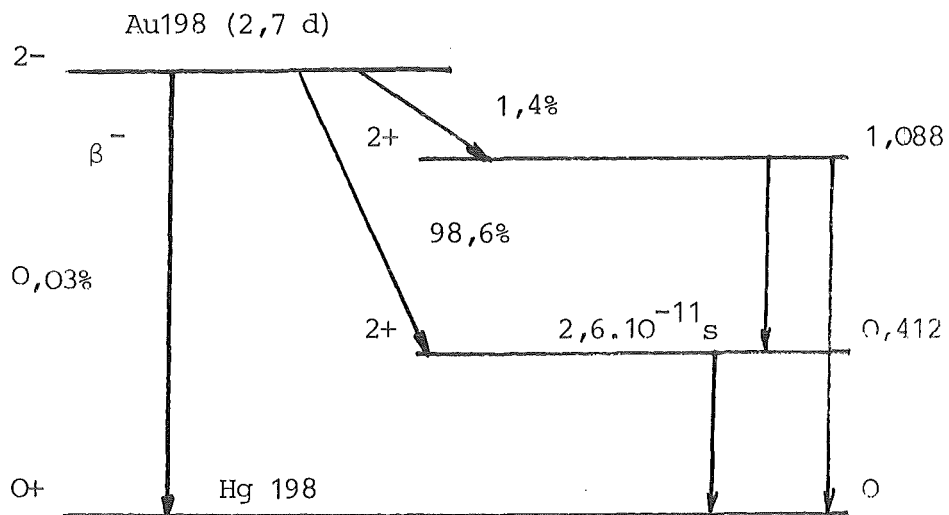
Por lo tanto, para cuando están en coincidencia será:

$$C_{\beta\gamma}^{\text{incl. conv.}} = C_{\beta\gamma}^{\text{sin conv.}} + (e_k / \gamma) (C_{\beta\gamma} + C_{\epsilon\gamma})$$

$$= (1 + 2(e_k / \gamma)) C_{\beta\gamma}$$

$$(6) \quad A = \frac{(e_k / \gamma) + 1}{2(e_k / \gamma) + 1} \cdot \frac{C_{\gamma} C_{\beta}}{C_{\beta\gamma}}$$

Este método se puede aplicar para el Au198 pues, a cada desintegración beta le sigue una emisión gamma en un intervalo de tiempo de  $0,25 \cdot 10^{-9}$  seg., como se observa en el esquema de decaimiento radiactivo:



## 2. Método

Dos muestras de oro idénticas se irradian en el canal I de experimentación, a la altura del centro del núcleo del reactor, durante 5 minutos a una potencia de 1Watt.

Se realizan mediciones con los detectores para obtener el fondo: para el detector gamma, sin la hojuela, y para el detector beta, con la hojuela y un absorbente de plexiglás entre ella y el detector, para medir además la radiación gamma que ésta emite. Como detector gamma se utiliza uno de INa(Tl), y para la radiación beta, uno de plástico.

Una de las hojuelas se coloca entre los dos detectores, y se mide primero con el detector gamma, luego con el beta y luego en coincidencia. Para medir las coincidencias aleatorias, se coloca en cada detector una muestra distinta, y se mide en coincidencia.

Una vez realizadas las mediciones, se corrigen los resultados y se calcula la actividad absoluta.

3. Procedimiento de evaluación

3.1 Medición del número de cuentas de beta

Número de cuentas	$C_{\beta\gamma o} =$	29106	d/min
Medición con absorbente de plexiglás	$C_{\gamma o} =$	730	d/min
Diferencia	$C_{\beta} =$	28376	d/min

3.2 Medición del número de cuentas de gamma

Número de cuentas	$C_{\gamma o} =$	5234	d/min
Fondo	$C_o =$	418	d/min
Diferencia	$C_{\gamma} =$	4816	d/min

3.3 Medición en coincidencia

Número de cuentas	$C_{\beta\gamma, \gamma\gamma, \infty, zz} =$	932	d/min
Con absorbente de plexiglás	$C_{\gamma\gamma, \infty} =$	3	d/min
Coincidencias aleatorias	$C_{zz} =$	11	d/min
Diferencia	$C_{\beta\gamma} =$	918	d/min

3.4 Cálculo de la actividad absoluta

$$A = \frac{e_k / \gamma + 1}{2(e_k / \gamma) + 1} \cdot \frac{C_{\gamma} C_{\beta}}{C_{\beta\gamma}}$$

$e_k / \gamma = 0,030$  para el Au198

$$A = \frac{0,030 + 1}{0,060 + 1} \cdot \frac{4816 \cdot 28376}{918} \text{ d/min}$$

$$A = 1,446 \times 10^5 \text{ d/min}$$

4. Determinación de la eficiencia de un detector para una muestra de Au198

Conocida la actividad absoluta de la muestra de Au198 mediante el método de coincidencias, se mide el número de cuentas con el detector cuya eficiencia se quiere obtener y se calcula la relación :

$$(7) \quad \eta = \frac{C}{A}$$

$$\eta = \frac{28376 \text{ d/min}}{1,446 \cdot 10^5 \text{ d/min}} = 20\%$$





Determinación de la eficiencia de un detector  
para Cu64 en función de la actividad de saturación  
del Au198

1. Teoría

Se denomina eficiencia  $\eta$  de un detector a la relación entre el número de cuentas registradas y la actividad de la muestra:

$$(1) \quad \eta = \frac{C}{A}$$

La eficiencia es función del detector, de las características del material y del ángulo sólido formado por el detector y la muestra.

Se puede calcular la eficiencia del detector para un cierto material a partir de la actividad de saturación de otro material.

Si se irradia un par de hojuelas de Au198 y Cu64 en un flujo térmico, las actividades de saturación de ambas muestras serán:

$$(2) \quad A_{Au} = N_A \cdot m_{Au} \cdot \sigma_{Au}^{th} \cdot \phi_{th} / M_{Au}$$

donde:  $N_A$  es el número de Avogadro =  $6,02 \cdot 10^{23}$  át/mol

$m_{Au}$  es la masa de la muestra

$\sigma_{Au}^{th}$  es la sección eficaz = 98,8 barns

$\phi_{th}$  es el flujo térmico

$M_{Au}$  es el peso atómico del Au

Por lo tanto:  $N_A \cdot \sigma_{Au}^{th} / M_{Au} = 0,303 \text{ cm}^2/\text{gr}$

reemplazando en (2)

$$(3) \quad A_{Au} = 0,303 m_{Au} \cdot \phi_{th}$$

Repitiendo el procedimiento para el Cu64 y teniendo en cuenta que su sección eficaz es 4,4 barns se obtiene

$$(4) \quad N_A \cdot \sigma_{Cu}^{th} / M_{Cu} = 0,0297 \text{ cm}^2/\text{gr}$$

Por lo tanto la actividad de saturación del cobre será de:

$$(5) \quad A_{Cu} = 0,0297 m_{Cu} \phi_{th}$$

Si se calcula la relación entre (3) y (5) se puede obtener la actividad de saturación del Cu64 en función de la del Au198.

$$(6) \quad \sigma_{Cu}^{th} \cdot M_{Au} / M_{Cu} \cdot \sigma_{Au}^{th} = 0,098$$

Por lo tanto :

$$(7) \quad A_{Cu} = 0,098 \cdot m_{Cu} \cdot A_{Au} / m_{Au}$$

Conociendo la duración de la irradiación y el tiempo transcurrido desde la finalización de la misma hasta la medición, se puede calcular la actividad de la muestra, y , mediante la relación (1), la eficiencia del detector.

## 2. Método

Se irradia un par de hojuelas de oro y cobre en la columna térmica del reactor durante una hora a una potencia de 1 Watt.

Luego se mide la actividad de la muestra de oro y se calcula su actividad de saturación. Para medir la muestra de cobre se debe esperar una hora, pues como está también activo el  $\text{Cu}66$ , cuya vida media es de 5,1 min., se debe esperar que éste decaiga para obtener resultados correctos.

Conocido el número de cuentas por minuto del cobre, se obtiene su actividad de saturación mediante la relación (7), con ella se obtiene su actividad y mediante la relación (1), la eficiencia del detector.

### 3. Procedimiento de evaluación

#### 3.1 Determinación de la actividad de saturación del Au198

Número de cuentas por minuto	C =	736	d/min
Fondo	C <sub>o</sub> =	30	d/min
Número de cuentas corregido	C <sub>c</sub> =	706	d/min
Eficiencia del detector	η =	6	%
Actividad de la muestra	A =	11766	d/min

Actividad de saturación en desintegraciones por segundo:

$$A_{Au}^{th} = \frac{A}{(1 - e^{-\lambda t_1}) \cdot e^{-\lambda t_2} \cdot 60 \text{seg}}$$

donde  $\lambda = \ln 2 / T$   $T = 64,8h$  : es el período de decaimiento

$t_1$  = duración de la irradiación

$t_2$  = tiempo transcurrido desde el fin de la irradiación hasta la medición

$$A_{Au}^{th} = \frac{11766 \text{ d/min}}{\left(1 - e^{-\frac{\ln 2 \times 1h}{64,8h}}\right) \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 5 \text{min}}{64,8 \cdot 60}} \cdot 60 \text{seg}}$$

$$A_{Au}^{th} = 18431 \text{ d/seg}$$

### 3.2 Determinación de la actividad de saturación del Cu64

$$A_{\text{Cu}}^{\text{th}} = 0,098 \cdot m_{\text{Cu}} \cdot A_{\text{Au}}^{\text{th}} / m_{\text{Au}}$$

$$A_{\text{Cu}}^{\text{th}} = \frac{0,098 \cdot 0,0664 \text{ gr} \cdot 18431 \text{ d/s}}{0,178 \text{ gr}}$$

$$A_{\text{Cu}}^{\text{th}} = 674 \text{ d/s}$$

### 3.3 Determinación de la actividad del Cu64

$$A_{\text{Cu}} = A_{\text{Cu}}^{\text{th}} \cdot (1 - e^{-\lambda t_1}) \cdot e^{-\lambda t_2}$$

donde  $T = 12,7\text{h}$  es el período de desintegración del Cu64

$$A_{\text{Cu}} = 674 \frac{\text{d}}{\text{s}} \left(1 - e^{-\frac{\ln 2 \cdot 1\text{h}}{12,7\text{h}}}\right) \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot 5}{12,7 \cdot 60}}$$

$$A_{\text{Cu}} = 36 \text{ d/s}$$

### 3.4 Determinación de la eficiencia del detector

Número de cuentas por minuto  $C = 124 \text{ d/min}$

Fondo  $C_0 = 30 \text{ d/min}$

Número de cuentas corregido  $C_c = 94 \text{ d/min}$

$$\text{Eficiencia} = \frac{C_c}{A_{\text{Cu}}}$$

$$\eta = \frac{94 \text{ d/min}}{36 \times 60 \text{ d/min}} = 0,04$$

$$\eta = 4\%$$



Determinación de los flujos térmico y epitérmico

1. Teoría

Quando se coloca una muestra en el reactor, su actividad se deberá a neutrones cuyas energías se encuentran en los rangos térmicos y epitérmicos.

$$(1) \quad A = \alpha_{th} \phi_{th} + \alpha_{epi} \phi_{epi}$$

donde  $\alpha_{th}$  y  $\alpha_{epi}$  son constantes de proporcionalidad, que dependen del material, de su sección eficaz y de su integral de resonancia.

Si una muestra se coloca en el reactor bajo cadmio, es decir, entre láminas de Cd, éste absorberá los neutrones cuyas energías se encuentren bajo un cierto umbral ( 0,5 eV para un espesor de 0,8 mm). Por lo tanto, la actividad de la muestra se deberá sólo a los neutrones epitérmicos.

Si se colocan juntas dos muestras de distinto material, cada uno se activará de distinta forma frente a los neutrones epitérmicos y térmicos. Si estos materiales son Au198 y Cu64, la relación entre sus actividades será:

$$(2) \quad \begin{pmatrix} A_{Au} \\ A_{Cu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \phi_{th} \\ \phi_{epi} \end{pmatrix}$$

donde:  $\alpha_{11} = N_o \cdot \sigma_{th}(Au)$

$\alpha_{12} = N_o \cdot I(Au)$

Resolviendo las ecuaciones para obtener los flujos:

$$(3) \quad \phi_{th} = \frac{1 \cdot A_{Au} \frac{\alpha_{22}}{\alpha_{12}} - A_{Cu}}{N_o(Au) \cdot \sigma_{th}(Au) \frac{\alpha_{22}}{\alpha_{12}} - \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{11}}}$$



$$(4) \quad \phi_{\text{epi}} = \frac{1}{N_{\text{O}}(\text{Au}) \cdot I(\text{Au})} \cdot \frac{A_{\text{Cu}} \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{11}} A_{\text{Au}}}{\frac{\alpha_{22}}{\alpha_{21}} - \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{11}}}$$

Para obtener los valores de las relaciones entre las constantes, se realiza una irradiación auxiliar. En ella se coloca un par de muestras desnudas en la columna térmica, con lo cual la actividad se deberá sólo a los neutrones térmicos.

$$(5) \quad \begin{aligned} A_{\text{Au}}^{\text{th}} &= \alpha_{11} \phi_{\text{th}} \\ A_{\text{Cu}}^{\text{th}} &= \alpha_{21} \phi_{\text{th}} \end{aligned}$$

o sea

$$\frac{A_{\text{Au}}^{\text{th}}}{A_{\text{Cu}}^{\text{th}}} = \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{21}}$$

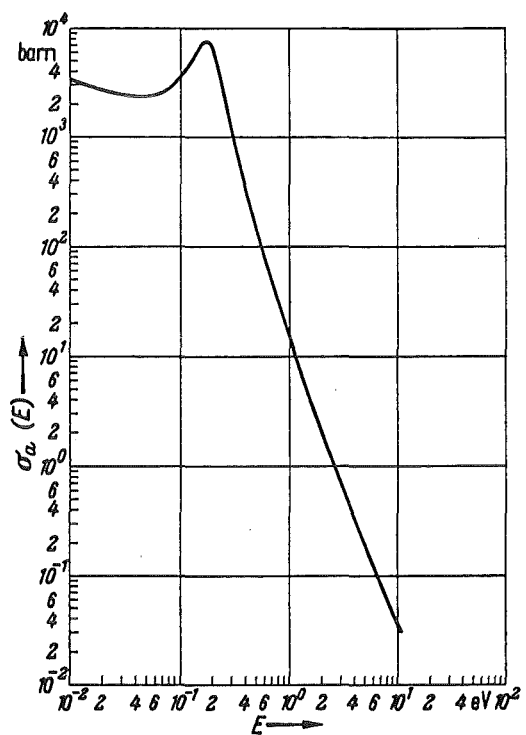
También se coloca un par de muestras bajo cadmio en el núcleo del reactor, cuya actividad se deberá a los neutrones epitérmicos:

$$(6) \quad \begin{aligned} A_{\text{Au}}^{\text{epi}} &= \alpha_{12} \phi_{\text{epi}} \\ A_{\text{Cu}}^{\text{epi}} &= \alpha_{22} \phi_{\text{epi}} \end{aligned}$$

$$\frac{A_{\text{Cu}}^{\text{epi}}}{A_{\text{Au}}^{\text{epi}}} = \frac{\alpha_{22}}{\alpha_{12}}$$

Una vez conocidos estos valores, se irradian las muestras desnudas en el núcleo del reactor, se calculan sus actividades de saturación y, con ellas, los flujos térmicos y epitérmicos.

Fig.: Sección eficaz de absorción del Cadmio  
en función de la energía neutrónica.



## 2. Método

Se realiza la irradiación auxiliar de referencia con un par de muestras desnudas en la columna térmica y un par bajo cadmio en el núcleo durante una hora a una potencia de 1 Watt.

Debido a que también se activa el Cu66, cuya vida media es de 5,1 min, se debe esperar como mínimo una hora antes de medir la actividad del Cu64, para que la del Cu66 haya decaído. Se miden los números de cuentas por minuto de las muestras con detectores cuya eficiencia sea conocida, se calculan las actividades de saturación y, con ellas, las relaciones (5) y (6).

Luego se realiza otra irradiación, donde se colocan pares de muestras desnudas en el núcleo del reactor, en el canal I de experimentación, dentro de un dispositivo de plexiglás, para fijar su posición. Se las irradia durante una hora a una potencia de 1 Watt. Se procede de la misma forma para obtener las actividades de saturación y con ellas y las relaciones obtenidas en la otra irradiación, se calculan los flujos térmicos y epitérmicos.

3. Procedimiento de evaluación

3.1 Irradiación auxiliar

3.1.1 Columna térmica

3.1.1.1 Muestra de Au198

Cuentas por minuto	C =	736	d/min
Fondo	C <sub>o</sub> =	30	d/min
Diferencia	C <sub>c</sub> =	706	d/min
Eficiencia del detector	η =	6%	
Actividad	A =	11766	d/min

Actividad de saturación:

$$A_{Au}^{th} = \frac{A \cdot e^{\ln 2 \cdot t_2/T}}{(1 - e^{-t_1 \ln 2/T})}$$

T : 64,8h período de desintegración radiactiva del Au198

$$A_{Au}^{th} = \frac{11766 \cdot e^{\ln 2 \cdot 5 / 64,8 \cdot 60}}{(1 - e^{-\frac{\ln 2 \cdot 1h}{64,8h}}) \cdot 60 \text{seg}}$$

$$A_{Au}^{th} = 18431 \text{ d/seg}$$

3.1.1.2 Muestra de Cu64

$$A_{Cu}^{th} = \frac{\sigma_{Cu}^{th} \cdot M_{Au} \cdot m_{Cu} \cdot A_{Au}^{th}}{\sigma_{Au} \cdot M_{Cu} \cdot m_{Au}}$$

$$A_{Cu}^{th} = \frac{0,098 \cdot 0,0684 \cdot 18431}{0,178} = 674 \text{ d/s}$$

$$\frac{A_{Au}^{th}}{A_{Cu}^{th}} = \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{21}} \quad \alpha_{21} = \frac{18431}{674} = 27$$

3.1.2 Actividad epitémica

3.1.2.1 Muestra de Au198

Número de cuentas	C = 10386 d/min
Fondo	C <sub>0</sub> = 30 d/min
Diferencia	C <sub>c</sub> = 10356 d/min
Eficiencia del detector	η = 2,61%
Actividad	A = 10386 d/min

Actividad de saturación:

$$A_{Au}^{epi} = \frac{A \cdot e^{-t_2} \ln 2 / T}{1 - e^{-t_1} \ln 2 / T} = 6,239 \cdot 10^5 \text{ d/s}$$

3.1.2.2 Muestra de Cu64

Número de cuentas	C = 725 d/min
Fondo	C <sub>0</sub> = 30 d/min
Diferencia	C <sub>c</sub> = 695 d/min
Eficiencia del detector	η = 3,14%
Actividad	= 22134 d/min

Actividad de saturación T = 12,7h

$$A_{Cu}^{epi} = 740 \text{ d/s}$$

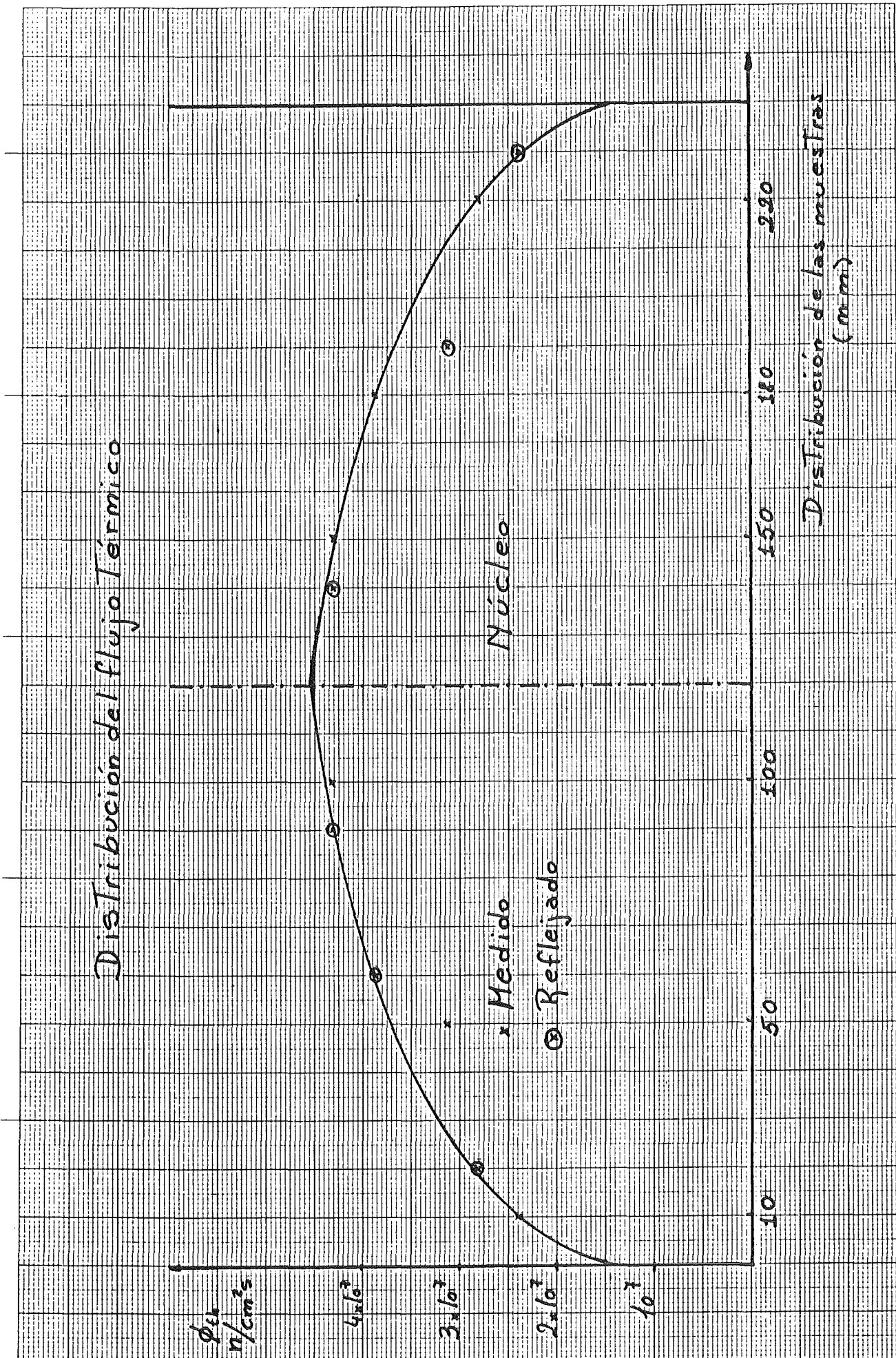
$$\frac{A_{Cu}^{epi}}{A_{Au}^{epi}} = \frac{\alpha_{22}}{\alpha_{12}} = 1,186 \cdot 10^{-3}$$

Posición (mm)	$C_{C\text{Au}}$ (d/s)	$A_{\text{Au}}$ (d/s)	$A_{\text{Au}}^{\infty}$ (d/s)	$C_{\text{CCu}}$ (d/s)	$A_{\text{Cu}}$ (d/s)	$A_{\text{Cu}}^{\infty}$ (d/s)
10	144,7	10719	$1,011 \cdot 10^6$	104	1575	31670
50	216,3	16020	$1,511 \cdot 10^6$	157,4	2389	48258
100	156	19518	$1,841 \cdot 10^6$	105,3	3643	68730
150	155	19422	$1,832 \cdot 10^6$	104	3348	68370
180	138	17214	$1,624 \cdot 10^6$	91	2925	60115
220	170	12562	$1,185 \cdot 10^6$	126,5	1918	39640

3.2 Actividad de saturación de las muestras

3.3 Cálculo de flujos

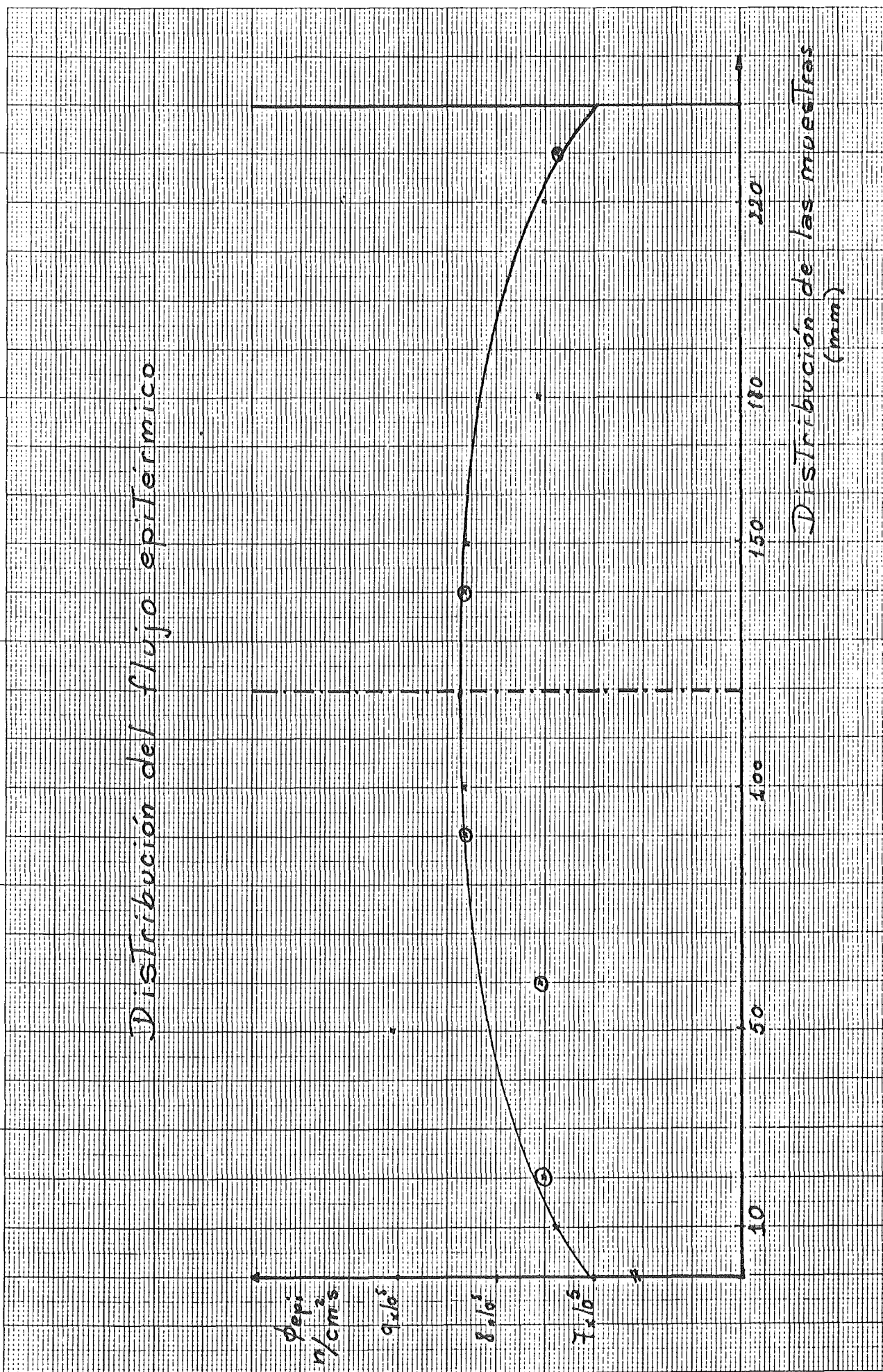
Posición (nm)	$A_{Au}$ (d/s.)	$A_{Cu}$ (d/s.)	$\frac{\alpha_{22}}{\alpha_{12}} \frac{A_{Au}}{A_{Cu}} - \frac{A_{Cu}}{A_{Cu}}$ (d/s.)	$\phi_{th}$ (n/cm <sup>2</sup> s)	$A_{Cu} - \frac{\alpha_{21}}{\alpha_{11}} A_{Au}$ (d/s.)	$\phi_{epi}$ (n/cm <sup>2</sup> s)
10	$1,011 \times 10^6$	31670	$1,503 \times 10^5$	$1,383 \times 10^7$	$-2,142 \times 10^7$	$7,385 \times 10^5$
50	$1,511 \times 10^6$	48258	$2,237 \times 10^5$	$2,120 \times 10^7$	$-3,201 \times 10^7$	$1,057 \times 10^6$
100	$1,841 \times 10^6$	68730	$2,626 \times 10^5$	$3,275 \times 10^7$	$-3,899 \times 10^7$	$8,28 \times 10^5$
150	$1,832 \times 10^6$	68370	$2,614 \times 10^5$	$3,272 \times 10^7$	$-3,880 \times 10^7$	$8,281 \times 10^5$
180	$1,624 \times 10^6$	60115	$2,322 \times 10^5$	$2,876 \times 10^7$	$-3,440 \times 10^7$	$7,605 \times 10^5$
220	$1,185 \times 10^6$	39640	$1,737 \times 10^5$	$1,794 \times 10^7$	$-2,510 \times 10^7$	$7,484 \times 10^5$





# Distribución del flujo epitérmico

# Distribución de las muestras (mm)



Determinación de la densidad de flujo de neutrones rápidos  
mediante sondas de azufre.

1. Teoría

Se puede determinar la densidad de neutrones rápidos mediante ciertas reacciones nucleares como  $(n, 2n)$ ,  $(n, n)$ ,  $(n, \alpha)$ , etc. La característica principal de estas reacciones es que tienen lugar sólo para altas energías mayores a una energía umbral  $E_s$ . Debido a ello las sustancias que generan estas reacciones son denominadas sondas umbrales. Midiendo su actividad, se puede calcular el flujo de los neutrones rápidos.

La actividad de saturación de una sonda umbral es :

$$(1) \quad A = N_o \int_{E_s}^{\infty} \sigma_{act}(E) \cdot \phi(E) dE$$

donde:

$N_o$  es la densidad atómica de la muestra

$\sigma_{act}(E)$  es la sección eficaz de la activación en función de la energía neutrónica

Se puede definir una energía efectiva  $E_{ef}$  de tal forma que la sección eficaz se puede reemplazar por una función escalón para la cual:

$$(2) \quad \sigma_{act} \begin{cases} 0 & \text{para } E < E_{ef} \\ \sigma_o & \text{para } E > E_{ef} \end{cases}$$

Si se reemplaza en (1) se obtiene

$$(3) \quad A = N_o \sigma_o \int_{E_f}^{\infty} \phi(E) dE$$

La integral es la densidad de flujo integrada para las energías mayores a  $E_f$ , por lo tanto, es el flujo de los neutrones rápidos, o sea:

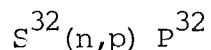
$$(4) \quad \phi_s = \sigma_{Ef} \phi(E) dE$$

O sea que:

$$(5) \quad A = N_o \sigma_o \phi_s$$

## 2. Método

El material elegido para la sonda es el azufre, que sufre una reacción :



Los datos de esta reacción se encuentran en la tabla 1.

Se utilizan pastillas de azufre. Se las pesa y se seleccionan las que tienen una masa similar. Se las coloca en un dispositivo de plexiglás, que fija su posición en el reactor. Este se introduce en el canal I de experimentación . Se irradian las pastillas durante 90 minutos a una potencia de 1 Watt.

Luego se mide la actividad de una de las pastillas entera y pulverizada. La notable diferencia que se encuentra se debe a la autoabsorción que existe en las pastillas por su gran espesor. Por ello se deben roler muy bien las pastillas y distribuírlas lo más finamente posible sobre las bandejas. Hay que tener la precaución de tratar de que la menor cantidad de azufre quede en el mortero, para que no varíe la masa que se obtuvo al pesarlas.

Una vez obtenido el número de cuentas por minuto, se obtiene el flujo rápido mediante la expresión:

$$(6) \quad \phi_s = \frac{C \cdot e^{t_2 \cdot \ln 2 / T}}{\eta \cdot N_o \cdot \sigma_o \cdot (1 - e^{-t_1 \cdot \ln 2 / T})}$$

donde:

C es el número de cuentas por minuto

T es el período de desintegración radiactivo

$t_1$  es la duración de la irradiación

$t_2$  es el tiempo transcurrido desde el final de la irradiación hasta la medición

$\eta$  es la eficiencia del detector

La expresión para calcular la densidad neutrónica de la sonda es la siguiente:

$$(7) \quad N_O = \frac{N_A \cdot H \cdot m}{M}$$

donde:

$N_A$  es el número de Avogadro =  $6,02 \cdot 10^{23}$  át/mol

H es la abundancia isotópica del material de la sonda

m es la masa de la sonda en gramos

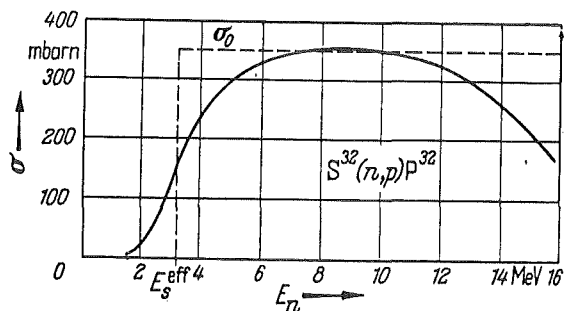
M es el peso atómico del material de la sonda

Una vez obtenidos los flujos para cada pastilla, se los grafica en función a la posición, para obtener la distribución del flujo rápido en el reactor

Tabla No 1. Reacción  $S^{32}(n,p)P^{32}$

Abundancia isotópica	H = 0,95
Período radiactivo	T = 14,2 días
Energía umbral	$E_s = 0,95$ MeV
Energía efectiva	$E_{ef} = 3,2$ MeV
Sección eficaz	$\sigma = 0,35$ barn
Sección eficaz escalón	$\sigma_o = 66$ mbarn

Fig. 1 - Sección eficaz de la reacción  $S^{32}(n,p)P^{32}$  en función de la energía neutrónica



3. Mediciones

Pastilla No. 11

Masa: 0,420 gr

Duración de la irradiación: 90 min

Posición en el reactor: 2 cm

Eficiencia del detector: 52%

Fondo: 66 d/min

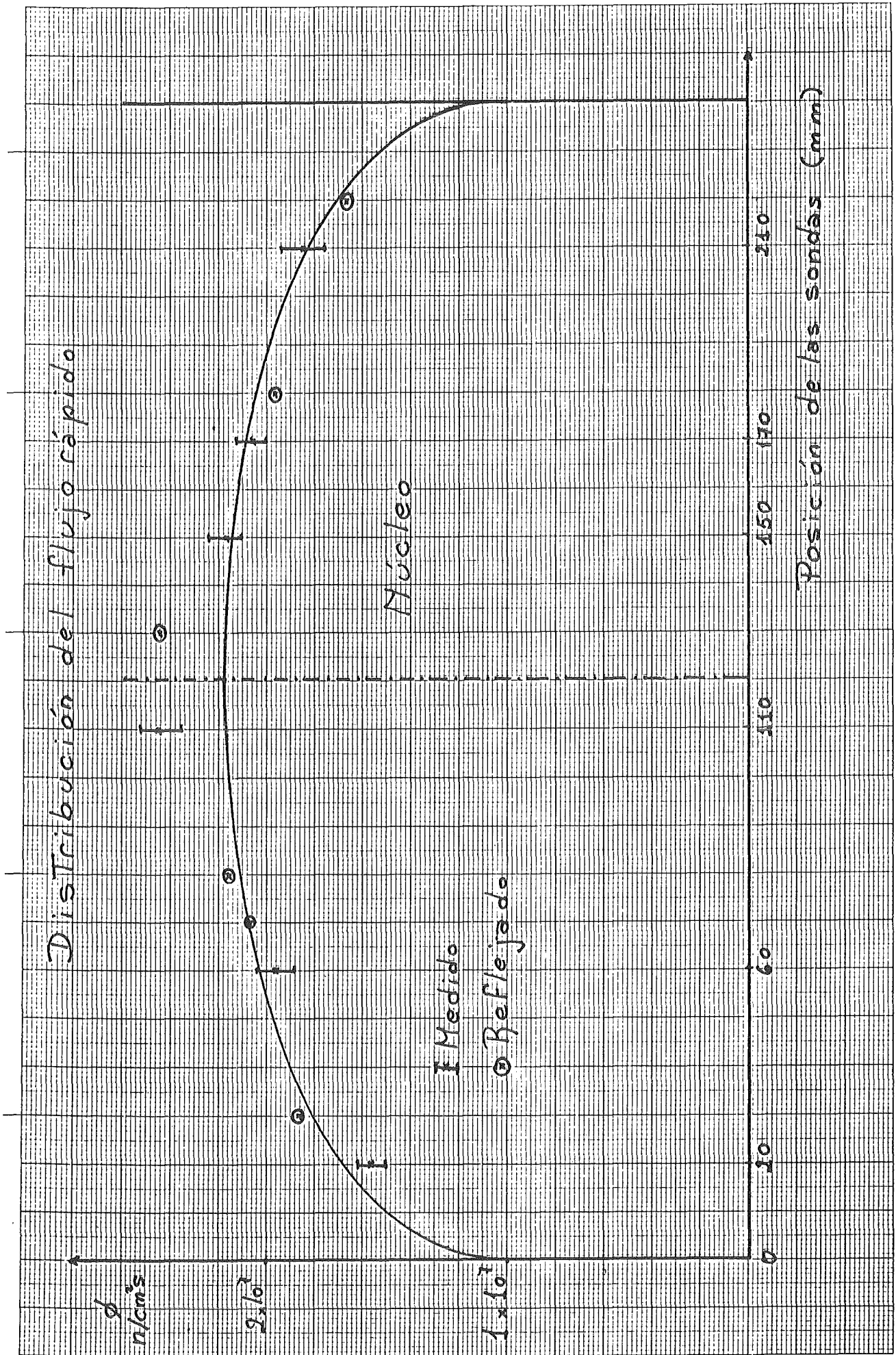
$t_2$ (min)	C (d/min)	$C_c = C - F$ (d/min)
29	795	729
30	784	718
31	828	762
32	812	746
33	822	756
35	812	746
36	766	700
37	843	777
38	767	701

$$\bar{C} = 741 \pm 28 \text{ d/min} = 12,35 \pm 0,47 \text{ d/s}$$

$$A = \frac{29,42 \text{ d/gr}}{0,52} = 56,58 \text{ d/sgr}$$

$$A_{\infty} = 56,58 \left(1 - e^{-\frac{0,2 \times 90 \text{ min}}{14,2 \times 24 \times 60 \text{ min}}}\right)^{-1} = 18574 \text{ d/sgr}$$

$$\phi = \frac{18574 \text{ d/sgr}}{1,787 \times 10^{22} \text{ át/gr} \times 66 \times 10^{-27} \text{ b}} = 1,57 \times 10^7 \text{ n/sec.cm}^2$$



Medición de la intensidad neutrónica en  
un canal de experimentación.

1. Teoría

El reactor SUR 100 posee 5 canales de experimentación. La intensidad neutrónica en ellos se deberá a los neutrones que son emitidos en su dirección y a los que son reflejados hacia él por el moderador.

Si se coloca una barra de material difusor en el canal, ésta actuará como una fuente isotrópica, reflejando los neutrones que llegan a ella. La intensidad de esta "fuente" se puede medir mediante un detector.

El número de neutrones que será reflejado es proporcional al número de colisiones y al ángulo sólido  $d\Omega$  en que los neutrones pueden ser detectados.

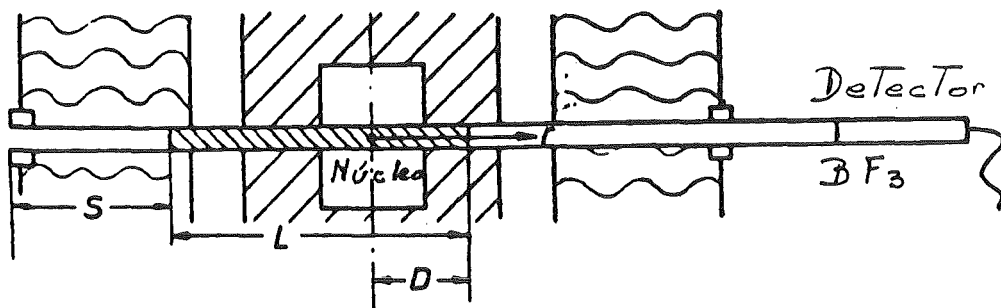


Fig. 1 - Disposición de los elementos durante la experiencia.

La probabilidad de que un neutrón no colisione en una distancia  $D-r$  (ver fig. 1), es  $e^{-\Sigma_s (D-r)}$  donde  $\Sigma_s$  es la sección eficaz de difusión.



La intensidad  $dQ$  que producirá un difusor de volumen  $dV$  será :  $\Sigma_s dV Q(r)$ . Se tiene entonces que:

$$(1) \quad dQ(r,D) = \Sigma_s dV \phi(r) e^{-\Sigma_s(D-r)}$$

Si  $F$  es la rección del reflector,

$$(2) \quad dV = F dr$$

entonces

$$(3) \quad Q(D) = \int_{-\infty}^D \Sigma_s F dr \phi(r) e^{-\Sigma_s(D-r)} d\Omega$$

Si el detector se encuentra suficientemente alejado se puede considerar que el ángulo sólido es constante. El flujo toma los siguientes valores:

$$(4) \quad \phi(r) \begin{cases} \cos(\pi r/2R) & \text{para } |r| < R \\ 0 & \text{para } |r| > R \end{cases}$$

Reemplazando en (3) e integrando, se obtiene la expresión:

$$(5) \quad Q(D) = \frac{\text{cte } \Sigma_s}{\Sigma_s^2 + \left(\frac{\pi}{2R}\right)^2} \cdot \left\{ \Sigma_s \cos \frac{\pi D}{2R} + \frac{e^{-\Sigma_s(D+r)}}{\Sigma_s^2 + \left(\frac{\pi}{2R}\right)^2} + \frac{\frac{\pi}{2R} \text{ sen } \frac{\pi D}{2R}}{\Sigma_s^2 + \left(\frac{\pi}{2R}\right)^2} \right.$$

Dado que  $D$  es positivo, la exponencial es menor que 1, despreciándose el segundo término.

Si se deriva la expresión (5) respecto de  $D$ , se obtiene el máximo de la distribución en  $D = 1 / \Sigma_s$ . De ello podemos calcular el valor de la sección eficaz de difusión del material reflector.

## 2. Método

Se coloca un detector de  $\text{BF}_3$  en un extremo del canal y se eleva la potencia hasta que el reactor esté crítico, con las dos barras extraídas.

Luego se inserta la barra moderadora en el otro extremo del canal. Se compensa mediante la barra 2 el aumento de reactividad, conservando la potencia un valor constante.

Se realizan dos mediciones en esa posición: una con el detector desnudo y otra, con el detector recubierto con cadmio. Esta segunda medición es muy delicada, debido a la baja intensidad epitérmica.

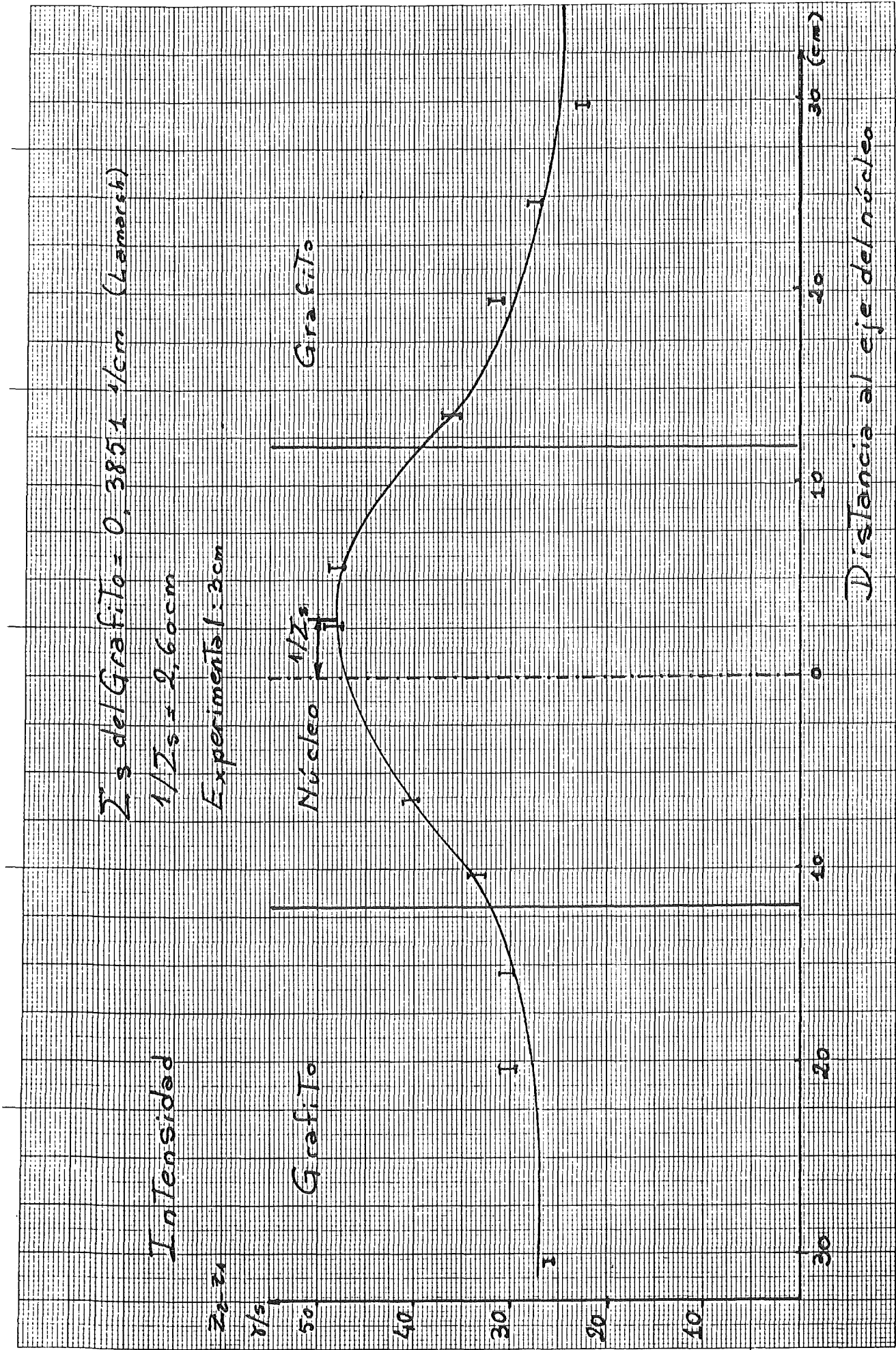
Se calcula la intensidad térmica como la diferencia entre las dos mediciones, y se la grafica en función de la posición de la barra difusora.

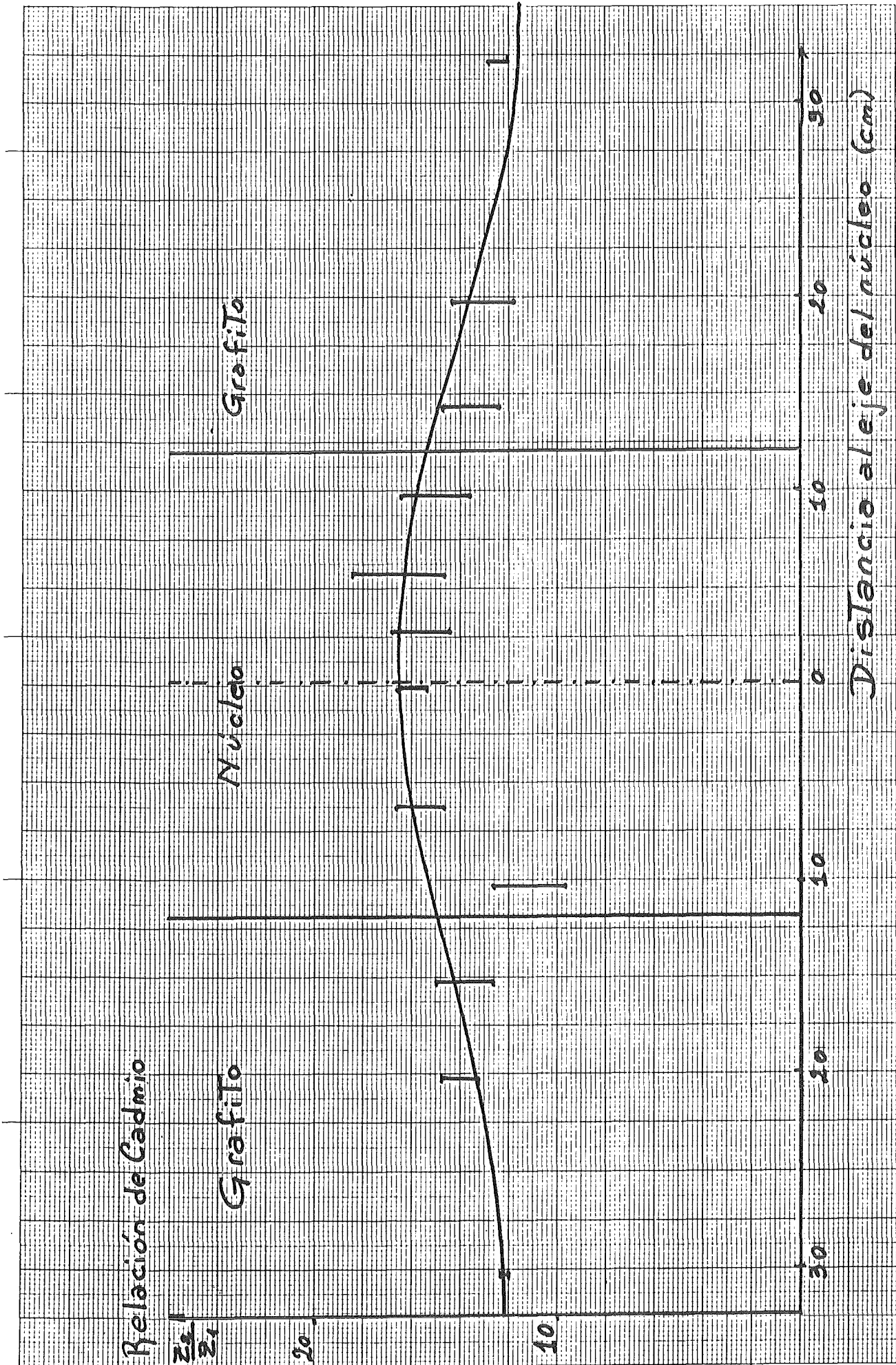
Luego se coloca la barra en una nueva posición, repitiéndose el procedimiento.

La sección eficaz de dispersión del material moderador se obtiene como la inversa de la distancia que existe entre el centro del núcleo y la posición de la barra para la cual la distribución es máxima.

3. Mediciones.

Distancia (mm)	Posición barras		$Z_2$ sin Cd ( $\gamma/s$ )	$Z_1$ con Cd ( $\gamma/s$ )	$Z_1 - Z_2$ ( $\gamma/s$ )	$Z_1/Z_2$
	1 (mm)	2 (mm)				
Sin Grafito	250	250	29,33	2,09	27,24	14,03
	251	248	$\pm 2,25$	$\pm 0,11$	$\pm 2,36$	
30	251	248	28,61	2,24	26,37	12,77
		246	$\pm 0,37$	$\pm 0,01$	$\pm 0,38$	$\pm 0,22$
20	251	244	32,66	2,31	30,35	14,14
		241	$\pm 0,51$	$\pm 0,09$	$\pm 0,60$	$\pm 0,77$
15	251	234	32,51	2,35	30,16	13,83
		232	$\pm 0,08$	$\pm 0,20$	$\pm 0,28$	$\pm 0,21$





## Calibración de las placas de control.

### 1. Teoría.

Se denomina tiempo de generación medio al tiempo promedio que transcurre desde que  $n$  neutrones son liberados en una fisión hasta que son nuevamente absorbidos, generando nuevas fisiones, en las cuales se liberan  $kn$  neutrones, donde  $k$  es el factor de multiplicación.

En una fisión, más del 99% de los neutrones son liberados inmediatamente, son los denominados neutrones prompt. Los restantes son liberados en tiempos que se encuentran entre los 0,3 y los 80 segundos y se denominan neutrones retardados. Estos neutrones hacen posible el control de los reactores nucleares. En la tabla 1 se encuentran características de estos neutrones.

La teoría simple, tomando en cuenta sólo los neutrones prompt, muestra que la densidad de neutrones prompt en el tiempo se escribe mediante la ecuación diferencial:

$$(1) \quad \frac{dn}{dt} = \frac{(k - 1) n}{l_p}$$

$$(2) \quad n = n_0 e^{(k - 1) t / l_p}$$

Se denomina período del reactor a la relación :

$$(3) \quad T = l_p / (k-1)$$

que es el tiempo que tarda la población del reactor en variar  $e$  veces.

Si se incluyen los neutrones retardados en el tiempo de generación medio, éste aumenta considerablemente.

Sea  $C_i$  la densidad de los precursores,  $\lambda_i$  la vida media y  $\beta_i$  la fracción de los neutrones que aparecen en el  $i$ -ésimo grupo :

$$(4) \quad \frac{dn}{dt} = \frac{k(1-\beta) - 1}{l} \cdot n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

$$(5) \quad \frac{dC_i}{dt} = \frac{k\beta_i n}{l} - \lambda_i C_i$$

$$i = 1, 2, \dots, 6$$

Se obtienen 7 soluciones acopladas, cuyas soluciones serán del tipo:

$$(6) \quad n(t) = A e^{\omega t} \quad C_i = C_{i0} e^{\omega t}$$

$$i = 1, \dots, 6$$

Reemplazando en (4) y reordenando, se obtiene la ecuación

INHOUR

$$(7) \quad \frac{k-1}{k} = \frac{\omega l}{1 + \omega l} + \frac{1}{1 + \omega l} \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\lambda_i + \omega}$$

Se denomina reactividad a la relación:

$$(8) \quad \rho = \frac{k-1}{k}$$

La unidad de la reactividad es el dolar, que es la reactividad necesaria para pasar de  $\rho = 0$  a  $\rho = \beta$

$$(9) \quad 1 \text{ \$} = \rho / \beta$$

$$(10) \quad 1 \text{ centavo} = 0,01 \text{ \$}$$

La solución de la ecuación puede observarse en el gráfico 1

y es :

$$(11) \quad n(t) = \sum_{i=0}^6 A_i e^{\omega_i t}$$

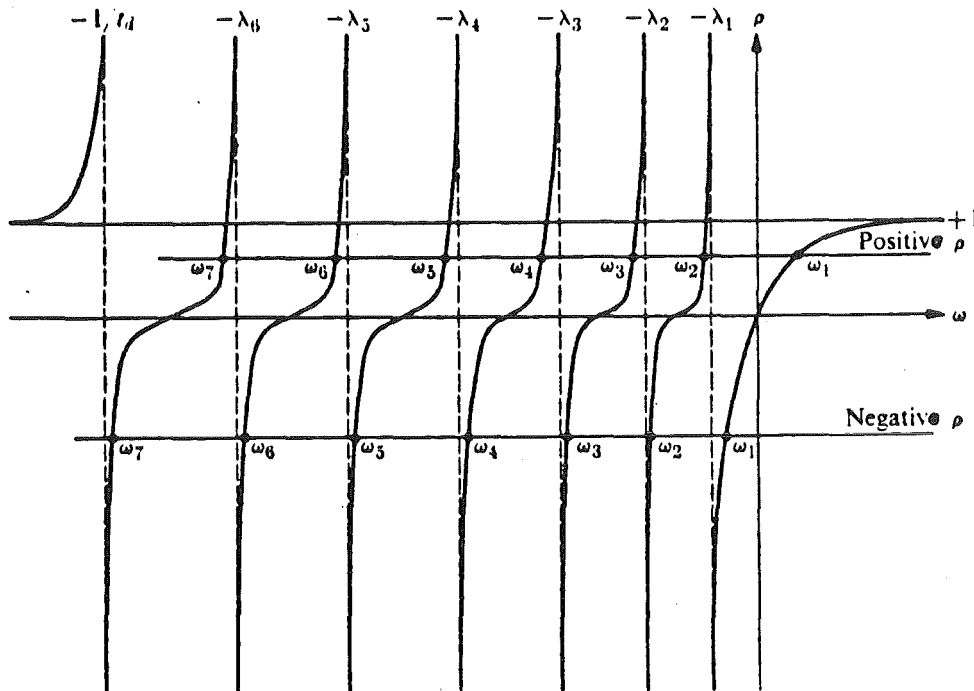
Si  $k < 1$ , entonces  $\rho < 0$ , la población del reactor disminuye : el reactor está subcrítico.

Si  $k = 1$ , entonces  $\rho = 0$ , la población se mantiene constante: el reactor está crítico.

Si  $k > 1$ , entonces  $\rho > 0$ , la población del reactor aumenta: el reactor está supercrítico

Las barras de control de un reactor se utilizan para regular la población de neutrones. Están construídas de un material absorbente, por ejemplo cadmio o boro, de modo que al se introducidas o retiradas del reactor, varíe la reactividad. Estas barras deben calibrarse para conocer la variación de la reactividad en función de la posición de las barras.

Fig. 1 - Solución de la ecuación inhour.





## 2. Método.

Existen varios métodos conocidos para calibrar barras de control. El método más utilizado para medir pequeñas reactividades es el de la medición del tiempo de duplicación. Es el tiempo que tarda el flujo en duplicar su valor.

Al comenzar la experiencia, las barras de control se encuentran totalmente insertas y la fuente de neutrones, retirada. No se modifica la posición de la barra a calibrar, utilizándose la otra para poner a crítico el reactor. Cuando éste se estabiliza, se varía la posición de la barra a calibrar. De esta forma el reactor se torna supercrítico, y el flujo aumenta. Se mide el tiempo de duplicación para distintos intervalos y con él se calcula la variación de reactividad con la ecuación inhour.

Luego se estabiliza el reactor con la otra barra y se repite el procedimiento hasta que la barra a calibrar esté totalmente fuera del reactor. Con los resultados obtenidos se grafica la reactividad con respecto a la posición de la barra.

Se producen errores sistemáticos al adicionar las reactividades. Además, dado que cada vez que se produce un salto hay que volver a poner a crítico el reactor, cambia la distribución de neutrones en el reactor y con ello la eficiencia de las barras. Debido a ello, es preferible realizar grandes saltos, repitiendo varias veces la calibración, en vez de saltos pequeños.

Se pueden realizar saltos positivos y negativos de reactividad. Para los negativos, se realiza el mismo procedimiento, insertando la barra a calibrar y se mide el tiempo que tarda el flujo en disminuir a la mitad. En la ecuación inhour,  $\omega$  es negativo, por lo tanto,  $T$  es negativo.

Para  $\Delta\rho$  negativos, existen discontinuidades en el intervalo de tiempo de 0 a 58 segundos. Debido a ello, la experiencia es conveniente realizarla para tiempos mayores a 120 segundos.

### 3. Exceso de reactividad.

El exceso de reactividad es la reactividad disponible en el reactor si las barras de control se encontraran totalmente extraídas.

A partir de la experiencia, se escoge una combinación de posiciones de las barras para un estado crítico. Mediante las curvas de calibración se determina la diferencia de reactividad entre esa posición y la correspondiente al caso de que las barras estén totalmente retiradas. Esa diferencia es el exceso de reactividad.

4. La ecuación inhour.

$$\rho^*(T) = \frac{\rho / \beta}{1 + l \cdot \frac{\ln 2}{T}} \left\{ \frac{l \cdot \ln 2}{\beta T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i / \beta}{1 + \lambda_i T / \ln 2} \right\}$$

Tabla 1

i	$\beta_i / \beta$	$\lambda_i$
1	0,033	0,012
2	0,219	0,030
3	0,196	0,111
4	0,395	0,301
5	0,115	1,136
6	0,042	3,013

$$l = 10^{-4} \text{ s}$$

$$\beta = 6,4 \cdot 10^{-3}$$

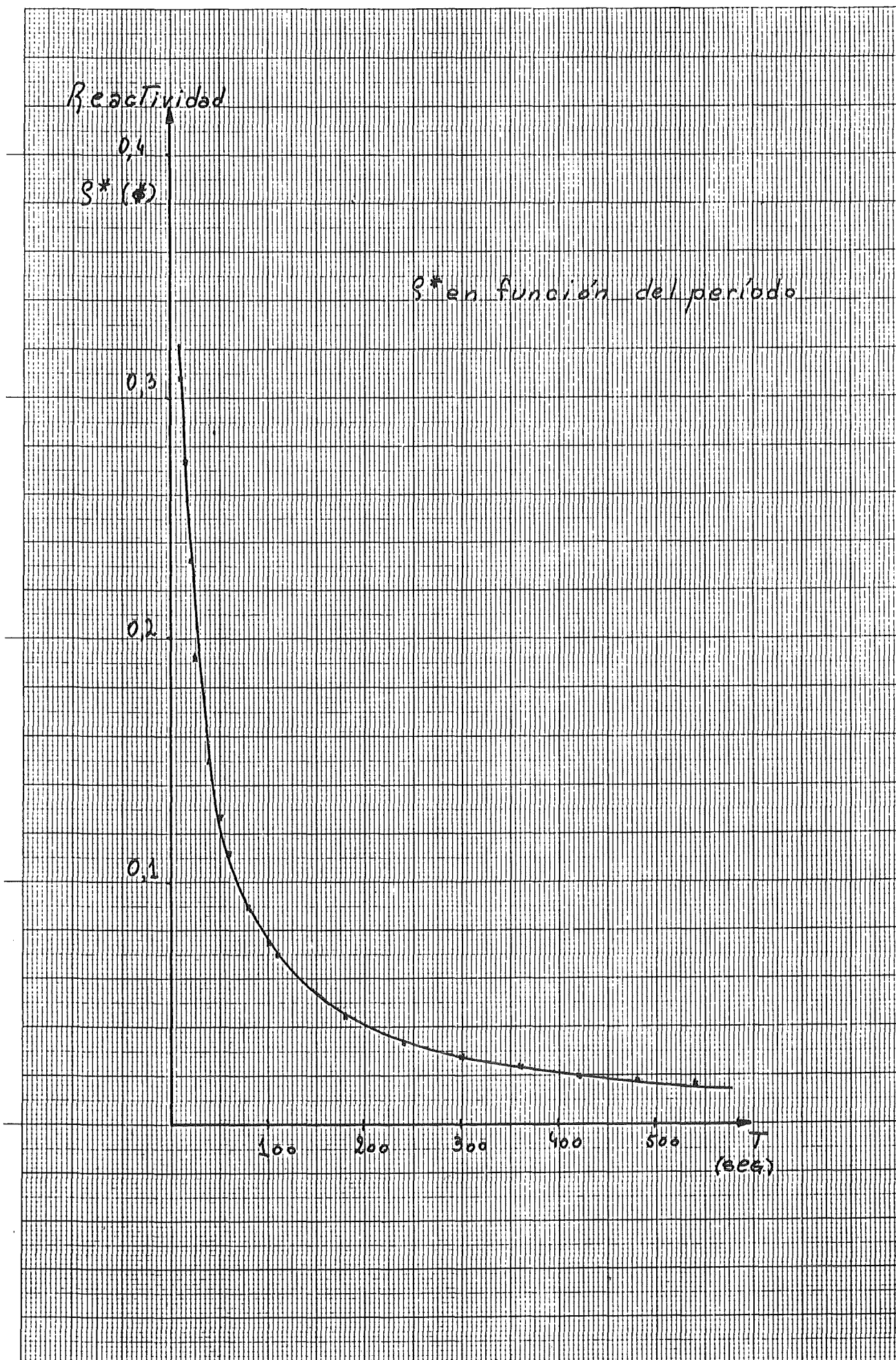
$$\omega = \ln 2 / T$$

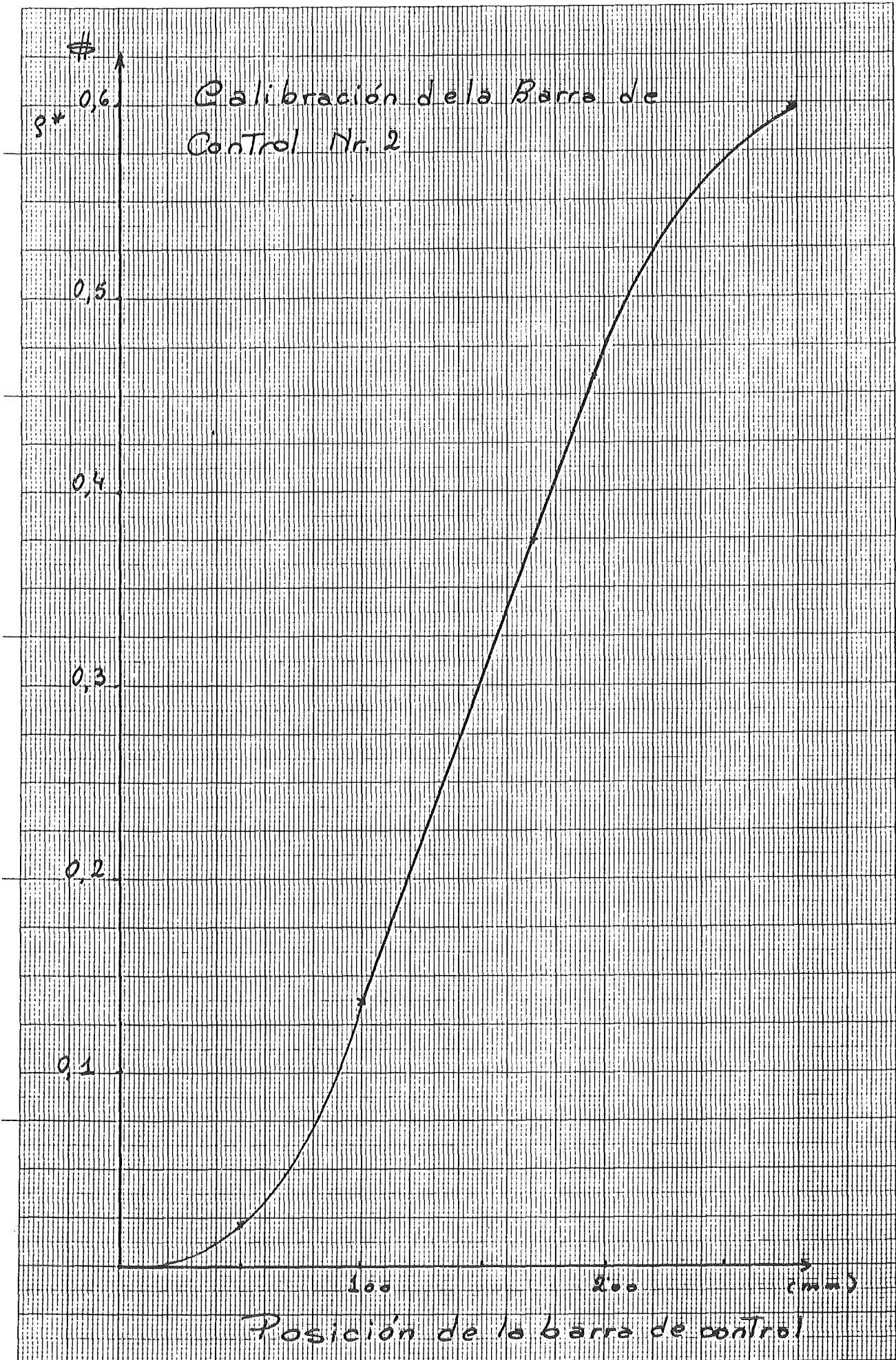
El primer factor de la ecuación se puede considerar igual a 1 para  $T > 0,1$  seg, cometiéndose un error del 0,7 %

El primer término en el paréntesis se lo puede considerar nulo para  $T > 10$  seg, cometiéndose un error del 3 %

5. Mediciones.

Posición de barras		Tiempos de duplicación medidos			Promedio $\bar{T}$ (seg)	$\Delta\rho^*$ ( $\frac{\#}{\#}$ )	$\Delta\rho^* = \Sigma \Delta\rho^*$ ( $\frac{\#}{\#}$ )
1 (mm)	2 (mm)	$T_1$ (seg)	$T_2$ (seg)	$T_3$ (seg)			
218	001	-	-	-	∞	-	
218	048	300	-	-	300	0,028	
208	048	-	-	-	∞	-	
208	102	60	58,8	58,6	69,1	0,140	
174	102	-	-	-	∞	-	
174	200	10,8	11,0	11,2	11,0	0,462	
068	200	-	-	-	∞	-	
068	250	41,0	41,2	41,6	41,3	0,145	





Determinación de perturbaciones.

1. Teoría.

Frecuentemente se introducen muestras o instrumentos de medición en los reactores de experimentación, debido a lo cual se producen pequeños cambios o perturbaciones en el comportamiento del mismo. En los reactores de potencia también existen perturbaciones, debido a inhomogeneidades en el quemado del combustible y en la concentración de venenos, o en la creación de espacios vacíos debido a burbujas en el moderador y el refrigerante. Debido a ello, se debe estudiar la variación de la reactividad por absorción y difusión de neutrones y por la generación de espacios vacíos

Un estado estacionario no perturbado se describe en la aproximación de la teoría de difusión como :

$$(1) \quad 0 = D \Delta \phi_0 + (k_\infty - 1) \Sigma_a \phi_0$$

donde:

$D$  : es la constante de difusión

$\phi_0$  : es el flujo no perturbado

$\Sigma_a$  : es la sección eficaz de absorción

mientras que un estado perturbado no estacionario responde a la ecuación:

$$(2) \quad \frac{1}{v} \frac{\delta \phi}{\delta t} = D' \Delta \phi + (k'_\infty - 1) \Sigma'_a \phi$$

donde:  $D' = D + \delta D$

$\Sigma' = \Sigma + \delta \Sigma$

$k' = k + \delta k$



Si se realiza la diferencia entre ambos se obtiene:

$$(3) \quad \frac{1}{v} \frac{\phi_0 \delta \phi}{\delta t} = D (\phi_0 \Delta \phi - \phi \Delta \phi_0) + \delta D \phi_0 \Delta \phi + \Sigma_a (\delta k_\infty) \phi_0 \phi + (k_\infty - 1) \delta \Sigma_a \phi_0 \phi$$

Si se supone que la perturbación no cambia la distribución espacial del flujo, sino sólo su comportamiento temporal, se puede descomponer el flujo como:

$$(4) \quad \phi(x,t) = \phi_0(x) \cdot e^{\omega t}$$

donde:

$$\omega = \frac{k_\infty - 1}{\beta \ell} \quad (5)$$

Integrando la ecuación (3) en todo el volumen del reactor,

$$(6) \quad \frac{\omega}{v} \int_V \phi^2 dV = \int_V (\delta D \phi_0 \Delta \phi_0) dV + \int_V (\Sigma_a \delta k_\infty + k_\infty - 1) \delta \Sigma_a \phi_0^2 dV$$

Si se aplica el teorema de Green

$$(7) \quad \int_V \phi_0 \Delta \phi_0 dV = \int_S \phi_0 \nabla \phi_0 \cdot dS + \int_V (\nabla \phi_0)^2 dV$$

Como el flujo se anula en la superficie exterior S del reactor, el primer término del segundo miembro es nulo, por lo tanto:

$$(8) \quad \frac{\omega}{v} \int_V (\delta D \nabla \phi_0^2) dV = \frac{\int_V (k_\infty \delta \Sigma_a + \delta \Sigma_a k_\infty - \delta \Sigma_a) \phi_0^2 dV}{\int_V \phi_0^2 dV}$$

Se define reactividad como:

$$(9) \quad \rho = (k_{ef} - 1) / k_{ef}$$

Para los neutrones térmicos

$$(10) \quad k_{ef} = \frac{k_{\infty}}{1 + B^2 L^2}$$

Reemplazando en (9)

$$(11) \quad \rho = \frac{(k_{ef} - 1) (1 + B^2 L^2)}{k_{\infty}}$$

Para obtener la relación entre la reactividad  $\rho$  y  $\omega$ , se reemplaza (5) en (11)

$$(12) \quad \rho = \omega \cdot 1 \frac{(1 + B^2 L^2)}{k_{\infty}}$$

Reemplazando 1 por su valor

$$(13) \quad 1 = \frac{l_0}{1 + B^2 L^2} = \frac{1}{v \Sigma_a (1 + B^2 L^2)}$$

se obtiene:

$$(14) \quad \rho = \frac{\omega}{v \Sigma_a k_{\infty}}$$

Por lo tanto reemplazando en (8) se obtiene la reactividad para estados perturbados:

$$(15) \quad \rho = \frac{1}{\Sigma_a k_{\infty}} \left\{ \frac{\int_V \delta D (\nabla \phi_0^2) dV + \int_V (k_{\infty} \delta \Sigma_a + \Sigma_a \delta k_{\infty} - \delta \Sigma_a) \phi_0^2 dV}{\int_V \phi_0^2 dV} \right\}$$

## 2. Método

### Perturbación por dispersión.

Para hallar la perturbación que un cuerpo dispersivo ejerce en un reactor, se estudia la variación de reactividad en función de la posición del cuerpo dentro del reactor.

Como medio dispersivo se utiliza grafito, pues su absorción de neutrones es despreciable. Se introduce una barra de este material, de 5 cm de longitud dentro del canal I de experimentación, el cual se encuentra vacío. Se la coloca en distintas posiciones a lo largo del canal. En cada una de ellas se pone a crítico el reactor, y con ayuda de la curva de calibración de las placas de control se obtiene el exceso de reactividad para esa posición de barras. Se realiza la diferencia entre el exceso de reactividad así calculado y el que habría si el canal estuviese vacío y se grafica esa diferencia en función de la posición de la barra de grafito.

### Perturbación por absorción.

Para hallar la perturbación por absorción, se colocan placas de cadmio dentro de un cilindro de plexiglás, estando el canal de experimentación relleno de plexiglás. Se utiliza Cd pues es un gran absorbente de neutrones.

Se repite el mismo procedimiento utilizado para la perturbación por dispersión, pero la diferencia de reactividades se calcula con la que habría si el canal estuviese totalmente relleno con plexiglás.

### Perturbación por espacio vacío.

Para hallar la perturbación que haría un espacio vacío en el reactor, se utiliza un cilindro de plexiglás hueco, de paredes muy delgadas, cuando el canal de experimentación está relleno con

plexiglás. Se repite el mismo procedimiento que para la perturbación por absorción.

3. Mediciones

Posición (mm)	Barra de control 1 (mm)	Barra de control 2 (mm)	r	$\rho$ ( $\frac{\#}{\#}$ )	$\Delta\rho$ ( $\frac{\#}{\#}$ )	$\frac{\Delta\rho}{\rho \text{ máx}}$
Vacío	21.0	20.4	32	0,136	0,002	
0	21.0	20.3	29	0,138	0,004	
22,5 Grafito (25-50)	21.0	20.2	26	0,140	0,007	
85.5	21.0	20.0	23	0,143	0,008	
88,5	21.0	19.9	20	0,144	0,014	
91.5	21.0	19.6		0,150		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

Perturbación por dispersión

Gráfico

Núcleo

Gráfico

g

0.1 (g)

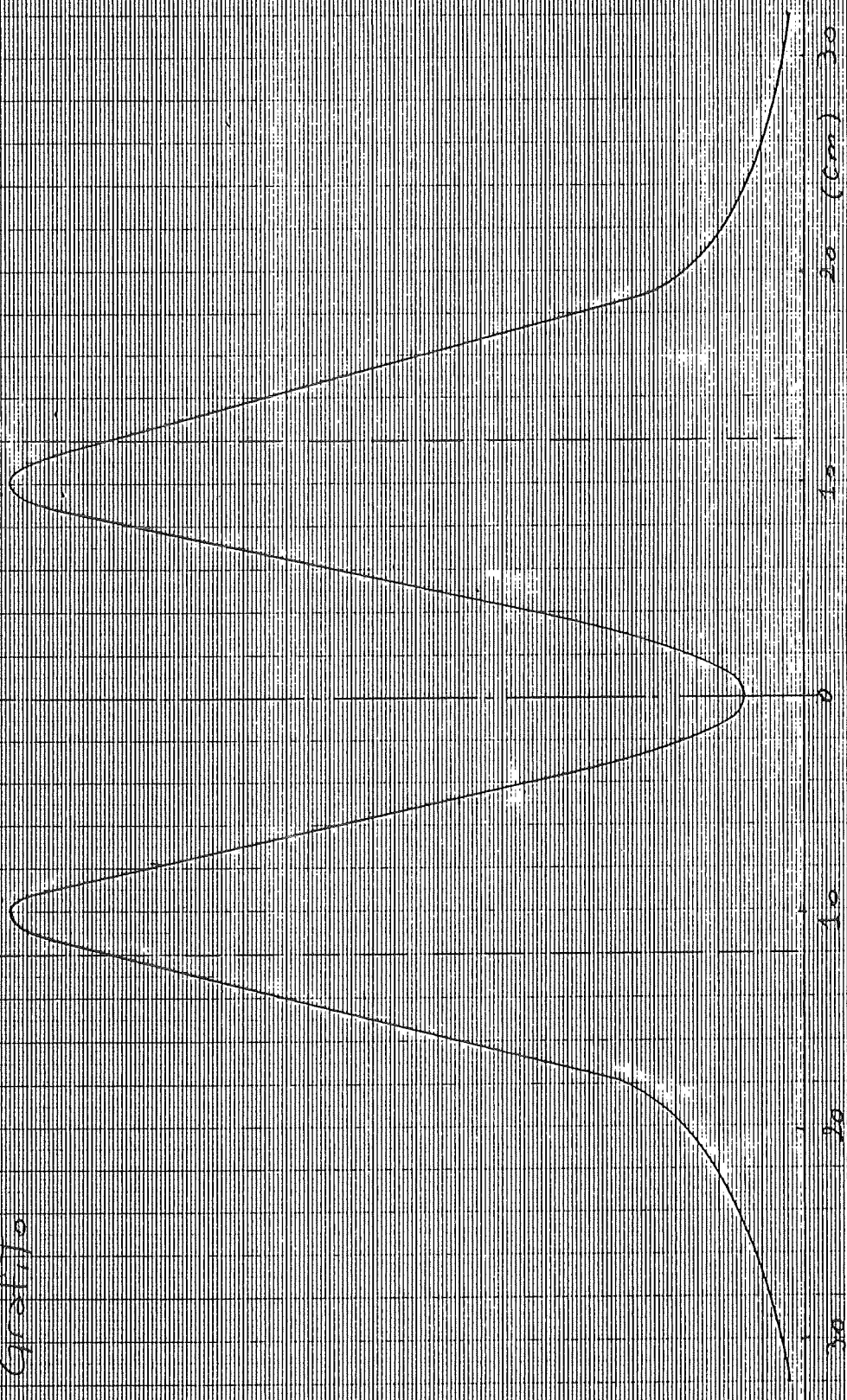
0.075

0.05

0.025

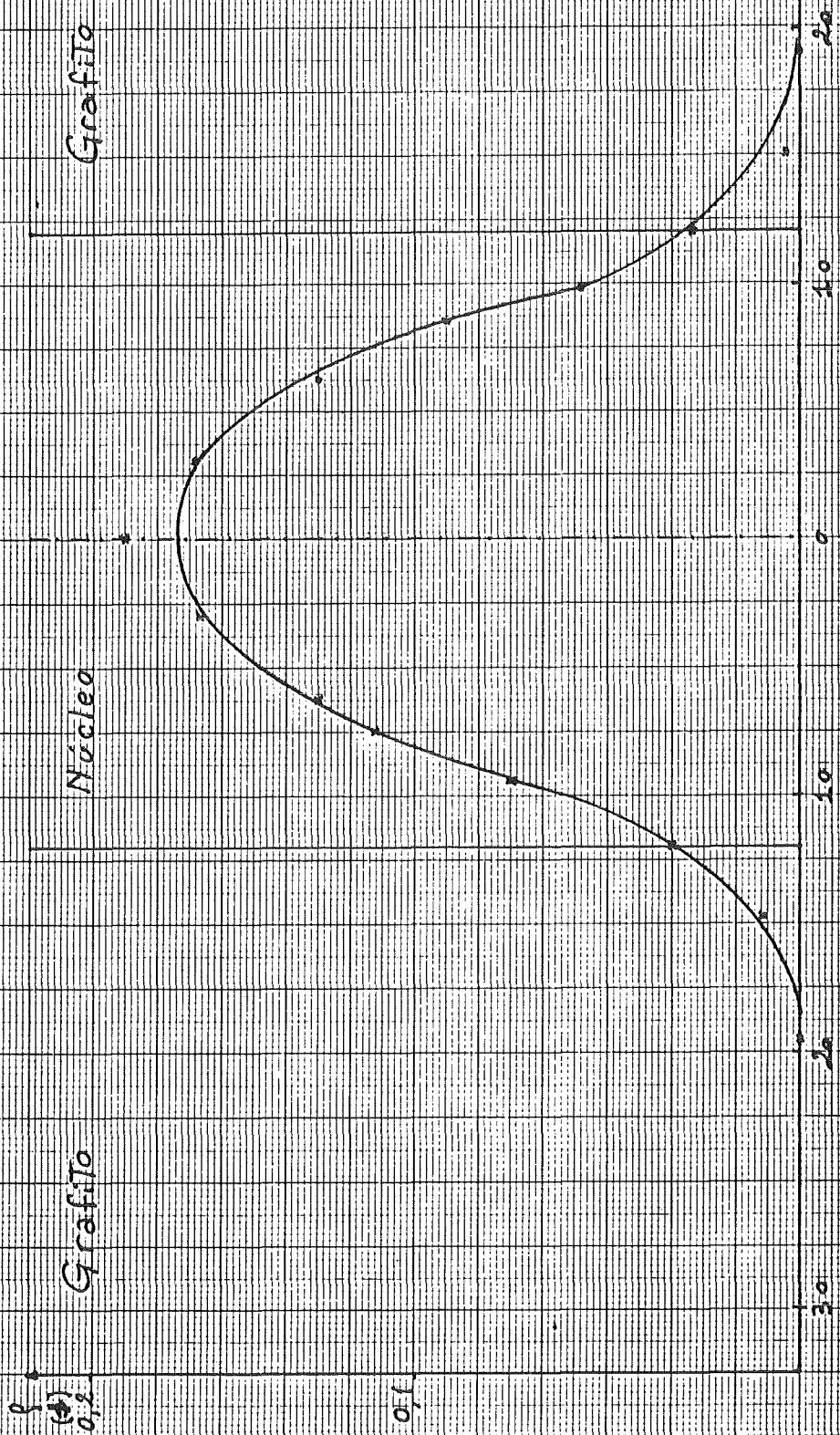
0.005

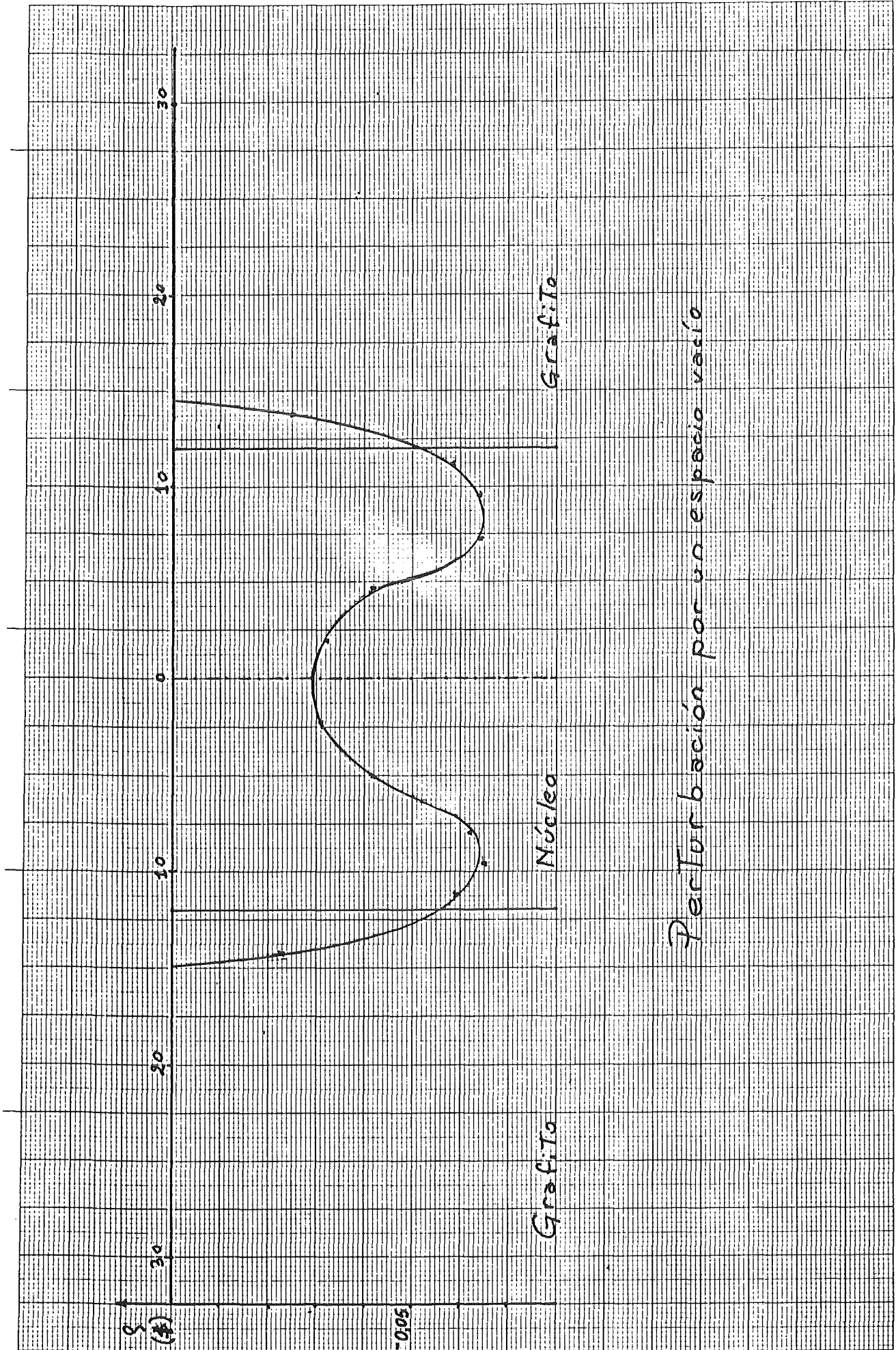
g



Distancia al eje del núcleo

*Perturbación por absorción*









## Método de Rossi - $\alpha$

### 1. Teoría

El método de Rossi -  $\alpha$  es un método estadístico mediante el cual se puede calcular la vida media, la intensidad y la potencia de un reactor en un estado estacionario.

Si ingresan al reactor una cierta cantidad de neutrones, luego de un corto tiempo  $t$  el número de neutrones que se encontrarán en el mismo se puede calcular mediante la expresión:

$$(1) \quad N = N_0 e^{-\alpha t}$$

donde

$$(2) \quad \alpha = \frac{1 - k (1 - \beta)}{l}$$

donde  $N$  : es el valor esperado de neutrones que se encuentren en el reactor luego de un tiempo  $t$

$\alpha$  : es la constante de decaimiento de los neutrones prompt

$k$  : es el factor de multiplicación efectivo

$\beta$  : es la fracción de los neutrones retardados

$l$  : es la vida media de los neutrones prompt

Mediante el método de Rossi -  $\alpha$  se mide el decaimiento de los neutrones prompt en un reactor estacionario, con lo cual se puede calcular la vida media. Para ello se debe aislar un gran número de cadenas neutrónicas que se extingan al mismo tiempo, se debe fijar el tiempo en que se inician y se debe estudiar el comportamiento en función del tiempo.

Se utilizan dos detectores de neutrones en coincidencia. Los pulsos del detector D1 se toman como tiempo inicial, los pulsos del segundo detector D2 se suman en varios canales según el

tiempo transcurrido desde la señal inicial hasta que son detectados.

Si no hay correlación entre las dos señales, los pulsos de D2 son independientes de los de D1. Si se grafica el número de cuentas en función del tiempo, se obtiene una fluctuación respecto de un valor constante.

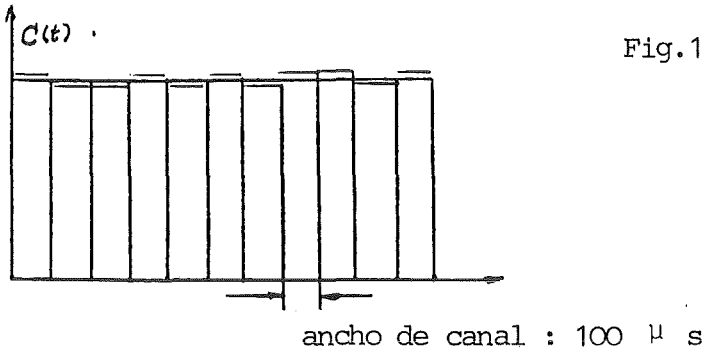


Fig.1 Distribución de los impulsos en función del tiempo en un sistema no correlacionado.

Este valor viene dado como el producto del número de fisiones  $F$  por la eficiencia  $\eta$  del detector

$$(3) \quad W_{12}^0 = F_1 \eta_1 dt_1 \quad F_2 \eta_2 dt_2$$

donde  $W_{12}^0$  es la probabilidad de que el detector D1 cuente neutrones en el tiempo  $(t_1, t_1+dt_1)$  y el detector D2 detecte neutrones en el tiempo  $(t_2, t_2+dt_2)$ , si los neutrones no están correlacionados.

Si dos neutrones registrados en D1 y D2 tienen el mismo origen, debe existir una correlación

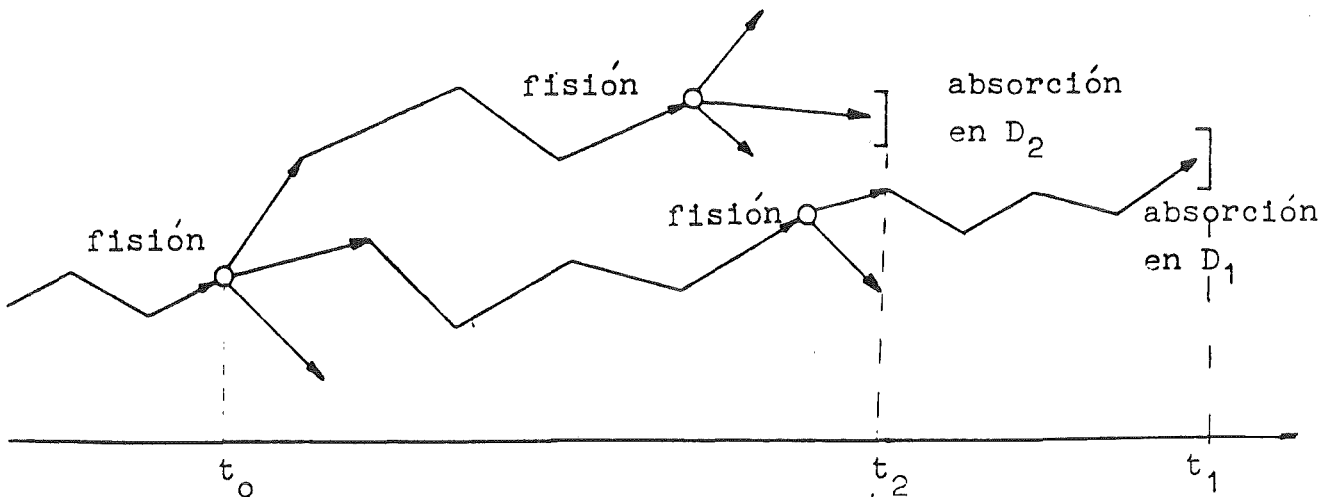


Fig 2 Historia de los neutrones correlacionados en un sistema multiplicativo

Considerando el término correspondiente a la probabilidad de que se detecten dos neutrones que no estén correlacionados y suponiendo que  $t_1 = 0$

$$(7) \quad W(t) dt = \eta_1 \eta_2 F \left( F + \frac{\chi^2 k_{pr}^2}{2 \alpha l^2} \right) e^{-\alpha t} dt$$

Teniendo en cuenta que:

$F dt$  es el número de fisines que ocurren en  $(t_0, t_0 + dt_0)$

$P_\nu$  es la probabilidad de que se emitan  $\nu$  neutrones por fisión

$\nu e^{-\alpha(t_1 - t_0)}$  es la probabilidad de que uno de esos neutrones exista en un tiempo  $t_1 > t_0$

$(\nu - 1) e^{-\alpha(t_2 - t_0)}$  es la probabilidad de que otro de los neutrones que se emiten en la misma fisión exista en un tiempo  $t_2 > t_0$

$k_{pr} / l$  es la probabilidad de la producción de neutrones por intervalo de tiempo

$\eta_1 \frac{k_{pr} dt_1}{\bar{\nu} l}$  es la probabilidad de que un neutrón se registre en el detector D1 en  $(t_1, t_1 + dt_1)$

$\eta_2 \frac{k_{pr} dt_2}{\bar{\nu} l}$  es la probabilidad de que un neutrón se registre en  $(t_2, t_2 + dt_2)$

se obtiene que la probabilidad de que se detecten dos neutrones provenientes de la misma fisión es:

$$(4) \quad W_{12}^{corr} = \int_{-\infty}^{t_1} dt_0 F \chi_2 \frac{\eta_1 \eta_2 k_{pr}^2}{l^2} dt_1 dt_2 \cdot e^{-\alpha(t_1 - t_0)} e^{-\alpha(t_2 - t_1)}$$

donde 
$$\chi_2 = \sum_{\nu} P_{\nu} \frac{\nu(\nu - 1)}{\bar{\nu}^2} \quad (5)$$

Integrando:

$$(6) \quad W_{12}^{corr} = F \frac{\eta_1 \eta_2 \chi_2 k_{pr}^2}{2 \alpha l^2} e^{-\alpha(t_2 - t_1)} dt_1 dt_2$$

2. Método

Para realizar la experiencia se coloca un detector de  $BF_3$  en el canal de experimentación IIA en la región del reflector. Este detector provee la señal de referencia para el analizador de tiempos. Otro detector idéntico se coloca en el canal I de experimentación cerca del núcleo. A cada detector le corresponde un preamplificador y un amplificador. El analizador de tiempos es un multicanal con 400 canales, con un ancho de canal de  $100 \mu s$ . La medición se efectúa hasta obtener una buena estadística, para lo cual se necesita aproximadamente dos horas.

Se obtiene una distribución de frecuencias según la función:

$$(8) \quad C(t) = A e^{-\alpha t} + B$$

donde

$$(9) \quad dA = N dt \quad \eta^2 \quad \chi^2 \quad k^2$$

$$2 \quad \alpha \quad l^2$$

$$(10) \quad dB = N dt \quad \eta \quad 2 \quad F$$

C es el número de impulsos que tienen lugar en un intervalo de tiempo  $t \pm dt/2$

B es la constante de fondo que corresponde a los neutrones que no tienen correlación entre sí

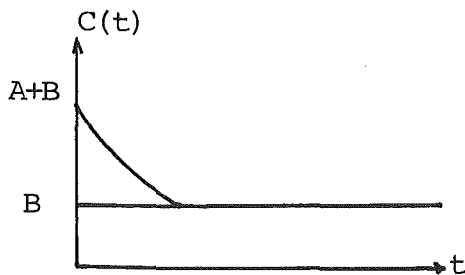


Fig.3 Distribución de los impulsos en función del tiempo.

Graficando  $C(t)$ -b en papel semilogarítmico se puede obtener fácilmente la pendiente  $\alpha$ . Debido a que el reactor está crítico,

$$(11) \quad k = 1$$

reemplazando en ( 2)

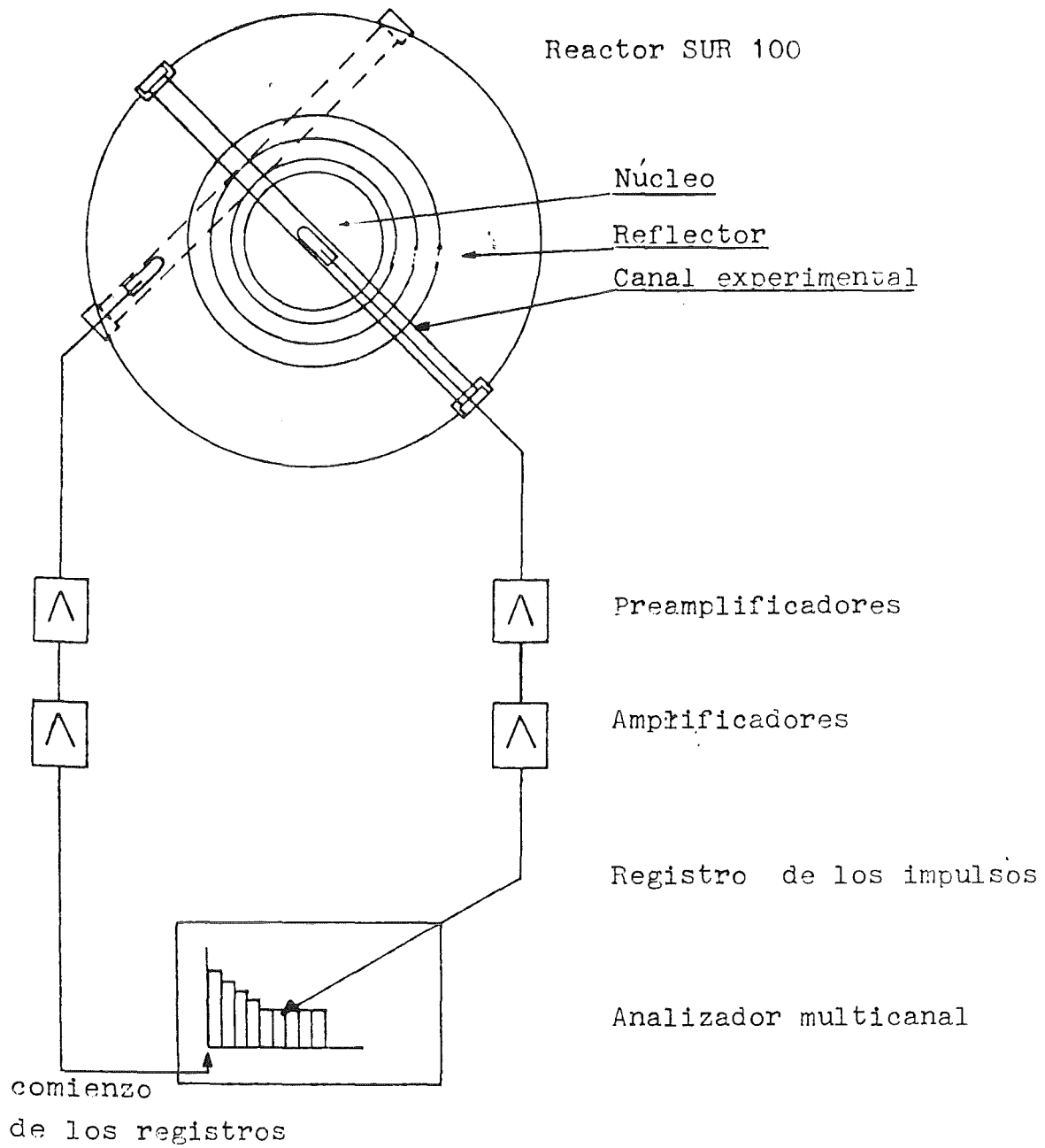
$$(12) \quad \alpha_c = \alpha = \beta/l$$

de donde se puede sacar la vida media neutrónica.

De la relación A/B se puede obtener F, el número de fisiones y con él, L, la potencia del reactor:

$$(13) \quad F = \frac{\chi_2 k^2 \alpha_c^2 B}{2 \beta^2 \alpha A}$$

$$(14) \quad L = 3,1 \cdot 10^{-10} \frac{\chi_2 \alpha_c^2 B}{2 \beta^2 \alpha A} \quad (\text{Watt})$$



Disposición experimental para la experiencia de Rossi- $\alpha$  en el Reactor SUR 100



3. Mediciones

Canal No.	Impulsos	Fondo	Impulsos corregidos
2	3002	2440	562
3	2998		558
4	2940		500
5	2784		344
6	2848		408
7	2768		328
8	2718		278
10	2631		191
11	2696		256
12	2604		164
⋮	⋮		⋮

Periodo :  $4 \times 10^{-3}$  seg

$\alpha$  :  $\ln 2 / T = 1,733 \times 10^2$  1/seg

l :  $\beta / \alpha = 0,0073 / 173,3$  1/seg =  $4,2 \times 10^{-5}$  seg

Potencia:

$$L = 3,08 \cdot 10^{-11} \frac{X_2^2}{2 \beta l A} \quad (\text{Watt}) = 1,14 \times 10^{-4} \text{ Watt}$$

$X_2 = 0,8$

$\beta = 7,3 \cdot 10^{-3}$

l =  $4,2 \times 10^{-5}$  seg

B = 21013

A = 7400

$\approx 0,11 \text{ mW}$





## Medición del campo de radiación en las inmediaciones del reactor.

### Teoría

Debido a que parte de la radiación generada en el reactor no es detenida por el blindaje, como medida de seguridad se debe medir el campo de radiación en los alrededores del reactor.

La radiación  $\alpha$  y  $\beta$  y los neutrones térmicos son fácilmente detenidos por el blindaje, los neutrones rápidos lo son en parte, por el agua borada que rodea al núcleo del reactor, y la radiación lo es, en parte, por el blindaje de plomo. Por lo tanto, la radiación que se encuentra en el exterior del reactor está formada en gran parte por radiación gamma  $\gamma$ , en menor medida, por neutrones rápidos.

### Método

El campo de radiación se indica mediante curvas de isodosis. Para conocer la distribución máxima de dosis, se levanta el reactor a la máxima potencia (1Watt), la cual debe mantenerse constante durante toda la experiencia.

Como la dosis varía en función de la posición, se deben tomar mediciones en dirección radial ( $r$ ) al núcleo y en dirección vertical ( $z$ ). Se toman lecturas cada 20 cm, para distintas alturas en cada posición. También se realizan mediciones en la parte superior del reactor.

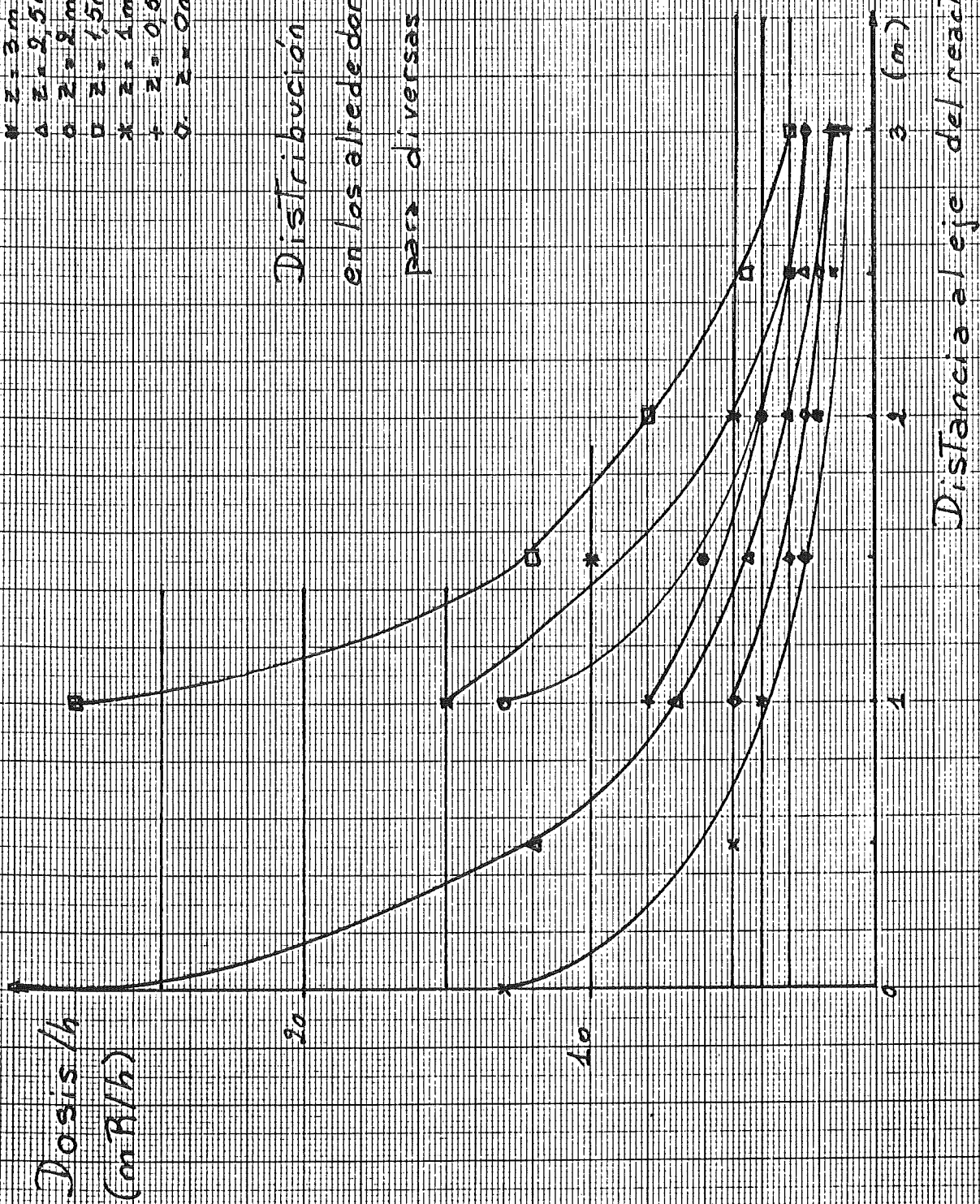
Una vez obtenidas todas las mediciones, se grafica la dosis en función de la distancia al núcleo ( $r$ ). Se obtiene una curva para cada posición vertical ( $z$ ). A partir de estas curvas, se obtienen los puntos para los cuales la dosis es constante, y se los grafica en  $(r,z)$ , obteniéndose así las curvas de isodosis.

r (m) \ z (m)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
0	-	-	5	3	2,5	2	1,5
0,5	-	-	8	6	4	3	1,5
1	-	-	15	10	5	3	2,5
1,5	-	-	28	12	8	3,5	3
2	-	-	12	6	4	3	2,5
2,5	30	12	7	3,5	3	2,5	1,5
3	13	5	4	2,5	2	1,5	1

Mediciones

- $Z = 3m$
- △  $Z = 2,5m$
- $Z = 2m$
- $Z = 1,5m$
- ×  $Z = 1m$
- †  $Z = 0,5m$
- ◇  $Z = 0m$

Distribución de la dosis/h  
en los alrededores del reactor  
para diversas alturas

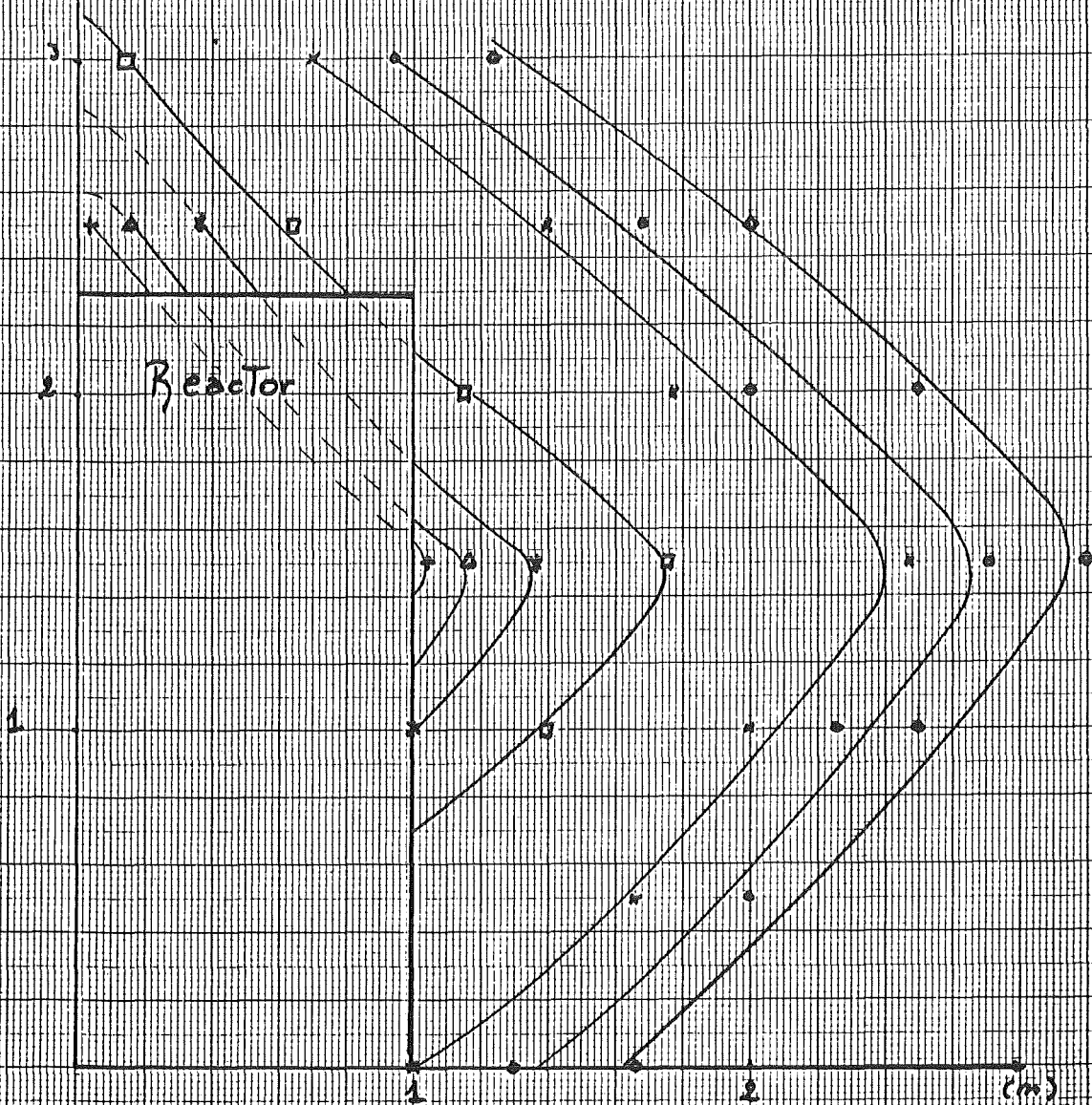


Altura,  
(m)

Dosis / h

- + = 35 mrlh
- △ = 25 mrlh
- \* = 15 mrlh
- = 10 mrlh
- x = 5 mrlh
- = 4 mrlh
- ◇ = 3 mrlh

4. Curvas de  
isodosis

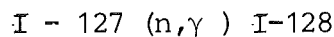


Distancia al eje del reactor

Reacción de Szillard - Chalmers  
Cambio de la forma de ligadura mediante  
un proceso ( n,  $\gamma$ )

1. Teoría

Al irradiar yoduro de etilo con neutrones térmicos se produce una reacción:



No se observa un aumento de la energía cinética en la partícula. Esto se debe a que la energía liberada en la reacción se utilizó para romper la ligadura química entre el yodo y el carbono.

Se puede observar gran cantidad de  $I^{128}$  libres, los cuales son separables mediante un medio de extracción acuoso. Debido a que el yodo se encuentra en ese medio como partícula libre, tiene una actividad específica mayor. A esta reacción se la conoce como reacción de Szillard Chalmers.

La energía liberada en la reacción produce un impulso  $p_\gamma$  tal que:

$$(1) \quad p_\gamma = E_\gamma / c$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz

Para que se cumpla el principio de conservación del impulso la partícula debe recibir un impulso idéntico,

$$(2) \quad m_k v_k = E_\gamma / c$$

por lo tanto la energía cinética correspondiente será:

$$(3) \quad E = \frac{p_\gamma^2}{2 m_k} = \frac{E_\gamma^2}{2 m_k c^2}$$

A esta energía se la denomina energía de retroceso, la cual en la mayoría de las reacciones (n, $\gamma$ ) es del orden de 6 a 8 MeV.



Para que ocurra una reacción de Szillard Chalmers se debe cumplir que :

- a) la energía de retroceso  $E_R$  sea suficiente para romper la ligadura química
- b) El elemento debe encontrarse en un medio del cual sea fácil la extracción del producto de la reacción
- c) El átomo que es separado (hot atom) debe permanecer libre

En una reacción de Szillard Chalmers parte de la actividad permanece en el enlace de origen, que no se vuelve a utilizar. En este caso se habla de "retención".

## 2. Método

### 2.1 Materiales

detector de  $^{131}\text{I}$  (Tl), caja de plexiglás y absorbentes

5 ml de yoduro de etilo irradiado

$\text{HNO}_3$  (2N)

$\text{AgNO}_3$  (0,5 N)

solución de KI ( 40 mg KI/ml)

solución de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (0,05N)

$\text{CCl}_4$

embudo de placa porosa ( $\varnothing = 3\text{cm}$ )

filtro de membrana ( $\varnothing = 3\text{cm}$ )

vaso de precipitado de 50ml

2 ampollas de decantación

probeta

papel semilogarítmico

### 2.2 Experiencia

Se irradia el yoduro de etilo durante 30 minutos en un flujo neutrónico de  $10^5 \text{ n/cm}^2 \text{ seg}$

Se colocan 5ml de yoduro de etilo irradiado en una ampolla de decantación y se agregan 10 ml de una solución de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  volviéndoselo a extraer.

Ambos medios de extracción se colocan en una ampolla de decantación y se los lava con 10 ml de  $\text{CCl}_4$ , obteniéndose como resultado la fase orgánica, que precipita.

Para determinar el coeficiente de S-C se miden en el detector de  $^{131}\text{I}$  2ml de yoduro de etilo y del medio de extracción.

Al medio de extracción restante se le agrega 1ml de solución de KI y 5 ml de solución 2N de  $\text{HNO}_3$  y se calienta hasta que el  $\text{SO}_2$  se halla evaporado totalmente. Se coloca una solución de  $\text{AgNO}_3$  y se precipita el iodo como  $\text{AgI}$ . Se lo calienta, se filtra con un flitro de membrana, se lo seca y se lo coloca en un soporte de aluminio, para ser medido en el detector de  $\text{GeLi}$ .

### 3. Resultados

Para identificar al elemento extraído se mide su vida media y la máxima energía beta.

Debido a que el I128 tiene una corta vida media, los valores obtenidos deben extrapolarse al comienzo de la medición.

Para medir la absorción beta se mide la actividad de la muestra colocándose absorbentes de aluminio de distintos espesores entre la muestra y el detector. Cada 5 minutos se mide la muestra sin absorbentes.

Se grafican los valores obtenidos en función del tiempo en un papel semilogarítmico. Se unen los valores de la muestra sin absorbentes. Luego se trazan paralelas de esa recta que pasen por los puntos correspondientes a las otras mediciones. El valor que se obtiene en la intersección de cada una de esas rectas con la ordenada cero es el valor extrapolado de la medición. Este método es útil pues no es necesario hacer los cálculos para extrapolar cada resultado.

En un segundo gráfico se realiza la curva de los resultados obtenidos en el gráfico anterior versus la densidad superficial de los absorbentes. El espesor correspondiente a cuando la actividad cae a la mitad de su valor es el espesor mitad. Obtenido este valor de la curva, se obtiene la energía beta máxima del gráfico de espesor mitad versus energía beta.

Para obtener el coeficiente de Szillard-Cahlmers se extrapolan los resultados obtenidos con el detector de NaI a los volúmenes totales y se realiza la siguiente relación:

$$S-C = \frac{C_{\text{solución}}}{C_{\text{solución}} + C_{\text{fase orgánica}}} \cdot 100$$

Volumen solución : 9 ml

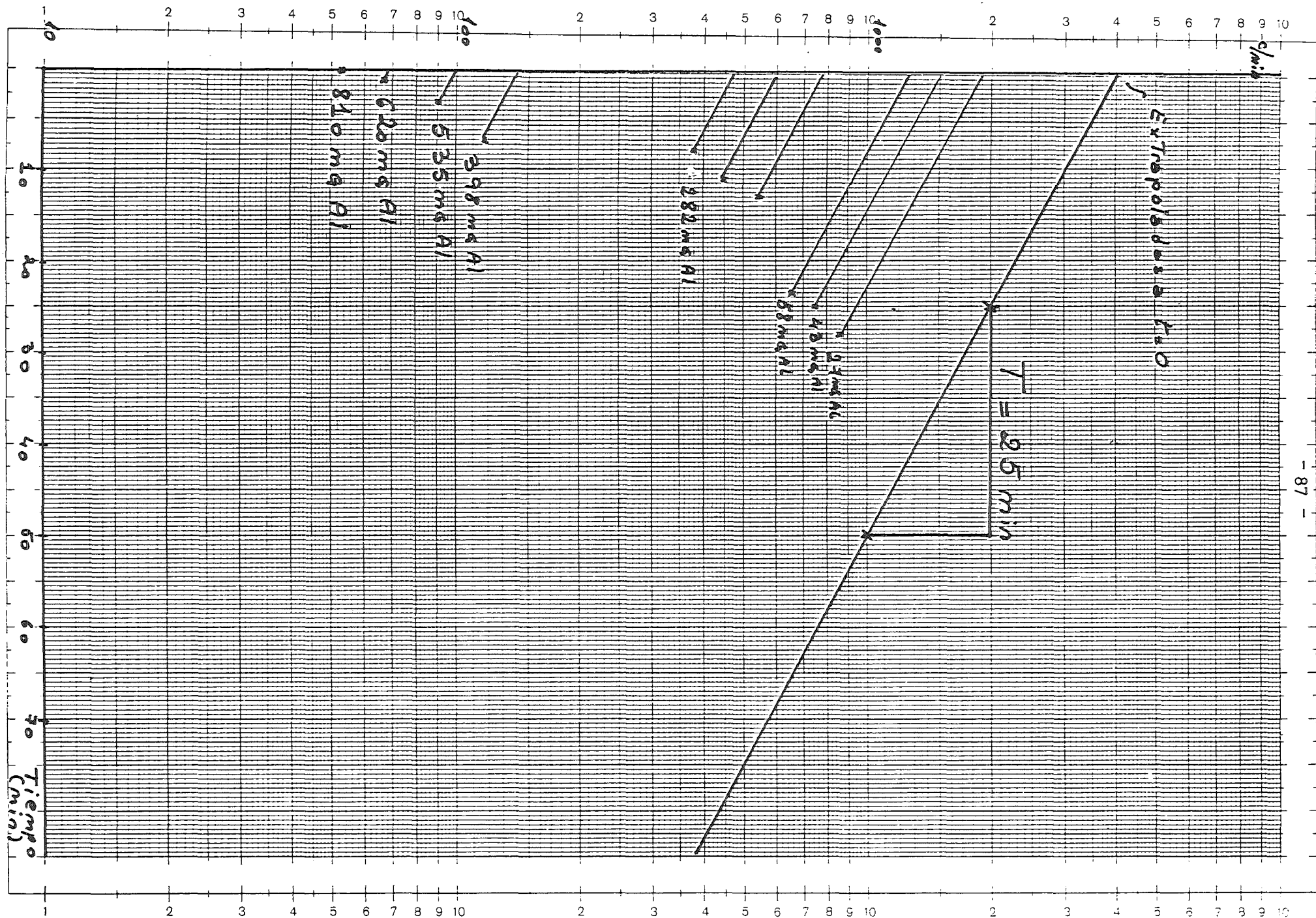
C solución : 14200 c/ml.min

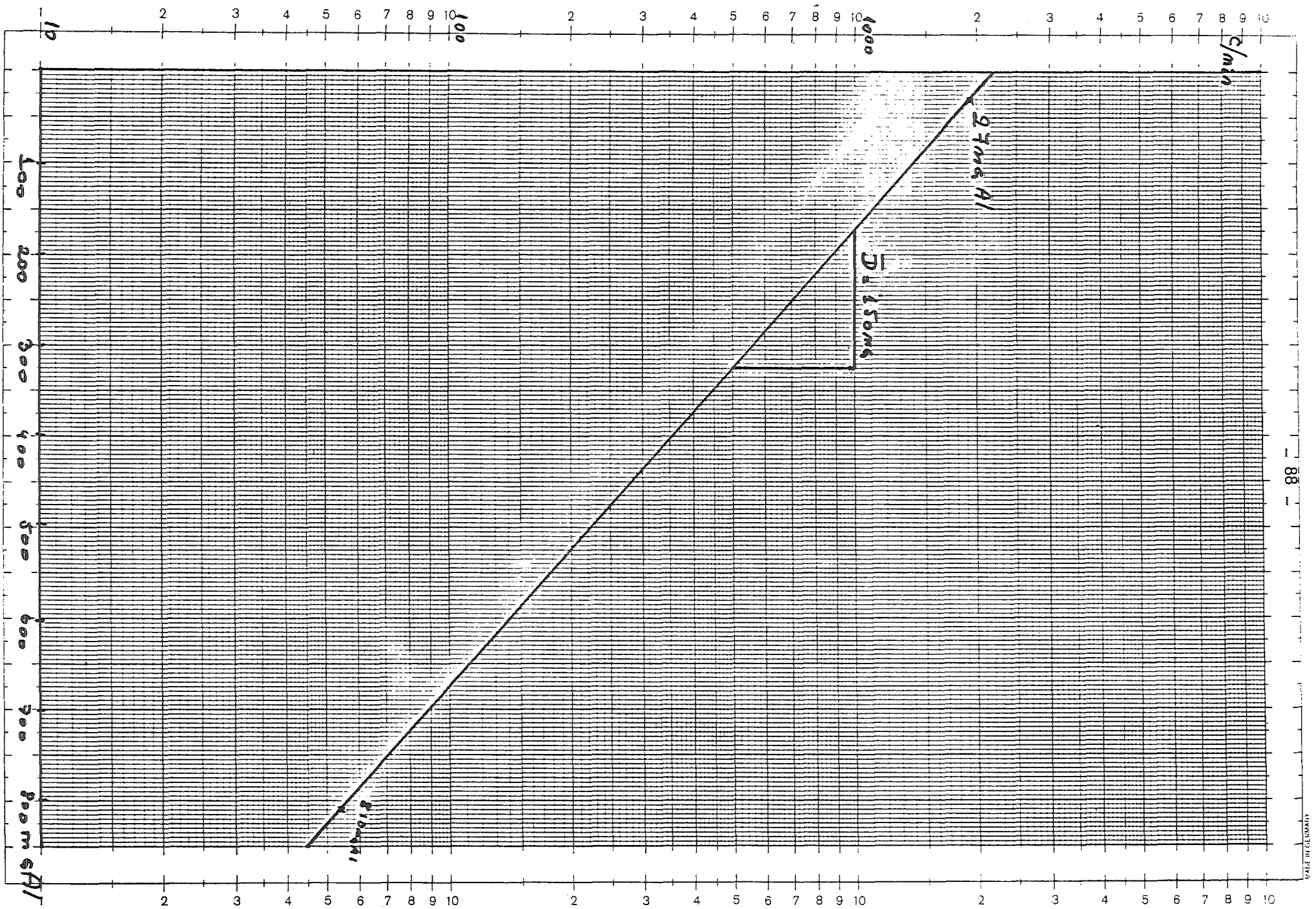
Volumen fase orgánica: 1,5 ml

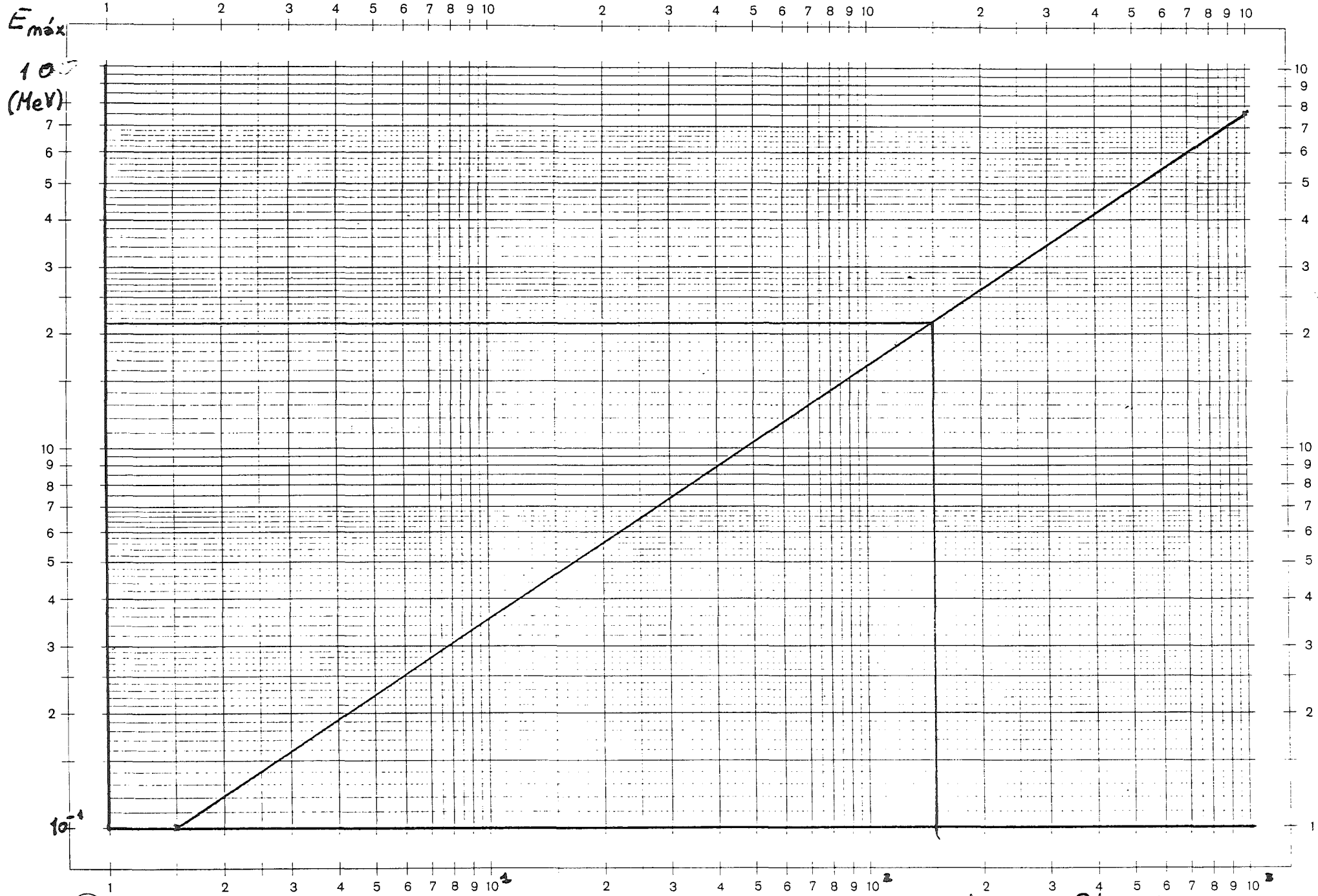
C fase org. : 70300 c/ ml. min

Coef S-C =  $\frac{14200 \text{ c/min ml} \cdot 9 \text{ ml}}{14200 \text{ c/ml min} \cdot 9 \text{ ml} + 70300 \text{ c/min ml} \cdot 1,5 \text{ ml}}$  . 100

Coef S-C = 55%









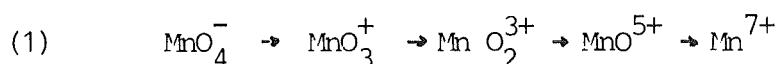


Reacción de Szillard Chalmers  
Cambio del estado de oxidación mediante  
una reacción  $(n, \gamma)$

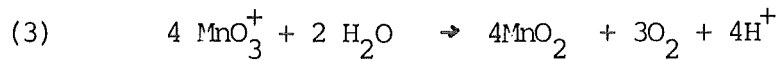
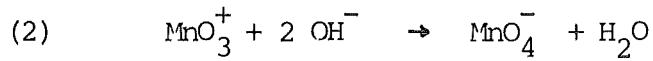
Cuando un átomo absorbe un neutrón, se encuentra en un estado excitado. Si se produce una reacción  $(n, \gamma)$  se libera parte del exceso de energía en forma de uno o más cuantos de energía gamma, que oscilan entre 6 y 8 MeV, los cuales frecuentemente son suficientes para romper enlaces químicos. Por lo tanto, se pueden obtener partículas libres irradiando ciertas sustancias con neutrones térmicos y separándolas con medios de extracción adecuados. Si el enlace no es nuevamente ocupado por otro átomo, se habla de "retención".

Irradiando un sólido cristalino, en las cercanías del átomo caliente se produce una zona fundible, la cual ejerce perturbaciones en la red cristalina. Debido a la corta vida media de estas perturbaciones ( $10^{-11}$  seg), se produce un congelamiento del núcleo cristalino. Si la sustancia cristalina sufre un tratamiento térmico después de la irradiación, aumenta el valor de la retención.

Si se irradia  $KMnO_4$ , se rompe una gran cantidad de uniones químicas, donde la mayoría de los casos se separa Mn56 activo como  $MnO_2$ . El coeficiente de Szillard-Chalmers depende fuertemente del pH de la solución en que se encuentra el  $KMnO_4$  durante la irradiación o en el cual se lo solubiliza después de ella. Esto se debe a que la separación de uno o más átomos de oxígeno del Mn56 da lugar a iones con distintas cargas:



Luego de sufrir procesos de hidratación y óxido-reducción parte de los átomos calientes toman estado 4 de oxidación, y parte, estado 7 de oxidación, por ejemplo:



Por ejemplo, cuando el  $\text{ph} = 12$ , la retención es prácticamente del 100%, debido a la hidratación (2). En los medios fuertemente ácidos ocurre una reacción de óxido-reducción (3) en la cual hay un cambio isotópico entre el  $\text{MnO}_3^+$  activo y el  $\text{MnO}_4^-$  inactivo.

## 2. Método

### 2.1 Elementos

Detector de INa(Tl)

KMnO<sub>4</sub> (sólido, con tratamiento térmico)

KMnO<sub>4</sub> (sólido, irradiado)

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (6N)

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%)

placa porosa G4

Kitasato 250ml

pipeta

probeta 50ml

vaso de precipitado de 250 ml

papel semilogarítmico

### 2.2 Experiencia

El KMnO<sub>4</sub> en forma sólida se irradia en el reactor 45 min. en un flujo neutrónico de  $10^5$  n/cm<sup>2</sup>seg y una parte de él se la calienta durante una hora a 120°C.

La muestra se solubiliza en 30 ml de agua caliente y se trasvasa despacio a una probeta graduada, a través de una placa porosa. Se mide su volumen, se pipetea 2ml en un tubo de ensayo y se lo mide en el detector de INa(Tl). En el resto se gotea despacio una solución de 3 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (6N) más 0,5 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30%). Finalmente se le agrega una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (6N) , 3ml, más 3 ml de H<sub>2</sub>O. Para medir la actividad, se miden 2ml de la solución final en el detector de NaI(Tl).

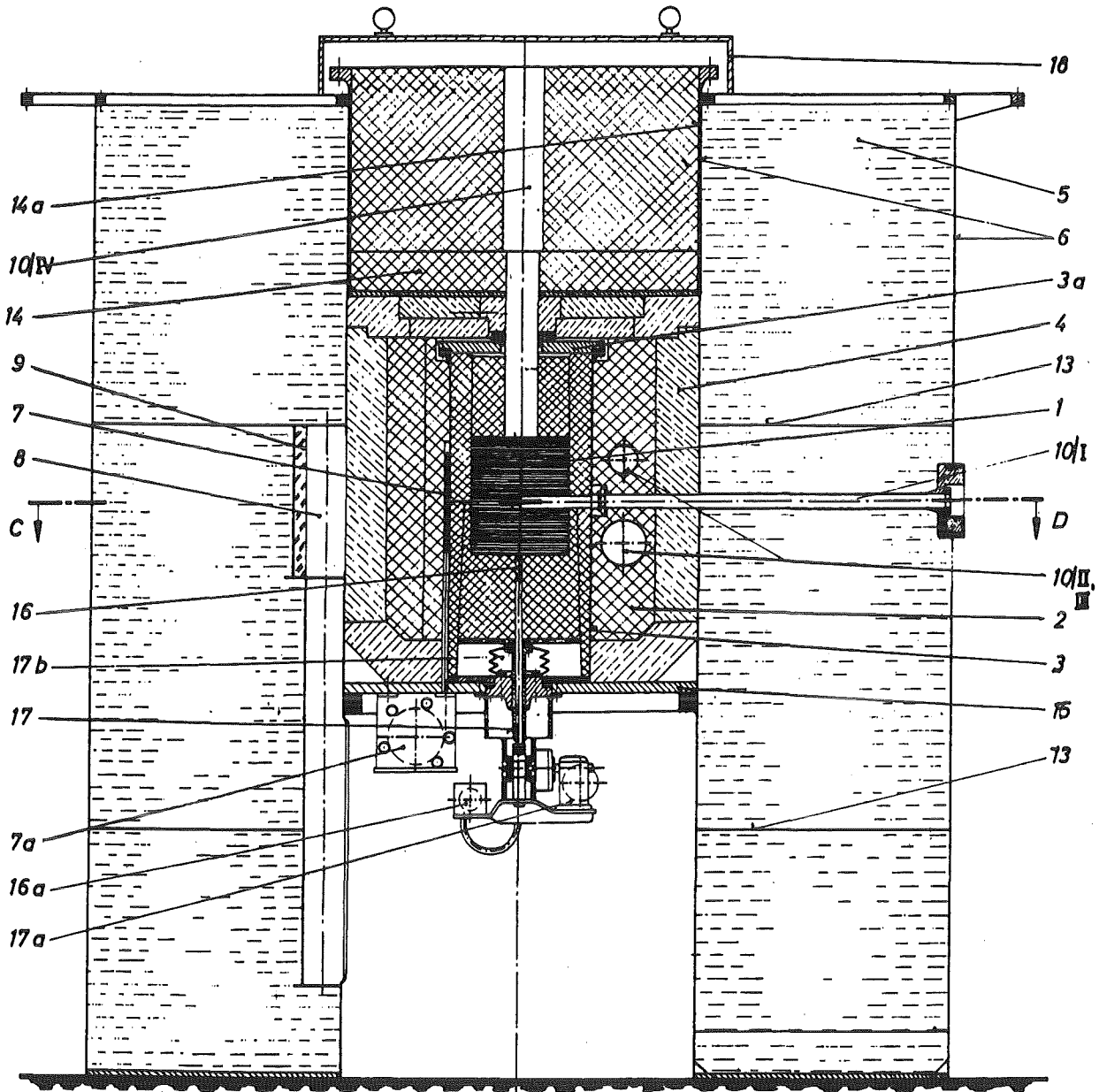
### 3. Resultados.

Los resultados obtenidos en las mediciones deben ser extrapolados al volumen total y a un mismo instante de tiempo.

El coeficiente de Szillards - Chalmers es el porcentaje de la actividad del  $Mn^{56}O_2$  respecto a la actividad total del  $Mn^{56}$ . Luego se discutirán las diferencias debidas a las muestras que sufrieron tratamiento térmico.

A P E N D I C E:

Características del Reactor SUR 100



Reactor SUR 100

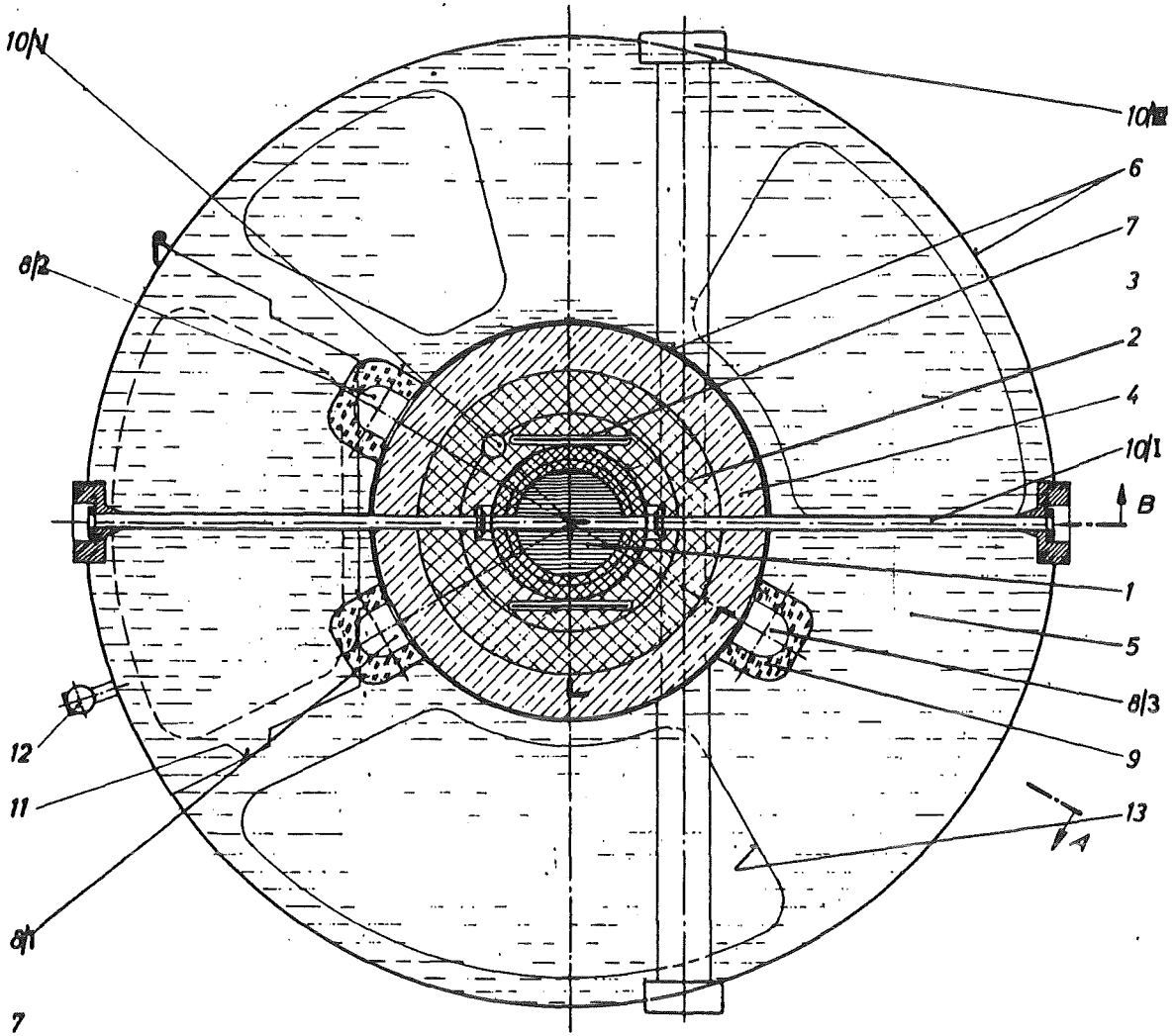
Sección A-B

El reactor SUR 100

Sección A-B

- 1 Núcleo del reactor ( placas de combustible y moderador)
- 2 Reflector ( grafito)
- 3 Recipiente del reactor
- 3 a Recipiente del reactor - Tapa
- 4 Blindaje interno - plomo
- 5 Blindaje externo - agua con ácido bórico (5%)
- 6 Tanque del reactor
- 7 Placas de control de cadmio
- 7a Mecanismo de las placas de control
- 8 Detector de neutrones
- 9 Detector en el reflector
- 10 /I Canal experimental horizontal central
- 10/II,III Canales experimentales horizontales laterales
- 10/IV Canal experimental vertical central
- 11 y
- 12 ver fig. 2
- 13 Platos de refuerzo
- 14 Columna térmica ( grafito)
- 14 a Recipiente de la columna térmica
- 15 Lámina de acero (lámina de base)
- 16 Fuente de neutrones
- 16a Mecanismo de la fuente de neutrones
- 17 Sistema de subida del núcleo
- 17a Mecanismo del sistema de elevación del núcleo
- 17 b Membrana selladora del tanque del reactor (interna)
- 18 Tapa de blindaje ( plástico borado)





Sección C-D

Figura 2

Sección C-D : fig. 2

- 1 Núcleo del reactor
- 2 Reflector (grafito)
- 3 Recipiente del reactor
- 4 Blindaje interno (plomo)
- 5 Blindaje externo (agua con ácido bórico(5%))
- 6 Tanque del reactor
- 7 Placas de control de cadmio
- 8 Detectores de neutrones
- 8/1 2 detectores de BF<sub>3</sub>
- 8/2 Cámara de ionización no compensada
- 8/3 Cámara de ionización no compensada
- 9 Detectores en el reflector
- 10/I Canal de experimentación horizontal central
- 10/II Canal de experimentación horizontal lateral
- 10/V Canal de experimentación vertical lateral
- 11 Puerta del tanque del reactor
- 12 Indicador del nivel de agua
- 13 Plato de refuerzo

Tipo	térmico, sólido, homogéneo
Núcleo	Cilíndrico ( dividido en dos partes, 24,0 cm $\varnothing$ . ca. 26,0 cm de altura)
Combustible	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (19,86% enriquecimiento en U - 235)
Moderador	Polietileno ( mezclado homogéneamente con U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
Reflector	Grafito , rodea totalmente al núcleo espesor : 20cm
Blindajes	Blindaje radial: 10cm de plomo 60 cm de agua borada (5%) Blindaje axial: arriba: 10 cm de plomo, 55cm de grafito para la columna térmica, láminas de polie- tileno borado debajo : 10 cm de plomo, base de hormigón
Fuente de neutrones	Radio-Berilio 10 mCi
Barras de control y sistemas de seguridad	2 barras de control de cadmio en el reflector Reactividad de cada plato 0,6 $\beta$ Separación de las dos mitades del núcleo Reactividad de separación : 7 $\beta$
Facilidades experimentación	1 columna térmica( cilindro de grafito de 84,7 cm $\varnothing$ , 55,0 cm de altura) 5 canales de experimentación de los cuales: canal No 1: central , horizontal, $\varnothing$ 2,6 cm

Facilidades de experimentación	1 canal horizontal lateral : canal Nr. II $\phi : 5,4 \text{ cm}$ canal Nr. 3: canal horizontal lateral $\phi_1 : 9,6 \text{ cm}$ $\phi_2 : 5,4 \text{ cm}$ Los canales I a III contienen polietileno canal Nr. 4: canal central vertical ( a través de la columna térmica) canal Nr. 5: canal vertical lateral ( a través de la columna térmica) $\phi : 6,1 \text{ cm}, 5,4 \text{ cm}$
Instrumentación nuclear	Monitores gamma para determinar la dosis gamma 1 canal de impulsos con 2 detectores de $\text{BF}_3$ Región de medición : $10^7 \text{ Imp/min}$ 1 canal de corriente continua logarítmico con una cámara de ionización de $\text{BF}_3$ no compensada. Región de medida: $10^{-4} - 10^{-11} \text{ A}$ 1 canal de corriente continua lineal con una cámara de ionización de $\text{BF}_3$ no compensada: $3 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-12} \text{ a}$
Potencia	100 mW ; máxima 1W
Flujo máximo	$6 \times 10^6 \text{ n / cm}^2 \text{ seg}$ ( para 100 mW)
Medidas y peso	altura máxima : 3,3 m altura de la plataforma 2,4 m diámetro del recipiente del reactor 2,1 m diámetro de la plataforma 2,4 m peso con blindaje de agua 15 t